



**ANTECEDENTES TÉCNICO-ECONÓMICOS PARA EL CONTROL DE
EMISIONES DE HIDROFLUOROCARBONOS (HFC) EN SISTEMAS
DE FRÍO**

ID Licitación: 608897-6-LE24

Estudio solicitado por Subsecretaría del Medio Ambiente

INFORME FINAL

Santiago, 16 de diciembre de 2024

Título del Proyecto

Antecedentes técnico-económicos para el control de emisiones de hidrofluorocarbonos (HFC) en sistemas de frío

Autores:

Jefe de proyecto: Luis Cifuentes

Profesionales especialistas: Viviana Cerda Gho, Valentina Morandé Thompson, Rosario Palacios

Ingeniero de proyecto: Daniela Madrazo Ortega, Iván Cantallopts, Pollete Lara

Dictuc S.A.

Vicuña Mackenna N° 4860, Macul – Santiago

Datos Mandante

Razón Social: Subsecretaría del Medio Ambiente

RUT : 61.979.930-5

Dirección: San Martín 73, Santiago

Resumen

El objetivo de esta consultoría es proveer insumos técnicos y económicos que permitan crear una norma de emisiones de hidrofluorocarbonos (HFC) desde grandes sistemas de frío, incluyendo una caracterización de medidas factibles de reducción de emisiones de HFC y un análisis técnico económico de la propuesta, conforme a lo establecido en el artículo 14° de la Ley N° 21.455/2022 y en cumplimiento a los compromisos de Chile ante la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal y la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático.

Cuerpo del informe

249 hojas (incluye portada)

Fecha del informe

16/12/2024

Información Contractual

Correlativo Contrato:

OC N°: 608897-104-SE24

Contraparte técnica

Nombre: Paula Carrasco

Cargo: Profesional de Mitigación y Transparencia, División de Cambio Climático, MMA.

E-mail: pcarrascoc@mma.gob.cl

Sr. Luis Cifuentes

Director GreenLab

Dictuc S.A.

Sr. Felipe Bahamondes

Gerente General

Dictuc S.A.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	I
Lista de Tablas	V
Lista de Figuras.....	XI
Acrónimos y Abreviaturas.....	XIII
Resumen Ejecutivo.....	XV
1. Antecedentes y justificación del estudio	1
2. Objetivos del estudio	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos	4
2.3 Alcance del informe	4
3. Caracterización del sector de grandes usuarios de sistemas de frío que usan HFC	6
3.1 Grandes usuarios de HFC en sistemas de refrigeración	7
3.1.1 Sectores excluidos	11
3.1.2 Sectores considerados.....	12
3.2 Propuesta de desagregación de grandes usuarios	14
3.2.1 Caracterización de sectores industriales y comerciales usuarios de HFCs.....	14
3.2.2 Revisión de normativa internacional	30
3.2.3 Propuesta de desagregación de grandes usuarios: criterios seleccionados.....	35
3.3 Entrevistas a actores relevantes	40
4. Diagnóstico de las emisiones de refrigerantes HFC en grandes usuarios	44
4.1 Fuentes emisoras de los grandes usuarios, según sector.....	44
4.1.1 Categoría A: refrigeración industrial fija con predominancia de equipos Tipo III	46
4.1.2 Categoría B: refrigeración industrial fija con predominancia de equipos Tipo II .	63
4.1.3 Categoría C: refrigeración comercial fija con predominancia de equipos Tipo III	64
4.1.4 Categoría D: refrigeración comercial fija con predominancia de equipos Tipo II.	65
4.1.5 Categoría E: climatización comercial fija con predominancia de equipos Tipo III	65
4.1.6 Categoría F: climatización comercial fija con predominancia de equipos Tipo II.	66
4.1.7 Categoría G: climatización industrial fija con predominancia de equipos Tipo I..	67

4.1.8	<i>Categoría H: refrigeración y climatización comercial fija con predominancia de equipos Tipo III</i>	67
4.2	Estimación de inventario de emisiones de HFC de grandes usuarios	74
4.3	Análisis de resultados	76
4.3.1	<i>Fuentes emisoras por categoría</i>	76
4.3.2	<i>Banco de HFCs y recarga por sector</i>	77
4.3.3	<i>Comparación del banco y las emisiones con el INGEI 2022</i>	80
5.	Propuesta, descripción y evaluación de mecanismos y medidas que permitan la reducción de emisiones de HFC en grandes sistemas de refrigeración	83
5.1	Antecedentes normativos y recomendaciones extranjeras sobre regulación de emisiones de HFC	83
5.1.1	<i>Ley de Innovación y Fabricación de Estados Unidos del 2020</i>	84
5.1.2	<i>Reglamento de la Unión Europea N°517/2014 y Reglamento de la Unión Europea (UE) N° 573/2024</i>	89
5.1.3	<i>Regulación Federal de Halocarbonos, 2022, SOR/2022-110 y Regulación sobre Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono y alternativas de Halocarbonos, 2016, SOR/2016-137, Canadá</i>	95
5.1.4	<i>Reglamento para implementar un mecanismo de cuotas de importación para la reducción gradual del uso de Hidrofluorocarbonos (HFC), o sustancias controladas del Anexo F del Protocolo de Montreal y Reforma del artículo 13 del Decreto Ejecutivo N°37614-MINAET, de Costa Rica</i>	98
5.1.5	<i>Comparación entre normativas</i>	101
5.2	Medidas de control y reducción de emisiones	102
5.2.1	<i>Buenas prácticas</i>	103
5.2.2	<i>Recambio de refrigerantes</i>	106
5.3	Mecanismos de monitoreo, reporte, verificación y fiscalización	116
6.	Propuesta de tres escenarios de norma de emisión de HFC para grandes usuarios de sistemas de frío	121
6.1	Instrumentos de gestión ambiental relacionados al control de HFC en sistemas de refrigeración	121
6.1.1	<i>Cuerpos legales existentes</i>	122
6.1.2	<i>Planes sectoriales de mitigación</i>	124
6.1.3	<i>Acuerdos de producción limpia</i>	126
6.1.4	<i>Planes de acción específicos</i>	130

6.2	Escenarios de norma de HFC	131
6.2.1	<i>Identificación los gases de efecto invernadero y forzantes climáticos a normar y descripción de fuentes emisoras</i>	<i>131</i>
6.2.2	<i>Descripción de las fuentes emisoras</i>	<i>132</i>
6.2.3	<i>Límites de emisión.....</i>	<i>135</i>
6.2.4	<i>Otros aspectos sobre el contenido mínimo de la norma</i>	<i>142</i>
7.	Análisis técnico y económico de los escenarios de norma de emisión de HFC de grandes usuarios	144
7.1	Potencial de reducción de emisiones por escenario	144
7.1.1	<i>Simulación de establecimientos.....</i>	<i>144</i>
7.1.2	<i>Clasificación de establecimientos según límites de emisión.....</i>	<i>159</i>
7.2	Análisis de costo por escenario	161
7.2.1	<i>Selección de medidas</i>	<i>162</i>
7.2.2	<i>Resultados de costos por escenario</i>	<i>165</i>
7.3	Identificación y cuantificación de beneficios.....	175
7.4	Análisis comparativo	176
7.5	Análisis de sensibilidad	177
8.	Consideraciones adicionales.....	180
9.	Conclusiones.....	182
10.	Referencias bibliográficas	186
11.	Anexos	189
11.1	Potencial de calentamiento global	189
11.2	Inventarios sectoriales: obtención de banco y recarga por sector	190
11.2.1	<i>Sector hortofrutícola</i>	<i>190</i>
11.2.2	<i>Alimentos congelados</i>	<i>193</i>
11.2.1	<i>Sector vitivinícola</i>	<i>199</i>
11.2.1	<i>Sector lácteo.....</i>	<i>202</i>
11.2.2	<i>Centros de distribución</i>	<i>207</i>
11.2.3	<i>Sector pesquero y acuícola.....</i>	<i>208</i>
11.2.4	<i>Climatización grandes superficies comerciales.....</i>	<i>211</i>
11.2.5	<i>Hospitales y recintos de atención primaria.....</i>	<i>213</i>
11.2.6	<i>Sector minero</i>	<i>214</i>

11.2.7	<i>Supermercados</i>	218
11.2.8	<i>Sector naviero</i>	219
11.3	Recarga estimada en base a la revisión de inventarios sectoriales.....	223
11.4	Detalle de registros para el Reglamento UE 573/2024	224
11.5	Datos oficiales de la CChRyC sobre las personas certificadas	225
11.6	Progresión normativa europea	225
11.7	Otros costos compilados.....	228

Lista de Tablas

Tabla 1-1 Categorías con sus aplicaciones.....	XVI
Tabla 1-2 Costos beneficios	XVII
Tabla 2-1 Alcances del informe.....	5
Tabla 3-1 Clasificación de sistemas de refrigeración y climatización	9
Tabla 3-2 Carga de refrigerante según tipo de vehículo, para climatización de vehículos	12
Tabla 3-3 Carga de refrigerante según la dimensión del vehículo y la temperatura requerida, para transporte refrigerado	12
Tabla 3-4 Grandes usuarios y los principales sistemas y/o procesos que utilizan refrigerantes .	13
Tabla 3-5 Equipos y funciones en el sector hortofrutícola	16
Tabla 3-6 Procesos y etapas en el subsector de frutas y hortalizas congeladas	17
Tabla 3-7 Sistemas y funciones en el sector lácteo	23
Tabla 3-8 Etapas y sus descripciones en el sector vitivinícola	25
Tabla 3-9 Sistemas y funciones en el sector de centros de distribución y logística	26
Tabla 3-10 Objetivos de progresivos de producción y consumo de HFC definidos en la Ley de Innovación y Fabricación de Estados Unidos.....	30
Tabla 3-11 Porcentajes para obtener la cuota máxima de HFC que se puede comercializar por año	33
Tabla 3-12 Cantidad máxima de HFCs en toneladas de CO _{2eq} a partir de la línea base	34
Tabla 3-13 Ejemplo de clasificación de sectores según sector económico, aplicación y sub-aplicación	37
Tabla 3-14 Clasificación por sectores y subsectores	39
Tabla 3-15 Cantidad de entrevistados por sector o servicio	41
Tabla 3-16 Antecedentes destacados recopilados en las entrevistas realizadas	41
Tabla 4-1 Estimaciones para la carga, vida útil y factores de emisión en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado	45
Tabla 4-2 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de refrigeración industrial fija con predominancia de equipos tipo III	46
Tabla 4-3 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de refrigeración industrial fija con predominancia de equipos tipo II	64
Tabla 4-4 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de refrigeración comercial fija con predominancia de equipos tipo III	65
Tabla 4-5 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de refrigeración comercial fija con predominancia de equipos tipo II	65
Tabla 4-6 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de climatización comercial fija con predominancia de equipos tipo III	66
Tabla 4-7 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de climatización comercial fija con predominancia de equipos tipo II	66
Tabla 4-8 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de climatización industrial fija con predominancia de equipos tipo I	67

Tabla 4-9 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de refrigeración y climatización comercial fija con predominancia de equipos tipo III	67
Tabla 4-10 Banco (tonCO ₂ eq) por categoría	75
Tabla 4-11 Recarga anual por categoría	76
Tabla 4-12 Supuestos u observaciones a partir de los inventarios consultados	78
Tabla 4-13 Comparación de banco estimado a partir de inventarios sectoriales e INGEI (ton CO ₂ eq)	81
Tabla 4-14 Comparación de emisiones estimado a partir de inventarios sectoriales e INGEI (ton CO ₂ eq)	82
Tabla 5-1 Calendario de reducción para la producción y consumo de HFC	85
Tabla 5-2 Requisitos de sistemas regulados por sector y fechas	86
Tabla 5-3 Prohibiciones y excepciones de gases fluorados	91
Tabla 5-4 Prohibiciones y excepciones de gases fluorados	91
Tabla 5-5 Calendario de reducción de consumo de HFC en norma canadiense	96
Tabla 5-6 Calendario de reducción de consumo de HFC	100
Tabla 5-7 Comparativa de normas y reglamentos.....	101
Tabla 5-8 Ficha de medidas asociadas a buenas prácticas	103
Tabla 5-9 Costos de medidas de buenas prácticas, por categoría	104
Tabla 5-10 Costos buenas prácticas desagregadas.....	105
Tabla 5-11 Costo y eficiencia medida buenas prácticas	106
Tabla 5-12 Ficha de medidas asociadas al reemplazo de sustancias HFC de alto PCG	106
Tabla 5-13 Sector y categoría a la que aplica el recambio de refrigerante	111
Tabla 5-14 PCG de los refrigerantes considerados en el análisis	113
Tabla 5-15 Eficiencia de captura de refrigerantes alternativos.....	114
Tabla 5-16 Costos por medida recambio de refrigerante e impacto en demanda energética ..	114
Tabla 6-1 Calendario de reducción de volúmenes máximos de importación de sustancias HFC	123
Tabla 6-2 Gases a normar	131
Tabla 6-3 Grandes usuarios y los principales sistemas y/o procesos que utilizan refrigerantes	133
Tabla 6-4 Conversión de las 650 ton CO ₂ eq para cada refrigerante	134
Tabla 6-5 Banco en ton CO ₂ eq por establecimiento de cada categoría	134
Tabla 6-6 Escenarios para el primer año de entrada en vigor de límites de emisión para Categoría A y los estadísticos en que se basan	138
Tabla 6-7 Escenarios para el primer año de entrada en vigor de límites de emisión para Categoría H y los estadísticos en que se basan	139
Tabla 6-8 Rango de tasas de mantención sugeridas para Categorías de la C, D y E en base a IPCC (2006)	140
Tabla 6-9 Escenarios para el primer año de entrada en vigor de límites de emisión para Categoría C	140
Tabla 6-10 Escenarios para el primer año de entrada en vigor de límites de emisión para Categoría D	140

Tabla 6-11 Calendario propuesto de reducción de consumo por categoría para cantidades máximas en escenario intermedio.....	141
Tabla 7-1 Parámetros utilizados para la simulación	146
Tabla 7-2 Estadísticos de la muestra y establecimientos simulados, categoría A.....	147
Tabla 7-3 Estadísticos de la muestra y establecimientos simulados, categoría C.....	149
Tabla 7-4 Estadísticos de la muestra y establecimientos simulados, categoría D.....	150
Tabla 7-5 Regiones representadas en la muestra	152
Tabla 7-6 Universo redistribuido	152
Tabla 7-7 Peso ajustado por región para simulación Categoría H.....	153
Tabla 7-8 Estadísticos de la muestra y establecimientos simulados, Categoría H	159
Tabla 7-9 Establecimientos a los que les aplican los límites de emisión	159
Tabla 7-10 Clasificación inicial de los establecimientos según los límites de emisión propuestos en cada escenario	160
Tabla 7-11 Emisiones de los establecimientos según los límites de emisión propuestos en cada escenario.....	161
Tabla 7-12 Descripción de los espacios asignados a los establecimientos a partir de los límites de emisión de la norma de emisión propuesta	162
Tabla 7-13 Evolución establecimientos por espacio, escenario menos exigente	166
Tabla 7-14 Evolución establecimientos por espacio, escenario intermedio	166
Tabla 7-15 Evolución establecimientos por espacio, escenario más exigente.....	167
Tabla 7-16 Cantidad de establecimiento que seleccionan medidas, escenario menos exigente	167
Tabla 7-17 Cantidad de establecimiento que seleccionan medidas, escenario intermedio	168
Tabla 7-18 Cantidad de establecimiento que seleccionan medidas, escenario más exigente ..	168
Tabla 7-19 Emisiones y reducciones en ktCO ₂ eq., escenario menos exigente	169
Tabla 7-20 Emisiones y reducciones en ktCO ₂ eq., escenario intermedio.....	170
Tabla 7-21 Emisiones y reducciones en ktCO ₂ eq., escenario más exigente	170
Tabla 7-22 Reducciones anuales de emisiones en ktonCO ₂ eq/año, según categorías	171
Tabla 7-23 Oferta y demanda de créditos en ktCO ₂ eq., por categoría y escenario	172
Tabla 7-24 Costos por medidas implementadas, escenario menos exigente en miles de UF ...	173
Tabla 7-25 Costos por medidas implementadas, escenario intermedio en miles de UF	173
Tabla 7-26 Costos por medidas implementadas, escenario más exigente en miles de UF.....	174
Tabla 7-27 Costos norma en miles de UF, según tipo de costo.....	174
Tabla 7-28 Costos beneficios en miles UF	176
Tabla 7-29 Costos efectividad USD/tCO ₂ eq	176
Tabla 7-30 Análisis de sensibilidad de tres niveles para banco de aplicación de límites de emisión, con precio de 10 USD/tonCO ₂ eq del bono de HFC para escenario intermedio	178
Tabla 7-31 Análisis de sensibilidad de tres niveles para precio de bono de HFC, para banco de 650 ton CO ₂ eq. para escenario intermedio	179
Tabla 11-1 PCG de los HFC, según AR4 y AR5	190
Tabla 11-2 Carga instalada por usuario en la muestra entrevistada (kg), sector hortofrutícola	191
Tabla 11-3 Tipos de usuarios según la muestra entrevistada, sector hortofrutícola	191

Tabla 11-4 Consumo promedio por usuario en base a la muestra entrevistada (kg), sector hortofrutícola	191
Tabla 11-5 Número de usuarios en el sector hortofrutícola por tamaño y refrigerante	192
Tabla 11-6 Carga total instalada en el sector hortofrutícola (kg)	192
Tabla 11-7 Recarga anual en la muestra entrevistada (kg/año), sector hortofrutícola	192
Tabla 11-8 Recarga anual extrapolada por refrigerante (kg/año), sector hortofrutícola	193
Tabla 11-9 Universo y muestra consultada, sector alimentos congelados	193
Tabla 11-10 Carga en subsector frutas y hortalizas congeladas para la muestra entrevistada (kg), sector alimentos congelados	194
Tabla 11-11 Recarga en subsector frutas y hortalizas congeladas para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados	194
Tabla 11-12 Carga en subsector frutas y hortalizas congeladas para el universo (kg), sector alimentos congelados	194
Tabla 11-13 Recarga en subsector frutas y hortalizas congeladas para el universo (kg/año), sector alimentos congelados	194
Tabla 11-14 Carga en subsector helados para la muestra entrevistada (kg), sector alimentos congelados	195
Tabla 11-15 Recarga en subsector helados para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados	195
Tabla 11-16 Carga en subsector helados para el universo (kg), sector alimentos congelados..	195
Tabla 11-17 Recarga en subsector helados para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados	195
Tabla 11-18 Carga en subsector faenadoras carnes de cerdo y ave para la muestra entrevistada (kg), sector alimentos congelados	196
Tabla 11-19 Recarga en subsector faenadoras carnes de cerdo y ave para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados	196
Tabla 11-20 Carga en subsector faenadoras carnes de cerdo y ave para el universo (kg), sector alimentos congelados	196
Tabla 11-21 Recarga en subsector faenadoras carnes de cerdo y ave para el universo (kg/año), sector alimentos congelados	196
Tabla 11-22 Carga en subsector faenadoras carnes ovino y bovino para la muestra entrevistada (kg), sector alimentos congelados	197
Tabla 11-23 Recarga en subsector faenadoras carnes ovino y bovino para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados	197
Tabla 11-24 Carga en subsector faenadoras carnes de ovino y bovino para el universo (kg), sector alimentos congelados	197
Tabla 11-25 Recarga en subsector faenadoras carnes de ovino y bovino para el universo (kg/año), sector alimentos congelados	197
Tabla 11-26 Carga en subsector cecinas para la muestra entrevistada (kg), sector alimentos congelados	198
Tabla 11-27 Recarga en subsector cecinas para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados	198

Tabla 11-28 Carga en subsector cecinas para el universo (kg), sector alimentos congelados...	198
Tabla 11-29 Recarga en subsector cecinas para el universo (kg/año), sector alimentos congelados	198
Tabla 11-30 Cantidad de refrigerante en sistemas de refrigeración en la muestra, sector vitivinícola	199
Tabla 11-31 Cantidad de equipos de climatización en la muestra, sector vitivinícola	199
Tabla 11-32 Proyecciones de inventario para el sector vitivinícola, sector vitivinícola	200
Tabla 11-33 Cantidad de refrigerante proyectado a 2021 en sistemas de refrigeración (kg), sector vitivinícola	200
Tabla 11-34 Cantidad de refrigerante proyectado a 2021 en sistemas de climatización (kg), sector vitivinícola	201
Tabla 11-35 Recarga anual proyectada a 2021 en sistemas de climatización (kg/año), sector vitivinícola	201
Tabla 11-36 Banco total proyectado de refrigerantes en el sector vitivinícola al 2021 (kg), sector vitivinícola	201
Tabla 11-37 Cantidad de refrigerante en la ILMa, ILMe y productores primarios dentro de la muestra (kg), sector lácteo	202
Tabla 11-38 Recarga anual en la ILMa, ILMe y productores primarios dentro de la muestra (kg/año), sector lácteo	203
Tabla 11-39 Carga instalada y recarga de R-22 para el universo de los productores primarios según estrato, sector lácteo	203
Tabla 11-40 Carga instalada y recarga de R-404A para el universo de los productores primarios según estrato, sector lácteo	204
Tabla 11-41 Carga instalada y recarga de R-410A para el universo de los productores primarios según estrato, sector lácteo	204
Tabla 11-42 Carga instalada y recarga de R-507A para el universo de los productores primarios según estrato, sector lácteo	204
Tabla 11-43 Carga instalada y recarga de R-22 para el universo de la industria indicado, sector lácteo	205
Tabla 11-44 Carga instalada y recarga de HFC-134a para el universo de la industria indicado, sector lácteo	205
Tabla 11-45 Carga instalada y recarga de R-404A para el universo de la industria indicado, sector lácteo	205
Tabla 11-46 Carga instalada y recarga de R-407C para el universo de la industria indicado, sector lácteo	205
Tabla 11-47 Carga instalada y recarga de R-410A para el universo de la industria indicado, sector lácteo	206
Tabla 11-48 Carga instalada y recarga de R-507A para el universo de la industria indicado, sector lácteo	206
Tabla 11-49 Carga instalada y recarga de R-717 para el universo de la industria indicado, sector lácteo	206
Tabla 11-50 Carga instalada (kg) extrapolada de refrigerante, sector lácteo	207

Tabla 11-51 Recarga anual (kg/año) extrapolada de refrigerante, sector lácteo	207
Tabla 11-52 Cantidad de superficie y refrigerantes por tramos, sector centros de distribución	208
Tabla 11-53 Banco de refrigerante por región en el sector de acuicultura.....	209
Tabla 11-54 Recarga de refrigerante por región en el sector de acuicultura.....	209
Tabla 11-55 Cantidad de refrigerante total a nivel nacional en sector acuicultura	210
Tabla 11-56 Recarga total de refrigerante en el sector de acuicultura	210
Tabla 11-57 Cantidad de refrigerante en el subsector hotelero a los años 2019-2020 (kg), sector climatización grandes superficies comerciales	211
Tabla 11-58 Cantidad de refrigerante en el subsector aeropuertos al 2019 (kg), sector climatización grandes superficies comerciales	212
Tabla 11-59 Banco de refrigerante subsector strip center, centros comerciales y malls (kg), sector climatización grandes superficies comerciales.....	212
Tabla 11-60 Distribución por refrigerantes, sector hospitales	213
Tabla 11-61 Cantidad de refrigerante por superficie de atención primaria al 2013 (kg), sector hospitales	214
Tabla 11-62 Cantidad de refrigerante por superficie de recintos de salud hospitalario al 2018 (kg), sector hospitales	214
Tabla 11-63 Cantidad de refrigerantes en el subsector de climatización de cabinas de maquinaria, sector minería	215
Tabla 11-64 Recarga de refrigerantes en el subsector de climatización de cabinas de maquinaria, sector minería	216
Tabla 11-65 Recarga de refrigerantes en el subsector de climatización en espacios habitables, sector minería	217
Tabla 11-66 Carga de refrigerantes en el subsector de climatización en salas eléctricas.....	217
Tabla 11-67 Participación de cada refrigerante en el banco, sector supermercados	218
Tabla 11-68 Banco de refrigerantes, sector supermercados.....	219
Tabla 11-69 Alternativas de cantidad de refrigerante en cada unidad naval	220
Tabla 11-70 Cantidad total de refrigerante en Unidades Navales (kg), subsector armada	220
Tabla 11-71 Cantidad de refrigerantes en pesca de altamar al 2019 (kg), subsector pesca de altamar	221
Tabla 11-72 Cantidad de refrigerantes en barcos factoría al 2019 (kg), subsector barcos factoría	222
Tabla 11-73 Cantidad de refrigerantes en marina mercante al 2019 (kg), subsector marina mercante.....	222
Tabla 11-74 Recarga estimada en base a inventarios sectoriales (kg HFC), tasa de fuga y equivalencia en toneladas de CO ₂ eq (AR4).....	223
Tabla 11-75 Resumen sobre datos oficiales de personas certificadas	225
Tabla 11-76 Comparativa de propuesta de consumo para normas internacionales y la Enmienda de Kigali a nivel nacional.....	228
Tabla 11-77 Costos de fiscalización	228
Tabla 11-78 Costos de regenerar.....	229

Tabla 11-79 Costos de mantenciones preventivas y correctivas.....	229
---	-----

Lista de Figuras

Figura 3-1 Aplicaciones y sub-aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado	10
Figura 3-2 Árbol de clasificación de grandes usuarios según criterios propuestos.....	38
Figura 4-1 Histograma de banco (ton CO ₂ eq) establecimientos Categoría A por sector	48
Figura 4-2 Histograma de tasa de mantención establecimientos Categoría A por sector	49
Figura 4-3 Histograma de tasa de mantención establecimientos Categoría A por refrigerante .	50
Figura 4-4 Tasa de mantención según banco para establecimientos categoría A	51
Figura 4-5 Histograma del banco (kg) por establecimientos del sector alimentos congelados...	52
Figura 4-6 Histograma del banco de refrigerante (kg) en establecimientos del subsector hortofrutícola	53
Figura 4-7 Banco de refrigerante respecto al número de establecimientos del subsector acuícola	54
Figura 4-8 Banco de refrigerante en CO ₂ eq. respecto al número de establecimientos del subsector alimentos congelados	55
Figura 4-9 Banco de refrigerante en CO ₂ eq. respecto al número de establecimientos del subsector hortofrutícola	56
Figura 4-10 Banco de refrigerante en CO ₂ eq. respecto al número de establecimientos del subsector acuícola	57
Figura 4-11 Histograma tasas de mantención por establecimientos del sector de alimentos congelados	58
Figura 4-12 Histograma tasas de mantención por establecimientos del sector hortofrutícola ..	59
Figura 4-13 Histograma tasas de mantención por establecimientos del sector acuícola	60
Figura 4-14 Tasas de mantención según banco sector alimentos congelados	61
Figura 4-15 Tasas de mantención según banco sector hortofrutícola	61
Figura 4-16 Tasas de mantención según banco sector acuícola.....	62
Figura 4-17 Box-plot de las tasas de mantención de la Categoría A, con n =78.....	63
Figura 4-18 Banco de supermercado respecto al número de supermercados según ATS.....	68
Figura 4-19 Banco de supermercado respecto al número de supermercados según Dictuc-GreenLab.....	69
Figura 4-20 Tasa de recarga respecto al número de supermercados según ATS.....	70
Figura 4-21 Tasa de recarga respecto al número de supermercados según Dictuc-GreenLab....	71
Figura 4-22 Tasa de recarga respecto al banco según ATS.....	72
Figura 4-23 Tasa de recarga respecto al banco según Dictuc-GreenLab.....	73
Figura 4-24 Box-plot de tasas de mantención para la Categoría H (ATS y GreenLab-Dictuc), con n = 89.....	74
Figura 4-25 Banco (ton CO ₂ eq) por categoría	75
Figura 4-26 Recarga anual (ton CO ₂ eq/año) por categoría.....	76

Figura 5-1 Árbol explicativo de los registros para usuarios de gases refrigerantes del Reglamento 573/2024.....	94
Figura 5-2 Diagrama conceptual interacción entre establecimientos, personas técnicas y SMA	120
Figura 6-1 Árbol de decisiones para límites de emisión.....	137
Figura 7-1 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría A.....	147
Figura 7-2 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantención, Categoría A.....	147
Figura 7-3 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría C.....	148
Figura 7-4 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantención, Categoría C.....	148
Figura 7-5 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría D.....	149
Figura 7-6 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantención, Categoría D.....	150
Figura 7-7 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría H, región Metropolitana.....	153
Figura 7-8 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantención, Categoría H, región Metropolitana.....	154
Figura 7-9 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría H, región de Valparaíso	154
Figura 7-10 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantención, Categoría H, región de Valparaíso	155
Figura 7-11 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría H, región de La Araucanía.....	155
Figura 7-12 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantención, Categoría H, región de La Araucanía.....	156
Figura 7-13 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría H, región de Los Lagos.....	156
Figura 7-14 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantención, Categoría H, región de Los Lagos.....	157
Figura 7-15 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría H, región de Los Ríos	157
Figura 7-16 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantención, Categoría H, región de Los Ríos	158
Figura 7-17 Espacios definidos según los límites de emisión propuestos.....	160
Figura 7-18 Diagrama de flujo de selección de medidas.....	164
Figura 11-1 Distribución de empresas mineras o de servicios a la minería por carga agregada en equipamiento minero (kg de HFC 134a).....	216

Acrónimos y Abreviaturas

Instituciones

MMA:	Ministerio del Medio Ambiente
OCDE:	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
USEPA:	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

Programas y Estudios

PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PNUD:	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

Países

EE.UU.:	Estados Unidos de América
UE:	Unión Europea

Monedas

CLP:	Pesos de Chile
USD:	Dólares de Estados Unidos
MUSD:	Millones de dólares de Estados Unidos

Abreviaturas

HFC:	Hidrofluorocarbonos
HCFC:	Hidroclorofluorocarbonos
HFO:	Hidrofluoroolefinas

Prefijos

T:	Tera (10^{12})
G:	Giga (10^9)
M:	Mega (10^6)
K:	Kilo (10^3)
m:	Mili (10^{-3})
μ :	Micro (10^{-6})
n:	Nano (10^{-9})

Unidades Básicas

A: Ampere (Corriente eléctrica)

m: Metro (Longitud)

Kg: Kilogramo (Masa)

S: Segundo (Tiempo)

°C: Celsius (Temperatura)

Unidades Derivadas

m²: Metro cuadrado m² (Superficie o área)

m³: Metro cúbico (Volumen)

W: Watt (Potencia)

Formato

"," separador decimal

"." separador de miles

Resumen Ejecutivo

En la última década, las emisiones de hidrofluorocarbonos (HFC) en Chile han experimentado un alarmante crecimiento, triplicándose hasta alcanzar niveles significativos. Para 2022, estas emisiones representaron más del 5% del total del inventario de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del país, consolidándose como un factor crítico dentro de las contribuciones nacionales al cambio climático. Este incremento sostenido en las emisiones se relaciona principalmente con sectores clave de la economía. Aproximadamente la mitad de las emisiones de HFC provienen de la refrigeración industrial, mientras que otras aplicaciones, como la refrigeración comercial, la climatización fija en edificios y la climatización en vehículos, contribuyen con alrededor del 15% cada una al total nacional.

Estos gases destacan no solo por su considerable potencial de calentamiento global (PCG), que en algunos casos es miles de veces superior al del dióxido de carbono (CO₂), sino también por su vida media relativamente corta en la atmósfera. Esta característica los clasifica como forzantes climáticos de vida corta, lo que significa que, aunque no permanecen en la atmósfera tanto tiempo como otros GEI, sus efectos sobre el calentamiento global son intensos durante su vida activa. Por esta razón, reducir y evitar la liberación de HFC se ha convertido en una prioridad urgente para mitigar el aumento de las temperaturas globales en el mediano plazo.

La importancia de abordar las emisiones de HFC radica en que su control puede generar beneficios climáticos significativos en un periodo relativamente corto. A diferencia de otros gases de efecto invernadero de vida larga, como el CO₂ o el metano, los HFC ofrecen una oportunidad única: al reducir sus emisiones, es posible observar resultados casi inmediatos en la desaceleración del calentamiento atmosférico. Este aspecto los convierte en un blanco prioritario dentro de las políticas públicas de mitigación climática y en un elemento central de los compromisos internacionales de Chile, como la implementación de la Enmienda de Kigali y las metas del Acuerdo de París.

Este informe, en el marco de una consultoría para el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), presenta una propuesta integral para la regulación de emisiones de HFC en sistemas de refrigeración y climatización en Chile, alineada con el Protocolo de Montreal y la Enmienda de Kigali. La normativa propuesta establece límites de emisión de HFC por establecimiento, basados en el tamaño del banco de refrigerantes y su tasa de fuga, con una reducción progresiva del consumo hasta 2045. En cuanto al alcance de la norma propuesta, se prioriza la inclusión de grandes usuarios de sectores industriales clave, debido a su contribución al total de emisiones y con el objetivo de facilitar el monitoreo y fiscalización con un foco costo-efectividad, proponiendo además medidas preventivas para minimizar las fugas de refrigerantes, tales como el mantenimiento adecuado y la detección de fugas.

La propuesta establece que todas las categorías deberán registrar sus equipos y sistemas de frío en un periodo de adecuación de la norma, pero solo aquellos establecimientos que superen las 650 toneladas de CO₂ equivalente, definido a partir del PCG del HFC-134a de 1.300 y una carga refrigerante de 500 kg, estarán sujetos a los límites de emisión establecidos. Esto implica que la aplicación de límites de emisión se enfocará en aquellos por encima del umbral de 650 toneladas de CO₂ equivalente, de acuerdo con los plazos de adecuación progresiva hasta el 2045.

El informe categoriza los establecimientos en ocho grupos (A a H) según sus características operativas, tipo de equipos y carga refrigerante, presentes en la Tabla 1-1. Las categorías A (refrigeración industrial) y H (supermercados) se destacan por representar la mayor proporción del uso de HFC, tanto en términos del tamaño del banco como de las emisiones asociadas. No obstante, se evidencia que dentro de estas mismas categorías existe una variedad entre los establecimientos, por ejemplo, se puede observar una relación inversa entre el tamaño del banco de refrigerantes y la tasa de mantenimiento, lo que se analiza en detalle a través de simulaciones. Por otro lado, las categorías B a G, con menos datos disponibles, se consideran para un período piloto de reporte.

Tabla 1-1 Categorías con sus aplicaciones

Categoría	Aplicación	Sector y Subsector de la Industria	Equipo
A	Refrigeración industrial fija	Hortofrutícola, frutas y hortalizas congeladas	Tipo III
		Láctea mayor y menor	
		Carne, cecinas y faenadoras	
		Vitivinícola	
		Bodegas receptoras de la pesca de altamar	
		Salas eléctricas de la minería	
		Procesamiento del sector acuícola pesquero	
		Producción de helados	
B	Refrigeración industrial fija	Productores primarios del sector lácteo	Tipo II
C	Refrigeración comercial fija	Centro de distribución Tramo 3	Tipo III
		Centro de distribución Tramo 4	
D	Refrigeración comercial fija	Centro de distribución Tramo 2	Tipo II
		Centro de distribución Tramo 1	
E	Climatización comercial fija	Recintos de salud hospitalarios	Tipo III
		Malls	
		Aeropuertos	
F	Climatización comercial fija	Hoteles	Tipo II
		Recintos de salud de atención primaria	
G	Climatización industrial fija	Espacios habitables minería cobre	Tipo I
H	Refrigeración y climatización comercial fija	Supermercados	Tipo III

Fuente: Elaboración propia

Se identificaron varios mecanismos para reducir las emisiones de HFC, los cuales incluyen la sustitución de refrigerantes con alto PCG por alternativas más limpias, como el HFC-152a, HFO-1234yf, hidrocarburos, amoníaco y CO₂ transcrito, todos con bajo o nulo PCG. También se proponen la implementación de buenas prácticas operativas y la mejora de la eficiencia

energética. Además, la normativa contempla incentivos para promover el uso de refrigerantes reciclados o regenerados, fomentando la economía circular dentro del sector.

En cuanto a las fiscalizaciones, se plantea que estas sean realizadas por técnicos certificados y personal de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), especialmente en casos de fugas de refrigerantes o en establecimientos con historial de no cumplimiento. El monitoreo y la verificación periódica de las emisiones serán clave para asegurar el cumplimiento de los límites de emisión y la correcta implementación de la normativa. Además, se recomienda la implementación gradual de la normativa, con evaluaciones periódicas que permitan ajustar las estrategias de reducción de emisiones y maximizar los beneficios para todos los sectores involucrados.

Para evaluar las medidas de reducción de emisiones, se realizaron diferentes simulaciones en Python, utilizando la distribución de la muestra disponible hasta alcanzar el número total de establecimientos a nivel nacional. En el software Analytica se modelaron los comportamientos de los establecimientos, observando sus emisiones y calculando los costos y beneficios de las medidas de reducción propuestas. A través de estas herramientas, se modelaron tres escenarios normativos, los cuales se diferencian principalmente por el grado de ambición, expresado en los distintos niveles de exigencia propuestos.

El análisis de costos y beneficios, que se resume en la Tabla 1-2, muestra que el escenario más exigente, aunque implican mayores costos, son más efectivos y rentables. Los costos totales van de 1.490 mil UF en el escenario menos exigente a 1.607 mil UF en el más exigente, mientras que los beneficios aumentan de 10.778 mil UF a 14.870 mil UF. La razón beneficio-costo mejora con el nivel de exigencia, pasando de 7,2 a 9,3, indicando mayor eficiencia económica. Además, la costo-efectividad disminuye ligeramente de 13,0 USD/ton a 12,5 USD/ton en los escenarios más estrictos, mostrando que mitigan más emisiones manteniendo costos eficientes. Lo anterior implica que, aunque existen costos iniciales asociados con la implementación de las nuevas tecnologías y medidas de control, estos son compensados por los ahorros a largo plazo generados por la mejora en la eficiencia energética y la reducción de fugas.

Tabla 1-2 Costos beneficios

Escenarios	Escenario menos exigente	Escenario intermedio	Escenario más exigente
Costo total (miles UF)	1.490	1.389	1.607
Beneficio directo por precio social del carbono (miles UF)	10.778	12.094	14.870
Diferencia beneficio – costo (miles UF)	9.288	10.704	13.263
Razón beneficio - costo	7,2	8,7	9,3
Costo efectividad (USD/ton CO₂eq)	13,0	12,5	12,5

Fuente: Elaboración propia

Dentro del análisis de sensibilidad realizado, se evaluaron diversos factores que podrían afectar la efectividad de la normativa. Se observó que el tamaño del banco de refrigerantes y el precio del bono de HFC tienen un impacto considerable sobre la relación beneficio-costos de las medidas propuestas. Específicamente, el tamaño del banco se asoció a un menor costo total a medida que el volumen de refrigerantes aumenta, aunque el beneficio directo también disminuye en escenarios de mayor tamaño. En cuanto al precio del bono de HFC, a precios más bajos, la relación beneficio-costos fue más favorable, lo que sugiere que un ajuste adecuado en los precios podría optimizar los beneficios.

Estas sensibilidades sugieren que el diseño de la normativa debe ser flexible y considerar diversos escenarios económicos y operacionales. En cuanto al escenario a seguir, el más adecuado sería el escenario intermedio, ya que ofrece un balance entre costos y beneficios. Este escenario permite una transición gradual y alcanzable hacia los objetivos de reducción de emisiones, sin generar una carga excesiva para los usuarios, lo cual facilitaría su aceptación y cumplimiento.

Es importante señalar que el análisis realizado se basa en una muestra limitada de datos y que las proyecciones podrían no reflejar completamente las variabilidades del mercado y las tecnologías futuras. Las simulaciones realizadas en Python y Analytica, aunque representativas, dependen de los supuestos establecidos y pueden necesitar ajustes conforme se disponga de más datos sobre el comportamiento de los establecimientos y la evolución del mercado de refrigerantes. Además, algunas categorías de usuarios, como las de menor tamaño de banco, presentan una falta de datos detallados, lo que limita la capacidad de realizar proyecciones precisas para todos los sectores.

Finalmente, el informe concluye con una recomendación para la implementación progresiva de la normativa, considerando los resultados de las simulaciones y la evaluación de los costos y beneficios, con el objetivo de lograr una reducción efectiva de las emisiones de HFC, optimizando los recursos energéticos y contribuyendo al cumplimiento de los compromisos medioambientales de Chile.

1. Antecedentes y justificación del estudio

El Protocolo de Montreal sobre Sustancias que Agotan la Capa de Ozono y sus enmiendas, es un acuerdo multilateral medioambiental para proteger la capa de ozono de la tierra, que entró en vigor en 1989, eliminando el consumo y la producción de sustancias químicas que agotan la capa de ozono y contribuyen al cambio climático. Para su implementación, contiene medidas de control, calendarios de reducción y eliminación del consumo y producción, cálculo de los niveles de control, control del comercio con países que no son Parte, situación especial de los países en desarrollo, asistencia técnica, entre otros.

En octubre de 2016 se aprobó la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, para la eliminación progresiva de los hidrofluorocarbonos (HFC) que evitaría un aumento de la temperatura global de hasta 0,5 °C. Esta enmienda se alinea con los objetivos de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático y sus instrumentos nacionales asociados, como la Contribución Nacional Determinada NDC y la Estrategia Climática de Largo Plazo ECLP, de modo tal que éstas se refieren al control de las emisiones de HFC y la Enmienda de Kigali controla el consumo de HFC, entendiéndose como tal a la operación matemática: consumo = importaciones + producción - exportaciones, donde la producción en Chile es nula.

El calendario de reducción de HFC para los países en desarrollo, como Chile, establece una línea base de consumo en los años 2020 a 2022 y congelamiento del consumo de HFC a ese nivel, a partir del 01 de enero de 2024. Luego, la reducción del 10% del consumo a partir del 01 de enero de 2029, del 30% a partir del 01 de enero de 2035, del 50% a partir del 01 de enero de 2040, llegando a un 80% de reducción a partir del 01 de enero de 2045.

Chile es uno de los 198 países que ha ratificado el Protocolo de Montreal y todas sus enmiendas, y es uno de los 160¹ que han ratificado la Enmienda de Kigali. El Ministerio del Medio Ambiente (MMA), a través de su Unidad Ozono de la División de Cambio Climático, actúa como Punto Focal del Protocolo de Montreal, bajo el alero del artículo 70 letra d) de la Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, que establece como atribución del MMA el "velar por el cumplimiento de las convenciones internacionales, en que Chile sea parte en materia ambiental, y ejercer la calidad de contraparte administrativa, científica o técnica de tales convenciones, sin perjuicio de las facultades del Ministerio de Relaciones Exteriores".

Para la implementación nacional del Protocolo de Montreal, el país cuenta con la Ley Ozono N° 20.096/2006, que establece mecanismos de control aplicables a las sustancias agotadoras de la capa de ozono. El marco regulatorio de las sustancias controladas por el Protocolo de Montreal existente en Chile considera a los HFC como sustancias controladas. El Decreto Supremo N°03/2019 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, actualmente en proceso de modificación, establece normas aplicables a las importaciones y exportaciones de sustancias

¹ Actualizado al 01 de julio, 2024 desde <https://ozone.unep.org/all-ratifications>

controladas por el Protocolo de Montreal, y entrega atribuciones al Servicio Nacional de Aduanas para que implemente un mecanismo de distribución y administración de volúmenes máximos de importación de HFC.

Los HFC, son utilizados como:

- (80%) refrigerantes, en sistemas de refrigeración, aire acondicionado y en bombas de calor, en los sectores residencial, industrial y comercial;
- (15%) agentes espumantes, en espumas de aislación térmica;
- (5%) agentes de extinción de fuego, solventes en procesos industriales y en aplicaciones específicas, y como aerosoles.

De acuerdo a las estadísticas de año 2022, los principales HFC importados como sustancias puras son el HFC-134a (31,4%) y el HFC-227ea (1,4%), y como mezclas, lo son el R-507A (36,6%), R-410A (16,2%) y el R-404A (11,3%).

Entre 2022 y 2023 se elaboraron inventarios sobre usos de HFC a nivel sectorial y subsectorial, como parte de los antecedentes en la Preparación del Plan de Implementación de Kigali (en adelante "KIP", por las siglas en inglés de *Kigali Implementation Plan*). Este Plan, contiene la descripción de los usos de HFC en el país, las alternativas disponibles y las propuestas de proyectos, asistencia técnica, normativa y de difusión para reducir el uso de los HFC entre el 2024 y el 2045. En diciembre de 2023, el Comité Ejecutivo del Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal, aprobó el financiamiento de la Etapa 1 del Plan, para ejecutarse en el periodo 2024-2030.

Para el cumplimiento de esta Enmienda, además es necesario reducir las emisiones o fugas de refrigerantes de tipo HFC durante las etapas de instalación, mantención y operación de los sistemas de frío. Estas fugas pueden alcanzar niveles significativos, llegando a requerir recargas de 50% o más al año, con un alto costo para la empresa, en insumos y en energía eléctrica, debido a que los sistemas de refrigeración funcionan en condiciones no adecuadas para las que están diseñados. Como resultado, estas emisiones de gases refrigerantes contribuyen al cambio climático, por lo que su reducción y control permitirán obtener beneficios ambientales y económicos, además de contribuir al cumplimiento de Chile a los compromisos asumidos ante el Protocolo de Montreal y su Enmienda de Kigali, y ante los instrumentos de la Ley Marco de Cambio Climático, como la Contribución Nacional Determinada (NDC) y la Estrategia Climática de largo plazo (ECLP), así como en la reducción de la Huella de carbono del sector usuario de refrigerantes.

La Ley Marco de Cambio Climático (Ley N° 21.455/2022, MMA), establece en su artículo 44, sobre la protección de la capa de ozono y gestión del cambio climático, que "las acciones establecidas en el marco del Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono, el Protocolo de Montreal (...) y sus respectivas enmiendas y ajustes contribuyen al cumplimiento de los compromisos internacionales adquiridos por el Estado de Chile en materia de cambio climático" y que con "el objeto de apoyar la implementación de la Enmienda de Kigali al Protocolo de

Montreal, los instrumentos de gestión del cambio climático deberán considerar especialmente medidas que contribuyan al control de los gases de efecto invernadero previstas en la Ley N° 20.096, que establece mecanismos de control aplicables a las sustancias agotadoras de la capa de ozono".

Asimismo, en su artículo 14, la Ley Marco establece que "el Ministerio del Medio Ambiente elaborará normas que establecerán la cantidad máxima de un gas de efecto invernadero y/o un forzante climático de vida corta que podría emitir un establecimiento fuente emisora o agrupación de éstas, en función de un estándar de emisiones de referencia por tecnología, sector y/o actividad, con el objeto de cumplir los objetivos de la Estrategia Climática de Largo Plazo y la Contribución Determinada a Nivel Nacional".

En virtud de que los HFC son potentes gases de efecto invernadero, contemplados en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y en la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, la presente consultoría requiere elaborar un diagnóstico de emisiones de HFC en grandes sistemas de frío, que permitan elaborar una propuesta de norma de control de emisiones de HFC, considerando lo establecido en el artículo 14 de la Ley 21.455/2022 del MMA, incluyendo un análisis técnico y económico de dicha propuesta.

2. Objetivos del estudio

2.1 Objetivo general

El objetivo de la consultoría es proveer insumos técnicos y económicos que permitan crear una norma de emisiones de hidrofluorocarbonos (HFC) desde grandes sistemas de frío, incluyendo una caracterización de medidas factibles de reducción de emisiones de HFC y un análisis técnico económico de la propuesta, conforme a lo establecido en el artículo 14° de la Ley N° 21.455/2022 y en cumplimiento a los compromisos de Chile ante la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal y la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático.

2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

- a) Caracterizar el sector de grandes usuarios de sistemas de frío que utilicen refrigerantes de tipo HFC, estableciendo los HFC posibles de normar y sus fuentes emisoras.
- b) Elaborar un diagnóstico de las emisiones de refrigerantes de tipo HFC en grandes usuarios de sistemas de refrigeración en Chile.
- c) Proponer, describir y evaluar mecanismos y medidas que permitan la reducción de emisiones de HFC en grandes sistemas de refrigeración.
- d) Generar propuesta de tres escenarios de norma de emisión de HFC para los grandes usuarios de sistemas de frío identificados, considerando los contenidos mínimos de una Norma de GEI especificados en el artículo 14 de la Ley 21.455/2022, y en la propuesta de reglamento asociada² si existiera, considerando los criterios establecidos en la misma para su determinación, los que incluyen costo-efectividad, equidad, responsabilidad e impactos sociales, ambientales y económicos.
- e) Elaborar análisis técnico y económico de los escenarios de norma de emisión de los HFC para los grandes usuarios de sistemas de frío.

2.3 Alcance del informe

El presente informe contiene el desarrollo de todas las actividades asociadas al cumplimiento de todos los objetivos específicos y actividades del estudio. En la Tabla 2-1 se muestra específicamente la sección por actividad.

² Se considerará como base el documento publicado para Consulta Pública (<https://consultaciudadanas.mma.gob.cl/portal/consulta/155>) o la versión más actualizada que existiese.

Tabla 2-1 Alcances del informe

Objetivo específico	Actividad	Sección
a	a.1.	3.1
	a.2.	3.2
	a.3.	3.3
b	b.1.	4.1
	b.2.	4.2
	b.3.	4.3
	b.4.	Anexos Digitales
c	c.1	5.1
	c.2	5.2
	c.3	5.3
d	d.1.	6.1
	d.2.	6.2
	d.3.	6.2
e	e.1	7.1
	e.2	7.2
	e.3	7.3
	e.4	7.4

Fuente: Elaboración propia

3. Caracterización del sector de grandes usuarios de sistemas de frío que usan HFC

Los hidrofluorocarbonos (HFCs) son un grupo de sustancias que se usan principalmente en refrigeración y climatización, aunque también son usados como solventes, agentes extintores e incluso como propelentes en inhaladores. Estas sustancias son gases de efecto invernadero (GEI) de vida corta, con potenciales de calentamiento global de 100 años (PCG-100) del orden de cientos a miles de toneladas de dióxido de carbono equivalente (ton CO_{2eq}). Por ende, a pesar de que la tasa de emisión de estos gases pueda ser baja en relación con otros GEI, el impacto de una tonelada sería equivalente a entre cien y mil veces el impacto de una tonelada de CO₂. Dado lo anterior, es importante poder cuantificar y regular estas sustancias.

En Chile, se ha detectado que los HFCs ingresan al país de dos formas: importados directamente en contenedores conocidos como bombonas, en su forma pura o como mezcla, e indirectamente dentro de los equipos que utilizan estas sustancias. Típicamente, los sistemas que ingresan cargados son aires acondicionados compactos y sistemas cerrados de refrigeración como refrigeradores domésticos y comerciales

Además, en el país se han identificado distintos sectores industriales, comerciales, de transporte y residenciales que utilizan estas sustancias como refrigerantes. Sin embargo, difieren significativamente en la carga de refrigerante que usan los equipos y la intensidad del uso que se les da. Por ende, se hace necesario poder clasificar a los usuarios de HFCs de forma que sea posible priorizar la regulación de estas sustancias. En específico, este estudio se enfoca en los usuarios industriales, comerciales y de transporte, mientras que los usuarios residenciales, que usan HFCs en refrigeradores y equipos de aire acondicionado doméstico, son excluidos del estudio.

En este sentido, la Norma Chilena 3241 del 2017 (NCh 3241:2017), de Sistemas de refrigeración y climatización – Buenas prácticas para el diseño, armado, instalación y mantención, que aplica a estos equipos para ser armados e instalados en su lugar de emplazamiento y en cumplimiento de sus requisitos y condiciones específicas, ofrece las definiciones y bases necesarias para clasificar los distintos sistemas de frío y poder agruparlos según distintos criterios que son relevantes de identificar en sistemas como estos.

Un primer aspecto que considerar sobre las definiciones que ofrece la NCh 3241:2017, es que, si bien no define sistemas de frío, sí define **sistemas de refrigeración y climatización**, que luego denomina simplemente “sistemas”, y los define como un “conjunto de componentes interconectados con tuberías, los que contienen refrigerante y constituyen un circuito frigorífico cerrado”. Para efectos de este estudio, se entenderá que la denominación de sistemas de frío es equivalente a sistemas de refrigeración y climatización.

En cuanto a los criterios relevantes a considerar en un sistema de frío, en primer lugar, se tiene el concepto de carga de refrigerante, que la Norma define como la “cantidad de refrigerante especificada en la placa o información técnica del sistema de refrigeración” e indica que “para los aparatos cargados en su lugar de emplazamiento corresponde a la cantidad de refrigerante correcta para un funcionamiento adecuado”. La carga del equipo, así como la sumatoria de las cargas de los equipos que posee un usuario, permite clasificarlos según tamaño. Se profundizará en esto en la siguiente sección.

Otra de las categorías relevantes a considerar es la naturaleza de la fuente de emisión, es decir, si es una fuente fija o móvil. En general, las fuentes fijas están asociadas a establecimientos comerciales o industriales, mientras que las móviles a transporte. Cabe mencionar que la NCh 3241:2017 define como emisión de refrigerante a “la liberación de refrigerante a la atmósfera, producto de una fuga o rotura del sistema, una incorrecta manipulación en un proceso de mantención e incluso la liberación intencional”.

En resumen, esta Norma ofrece las definiciones esenciales y permite clasificar a los usuarios según los aspectos importantes de un sistema o conjunto de sistemas. En la sección a continuación, se profundiza en las definiciones asociadas a usuarios, que permitirán identificar a los grandes usuarios de sistemas de frío.

3.1 Grandes usuarios de HFC en sistemas de refrigeración

En cuanto a los usuarios de sistemas de frío, la NCh3241 ofrece dos definiciones importantes: titulares de sistemas y usuarios finales; un **titular** es definido como “persona natural o jurídica, propietaria o usuaria de un sistema”, mientras los **usuarios finales** son definidos como “titulares de sistemas, con distintas características constructivas, aplicaciones y utilizados en distintas instancias”.

En la Norma, para clasificar a los usuarios finales se considera la **sumatoria total de refrigerantes en kilogramos (kg), contenidos en la totalidad de los distintos sistemas (refrigeración y climatización), pertenecientes a un RUT**, independiente del lugar donde se encuentren emplazados. De este modo, se definen tres clasificaciones:

- Usuario pequeño: corresponde a aquel usuario final titular de sistemas que contengan una cantidad menor o igual a 100 kg.
- Usuario mediano: usuario final titular de sistemas que contengan una cantidad mayor a 100 kg y menor o igual a 500 kg.
- Usuario grande: usuario final titular de sistemas que contengan una cantidad mayor a 500 kg.

De forma paralela, la Norma clasifica los sistemas de refrigeración y climatización –a los que aplica la norma– según el tipo y cantidad de refrigerante contenido, como se describe a continuación:

- Tipo I: sistemas cargados con una cantidad igual o menor a 2 kg de refrigerante sintético de alta presión, clasificado como A1.
- Tipo II: sistemas cargados con una cantidad mayor a 2 kg y menor o igual a 40 kg de refrigerante sintético de alta presión, clasificado como A1.
- Tipo III: sistemas cargados con una cantidad mayor a 40 kg de refrigerante sintético de alta presión clasificada como A1.

Además, en la norma se indican las definiciones de refrigerante sintético, de alta presión y clasificado como A1:

- Refrigerante sintético: refrigerante fabricado con base en diversos compuestos químicos, que no se encuentran en la naturaleza (por ejemplo, CFC-, HCFC-, HFC, etc.).
- Refrigerante de alta presión: refrigerante con una temperatura de ebullición mayor o igual que -55°C y menor que -10°C, a 101,3 kPa.
- Refrigerante clasificado como A1: refrigerante que no propaga la llama (de un solo compuesto o una mezcla de refrigerantes en la formulación en el peor de los casos de la mezcla –WCF– y la formulación fraccionada en el peor de los casos –WCFF–, que no presentan propagación de llama, cuando se ensayan en aire a 60°C y 101,3 kPa) y de baja toxicidad (que con una concentración promedio ponderada en el tiempo de 400 ppm o mayor, que no generan algún efecto adverso, en casi todos los trabajadores, expuestos repetidamente a jornadas laborales de 8 h/día, 40 h/semanales).

Adicionalmente, la NCh 3241:2017 también realiza una clasificación de los sistemas y equipos de refrigeración y climatización según su aplicación y sub-aplicación. En la Tabla 3-1 se muestra esta clasificación con su respectiva descripción.

Tabla 3-1 Clasificación de sistemas de refrigeración y climatización

Aplicación	Clasificación	Categoría	Descripción
Refrigeración	Sistemas fijos	Doméstica	Utilizados generalmente en domicilios particulares, principalmente para mantener productos alimenticios frescos y/o congelados. Esta categoría incluye principalmente los refrigeradores domésticos.
		Comercial	Utilizados en actividades comerciales de diferentes rubros, tales como: restaurantes, hoteles, supermercados, almacenes, minimarket, entre otros, principalmente para mantener y/o elaborar productos alimenticios, frescos y congelados. Esta categoría incluye sistemas como: vitrinas, botelleros, máquinas de hielo, fabricadoras de helado, cámaras frigoríficas, centrales de compresores en paralelo, entre otros.
		Industrial	Utilizados en procesos productivos de diferentes rubros, tales como: alimentos preparados, industrias químicas, agroindustrias, vinícolas, pesqueras, procesadoras de carnes y/o aves, entre otras. Estos sistemas son utilizados directamente en el proceso productivo, en la conservación del producto final y de la materia prima, a diferentes temperaturas según requerimiento. Esta categoría incluye sistemas como: túneles de enfriamiento, túneles de congelación, enfriadores de líquidos, entre otros. Únicamente para efectos de clasificación, esta categoría incluye a sistemas que utilizan R-717 (amoníaco) como refrigerante, en cualquiera de sus posibles configuraciones y aplicaciones.
	Sistemas móviles	Transporte	Utilizados para conservar la cadena de frío en distintos productos, de acuerdo con necesidades específicas (fresco y/o congelados). Estos sistemas son incorporados a variados medios de transportes (terrestres, marítimos y aéreos).
Climatización	Sistemas fijos	Doméstica	Utilizados en domicilios particulares, proporcionando condiciones ambientales para el bienestar humano. Esta categoría incluye sistemas de aire acondicionado del tipo ventana, divididos (de pared), portátiles, entre otros.
		Comercial	Utilizados en centros comerciales, salas de ventas, salas de atención al público, instituciones financieras, oficinas públicas y privadas, proporcionando condiciones ambientales para el bienestar humano. Esta categoría incluye sistemas de aire acondicionado del tipo divididos (en cualquiera de sus configuraciones), enfriadores de agua (<i>chiller</i>) y sus unidades terminales, compactos (<i>rooftop</i>), entre otros.
		Industrial	Utilizados para generar condiciones climáticas específicas (incluye la humidificación y deshumidificación), según distintos requerimientos. Estos sistemas generalmente son utilizados en laboratorios, pabellones de cirugía, centros de datos, salas eléctricas y telecomunicaciones, y cualquier proceso industrial que requiera el control de temperatura y la humedad relativa del ambiente. Esta categoría incluye principalmente a sistemas de aire acondicionado de precisión, con distintas características constructivas.
	Sistemas móviles	Transporte	Utilizados en medios de trasportes terrestres, marítimos y aéreos, proporcionando condiciones ambientales para el bienestar humano.

Fuente: Elaboración propia a partir de (INN, 2017).

De forma similar, el IPCC (2006) establece seis aplicaciones de sustancias HFCs y seis sub-aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado (ver Figura 3-1). Esta forma de clasificación de los distintos usos de los HFCs permite identificar con mayor facilidad aquellas actividades económicas (industriales, comerciales o transporte) o domésticas que son usuarias de estas sustancias.

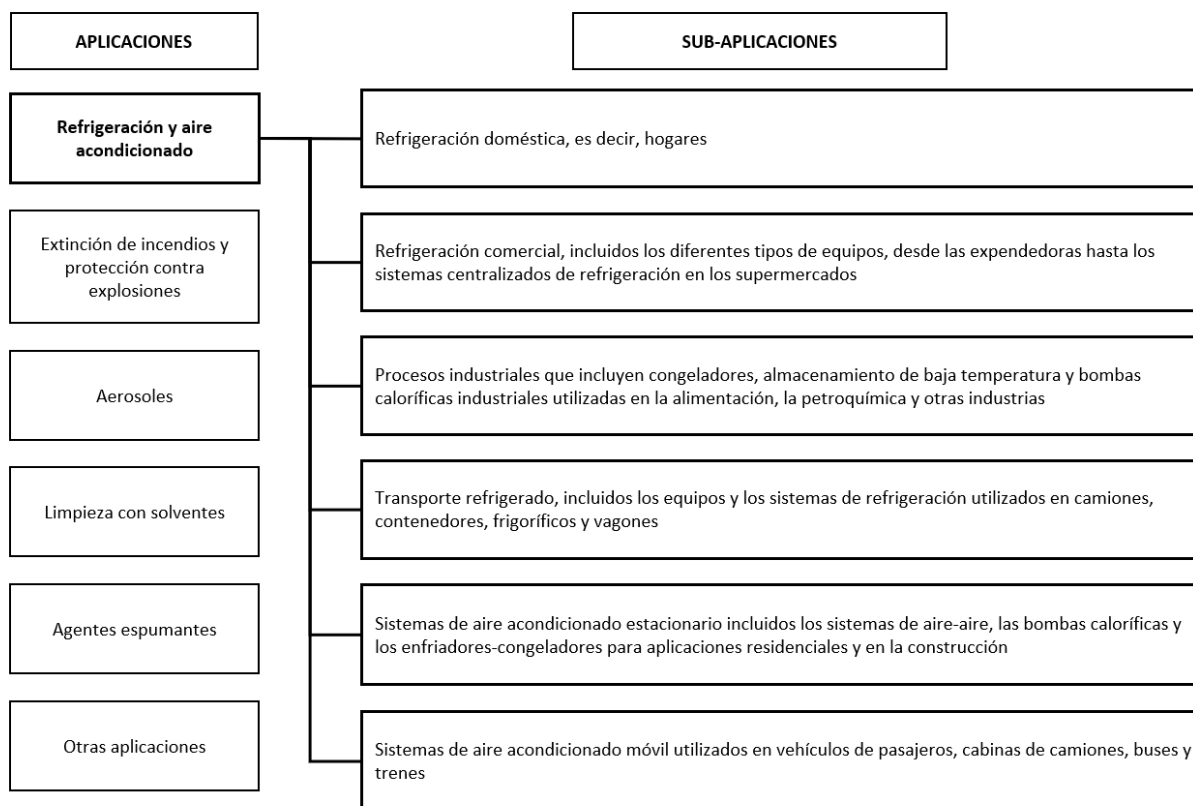


Figura 3-1 Aplicaciones y sub-aplicaciones de refrigeración y aire acondicionado

Fuente: Elaboración propia en base a IPCC (2006).

Es posible observar que en la clasificación de sub-aplicaciones del IPCC (2006) se incluyen el uso doméstico, pero como se dijo antes, este se excluye del estudio. Las sub-aplicaciones consideradas son, por ende, refrigeración comercial, procesos industriales, transporte refrigerado, sistemas de aire acondicionado estacionario y sistema de aire acondicionado móvil. Lo anterior no quiere decir que los establecimientos en donde se identifiquen estas sub-aplicaciones de HFC sean consideradas dentro la norma, sino que son analizadas en el contexto del estudio.

Para efectos de este informe, se considerará que los grandes usuarios de sistemas de frío corresponden a *usuarios finales grandes*, es decir, aquellos que, en la sumatoria de sus sistemas,

independientemente de su carga, sumen una cantidad mayor a 500 kg de refrigerante sin importar la aplicación que tenga. Como consecuencia de lo anterior, en base al análisis de los inventarios sectoriales (ver Sección 3.2.1 y Anexos – Sección 11.2) algunas de las empresas o establecimientos que podrían clasificar dentro de los grandes usuarios son:

- supermercados;
- superficies comerciales como malls, aeropuertos y hoteles;
- hospitales y otros centros de salud;
- empresas del sector lácteo;
- empresas del sector de alimentos congelados;
- empresas del sector hortofrutícola;
- empresas del sector cárnico;
- empresas del sector vitivinícola;
- centros de distribución o centros logísticos;
- plantas de procesamiento del sector pesquero y acuícola;
- embarcaciones, como las de la Armada de Chile, barcos factoría, barcos mercantes y otros;
- empresas de transporte refrigerado y de transporte de personas;
- y empresas del sector minero.

3.1.1 Sectores excluidos

En el listado de secciones antes mencionado, se nombran algunos sectores que fueron excluidos del estudio. Lo anterior se debe a que, dado que el objetivo principal de esta consultoría es proveer insumos técnicos y económicos que permitan crear una norma de emisiones de HFC para grandes sistemas de frío, es importante visualizar de forma previa qué sub-aplicaciones serían factibles de ser incluidas en dicha norma. Estos sectores son transporte refrigerado y transporte de personas.

Para tomar esta determinación, se revisaron los informes sectoriales entregados por la contraparte técnica, a partir de los cuales se determinó que estos sectores corresponden a fuentes de emisión móviles y dispersas. Es decir, se excluyen sistemas asociados al transporte refrigerado, sistemas móviles de climatización en automóviles, buses, trenes o similares que, por su naturaleza móvil y dispersión a lo largo del país, hacen difícil su fiscalización.

Para validar esta decisión, en primer lugar, se revisó el inventario realizado por ATS Energía (2020) en el estudio “Elaboración de un inventario nacional individualizado de HFC y sus alternativas, en los sectores de aire acondicionado móvil, transporte refrigerado y supermercados”, para la Unidad del Ozono del MMA y el PNUD. En este inventario se abordan los sectores de aire acondicionado móvil, transporte refrigerado y supermercados. Para la climatización en vehículos, se estima el tamaño del contenedor aproximado en base a diferentes revisiones bibliográficas. En la Tabla 3-2 se visualiza el tipo de vehículo y la carga de refrigerante contenida en el sistema.

Tabla 3-2 Carga de refrigerante según tipo de vehículo, para climatización de vehículos

Tipo de vehículo	HFC-134a (kg)
Livianos	0,514
Buses	7,5
Camiones	3,5
Máquinas fuera de ruta	1,5
Otros	1

Fuente: Elaboración propia en base a ATS Energía (2020).

En el mismo inventario, respecto al transporte refrigerado, la carga de refrigerante por vehículo varía según las dimensiones de este y la temperatura que se requiere alcanzar. En la Tabla 3-3 se presenta la masa del refrigerante según las características del vehículo y necesidades de temperatura.

Tabla 3-3 Carga de refrigerante según la dimensión del vehículo y la temperatura requerida, para transporte refrigerado

Refrigerante	Temperatura requerida	Longitud del vehículo (m)	Carga en el sistema (kg)
HFC-134a	-2°C	1,8 a 2,4	1,2 a 1,4
	-2°C	2,4 a 5,5	1,8 a 3,6
R-404A	-2°C	6,1 a 6,7	4,7
	-2°C	4,3 a 8,5	2,4 a 2,9
	-18°C	1,8 a 6,1	1,3 a 4,7
	-18°C	4,3 a 8,5	2,4 a 2,9
	-29°C	1,8 a 4,9	1,3 a 4,7
	-29°C	4,3 a 8,5	2,9

Fuente: Elaboración propia en base a ATS Energía (2020).

En base a lo expuesto en la Tabla 3-2 y la Tabla 3-3, se puede notar que estos sistemas contienen pequeñas cantidades de refrigerante (Tipo I y II según clasificación por carga de la NCh 3241/2017), por lo que para que una empresa operadora de transporte fuese considerada gran usuaria tendría que tener una flota de entre 973 y 67 vehículos con las cargas indicadas en las tablas y por ende, se dificulta fiscalizar dicho número de fuentes, que difícilmente se encontrarán de forma simultánea en un mismo punto.

3.1.2 Sectores considerados

A continuación, en la Tabla 3-4 se presentan los grandes usuarios que se analizarán en detalle en el marco de este estudio, y la principal utilización de sistemas de frío dentro de cada sector. Junto con lo anterior, se presenta la referencia de inventario de emisiones sectorial que se encuentra disponible, y que se revisa en detalle en la Sección 4.1.

Tabla 3-4 Grandes usuarios y los principales sistemas y/o procesos que utilizan refrigerantes

Sub-aplicación	Sector	Usos de refrigerante en sistemas de frío	Inventario emisiones sectorial
Refrigeración industrial	Hortofrutícola	Almacenaje en frío: cámaras de prefrío, túnel californiano, túnel vertical. Cámaras de almacenamiento: antecámaras, cámaras de mantenimiento, cámaras de materia prima congelada, túneles de congelación. Procesos de congelación: congelación rápida individualizada (IQF, por sus siglas en inglés).	Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020).
	Lácteo	Unidades de frío, estanques enfriadores (estanques cerrados u horizontales, estanques abiertos, estanques móviles y estanques verticales), pre-enfriadores (pre-enfriador tubular, pre-enfriador de placas), sistemas de frío instantáneo (<i>chillers</i>), cámaras de frío (cámaras de refrigeración, cámaras de congelación, túneles de congelación, abatidores de temperatura).	CERES BCA (2022)
	Alimentos congelados	Túneles de congelados estáticos, continuos, IQF, cámaras de congelado, frigoríficos, mezcladores, tanques de mezclado, homogeneizador, intercambiador de placas, tinas de maduración con agitadores y enchaquetadas, freezers, envasadora rotatoria, túneles de enfriamiento.	Allaires-Avalos (2023)
	Centro de distribución	Sistemas centralizados, sistemas modulares o racks, sistemas independientes.	GAET (2023)
	Acuícola	Refrigeración para túneles de congelación, cámaras de refrigeración y reefers.	(Chávez & Pérez, 2020; Pérez & Caro, 2023)
Climatización comercial	Hospitales	Climatización y refrigeración para conservar medicamentos, vacunas, suero, sangre, tejidos, órganos para trasplantes, entre otros usos.	Clarke C. (2023)
	Climatización de grandes superficies comerciales	Equipos compactos tipo rooftop, sistemas divididos de volumen de refrigerante variable (VRV), enfriadores de agua tipo chillers, Split individuales y múltiples.	Santander (2023)
Refrigeración y climatización industrial	Naviero	Cámaras frigoríficas, mantenedores, reefer, congeladores domésticos, bodegas de almacenamiento, refrigeración para víveres, plantas de agua enfriada (<i>chiller</i>) y aire acondicionado.	Lescani (2020)
	Vitivinícola	Estanques de acero inoxidable con camisas refrigerantes, serpentines, enfriadores de agua o chiller, bombas de calor, climatización de naves de crianza en barricas y maduración en botellas, oficinas y laboratorios.	S&C (2022)
Climatización industrial	Minero	Climatización de cabinas de maquinarias, climatización para espacios habitables, climatización de salas eléctricas.	(Madrado-Ortega & Morandé-Thompson, 2023)
Refrigeración y climatización comercial	Supermercados	Sistemas centralizados, unidades condensadoras, unidades enchufables autocontenidas.	GAET (2023)

Fuente: Elaboración propia

3.2 Propuesta de desagregación de grandes usuarios

Si bien, como se muestra en la Tabla 3-4, es posible establecer una desagregación de grandes usuarios según sector, aplicación, sub-aplicación y equipos que típicamente se usan, esta clasificación no necesariamente es la más adecuada para una posible norma de emisión de HFCs, debido a que como se verá más adelante en el informe, dentro de un mismo sector económico, existen distintas escalas de tamaño industrial o comercial. Por ejemplo, dentro del sector lácteo y pesquero, existen distintos tamaños de plantas de procesamiento de materia prima con necesidades de refrigeración distintas en cuanto a carga de refrigerante, que podría llevar a que una planta sí sea considerada dentro de los grandes usuarios de HFCs y otra no. Esto ocurre en casi todos los sectores industriales y comerciales.

Por lo anterior, para proponer una desagregación adecuada de los usuarios de refrigerantes HFCs se procede a:

- i.) caracterizar los sectores industriales y comerciales en los que se ha detectado e inventariado el uso de refrigerantes, incluyendo una caracterización por tipo de equipo;
- ii.) y revisar normativa internacional, para evaluar otras posibles desagregaciones de usuarios que puedan ser más adecuadas en términos de factibilidad de su implementación y fiscalización.

Luego, en la Sección 3.2.3 se hace una propuesta basada en la revisión y análisis de los dos puntos anteriores.

3.2.1 Caracterización de sectores industriales y comerciales usuarios de HFCs

Para caracterizar los sectores industriales y comerciales que utilizan sustancias HFCs en sus aplicaciones de refrigeración y climatización, se consultaron los informes sectoriales mencionados en la Tabla 3-4 y se complementó con investigación propia.

3.2.1.1 Sector hortofrutícola

El sector hortofrutícola comprende desde la producción de la materia prima, frutas, hortalizas u otros, hasta el procesamiento de estas. En el inventario sectorial de sustancias HFCs realizado por FDF (2020) se menciona que el sector hortofrutícola a nivel nacional produce aproximadamente 5 millones de toneladas de frutas, destacando las uvas de mesas, cerezas, ciruelas, arándanos, manzanas, paltas, peras, frutos secos, fruta deshidratada y congelada.

Según indica FDF (2020), las actividades hortofrutícolas destinadas a exportación se desarrollan en casi todo el territorio nacional comprendido entre la Región de Atacama y la Región de Los Lagos. Para la temporada 2028-2019 cuatro regiones aportaron más del 80% de la fruta exportada, liderando la Región de O'Higgins con una participación del 30%, seguida por la Región

del Maule con un 26% de participación, en la tercera posición se encuentran la Región de Valparaíso y la Región Metropolitana con un 13% de participación.

Dentro de las exportaciones la agroindustria hortofrutícola ha tenido un importante desarrollo en los últimos años, de hecho, Chile se ha posicionado como uno de los principales proveedores de pasas, manzanas secas, ciruelas secas, frambuesas congeladas, pimentón deshidratado, jugo de uva y manzana, pasta de tomate y duraznos en conservas. Una parte importante de las ventas dentro de estas categorías son los congelados, con un 45% de participación.

Lo anterior, implica un aumento en la demanda de usos de sistemas de congelamiento, lo que podría generar un aumento de la capacidad instalada de ese tipo de sistemas, y por consecuencia un aumento del uso de refrigerantes.

Una vez finalizada la cosecha, el producto se traslada a la planta de proceso de congelación, ya sea por el productor o por el camión de retiro de la agroindustria. El manejo de la fruta ocurre en distintas etapas: recepción, pre-enfriamiento, selección, limpieza y desinfección, secado, clasificación, empaque y embalaje, transporte, almacenamiento, congelamiento y transporte.

Algunas de las etapas antes mencionadas consideran el uso de refrigerantes, en específico, el congelamiento y pre-enfriamiento. En la Tabla 3-5 se muestra los principales sistemas para los procesos de congelación y sus principales funciones.

Tabla 3-5 Equipos y funciones en el sector hortofrutícola

Sistema	Equipos	Descripción	Refrigerantes utilizados
Almacenaje en frío	Túnel californiano	Corresponde al método más utilizado para almacenaje. Una vez que la fruta es almacenada y empacada, se forman los pellets. El aire circula por los laterales de las filas de pallets. Para evitar que el aire entre por la parte superior o al frente de los pellets, los túneles están equipados con una lona que cubre las dos filas y el pasillo central desde arriba, extendiéndose hacia el frente.	R-4047C, R-410A, R-22.
	Túnel vertical	Es similar, al túnel californiano, en donde la principal diferencia radica en el flujo de aire y disposición de los equipos. Los ventiladores y evaporadores se encuentran a un costado del túnel.	R-4047C, R-410A, R-22.
Cámaras de almacenamiento	Antecámaras	Son espacios refrigerados, generalmente entre 0 y 5°C, donde se almacena la fruta que ha pasado por el proceso de preenfriado, mientras espera para ser trasladada a las cámaras de mantenimiento.	R-22, R-406A.
	Cámaras de mantenimiento	Grandes espacios climatizados, en los que se almacena la fruta proveniente de los túneles de frío. Tiene sus propios evaporadores y ventiladores, los cuales procuran mantener la temperatura a 0°C.	R-404A, R-717.
	Cámaras de materia prima congelada	Son sistema de mantención congelada que abarca desde los -18°C o menos, en donde se mantiene la materia prima congelada antes de su proceso o despacho.	R-404A, R-507A.
Procesos de congelación	Técnica IQF	Es un proceso rápido de congelación, en donde los productos conservan sus cualidades organolépticas y sensoriales como sus valores nutricionales, texturas, sabor y color.	Sin información.

Fuente: Elaboración propia en base a Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020).

A partir del inventario elaborado por (FDF, 2020) es posible estimar qué tipo de equipos predominan en el sector hortofrutícola, según carga y lo establecido por la NCh 3231:2017. Si bien en este inventario se menciona, de forma agregada y no por tipo de equipos, que el total de R-507 utilizado para cámaras, pre-frío, hidrocóling y packing es de 11.707 kg a nivel nacional, sí indica que, en base a la encuesta realizada, el promedio de cámaras de frío es de 12,8 cámaras por empresas. En complemento, se tiene que son 7 las empresas que declararon usar R-507, por lo que se tiene un aproximado de 89,6 cámaras de frío que utilizan HFC. Para conocer la carga por sistema, basta dividir la carga total declarada (11.707 kg) en la cantidad total de cámaras de frío (89,6 cámaras), lo que daría aproximadamente 131 kg de refrigerante por sistema, indicando una predominancia del equipo Tipo III.

Resulta importante mencionar, que bajo los supuestos anteriores se asume una distribución uniforme de carga de refrigerante por equipo, lo que no necesariamente es una realidad. Sin embargo, de lo anterior se desprende que además de que el sector hortofrutícola se compone de empresas que son grandes usuarias, la carga utilizada por cada una, se agruparía predominantemente en equipos Tipo III.

3.2.1.2 Sector de alimentos congelados

El sector de alimentos congelados, predominan cinco subsectores: frutas y hortalizas congeladas, carnes rojas, cerdo y ave, cecinas y helados.

En el caso de las frutas y hortalizas congeladas, el inventario realizado por Allaires-Avalos (2023) menciona que, para estos productos, se tienen diferentes etapas tales como recepción y descarga, acopio, lavado y distribución, limpieza. Posterior a esta última etapa se puede seguir un proceso de congelado o de pulpas o jugos concentrados. En la Tabla 3-6 se presentan las diferentes etapas de los procesos mencionados.

Cabe notar que, en este subsector de alimentos congelados en particular existen similitudes con el sector hortofrutícola. De hecho, cabe la posibilidad de que exista un doble conteo al considerar ambos inventarios, en específico en los procesos asociados a congelación. Sin embargo, dado que en el sector hortofrutícola también se consideran frutas frescas que luego se exportan, y el sector de congelados considera frutas que se venden en este formato, se reportan ambos.

Tabla 3-6 Procesos y etapas en el subsector de frutas y hortalizas congeladas

Procesos	Etapas	Descripción
Congelación	Blanqueo	Este proceso consiste en exponer el producto a una temperatura específica durante un corto período de tiempo. Su principal objetivo es inactivar o retardar la acción de bacterias y enzimas que aceleran la pérdida de calidad.
	Congelado de frutas y hortalizas	Después del blanqueo, el producto se enfría rápidamente para evitar el deterioro del sabor y color. Este proceso se realiza en túneles de congelado, que pueden ser estáticos, continuos o de tecnología IQF.
	Almacenamiento	Una vez congelados, los productos semiprocesados se almacenan en cámaras de congelado. Luego, se envasan y se almacenan en cámaras de producto terminado congelado.
Pulpas o jugos concentrados	Maceración	Dependiendo del tipo de materia prima, esta se transfiere, se muele y se le añade agua. La mezcla resultante se envía a los tanques de maceración, donde se agregan enzimas y se mantiene a una temperatura controlada durante un tiempo específico.
	Separación Sólido-Líquido	En esta etapa, se separan los sólidos de los líquidos utilizando equipos como decantadores y centrífugas.
	Evaporación	El líquido pasa a un preconcentrador, donde se elimina parte del agua para aumentar la concentración.
	Clarificación	El jugo se traslada a los tanques de clarificación, donde se añaden enzimas y agentes clarificantes para mejorar su claridad.
	Concentración	El jugo se concentra en un evaporador y luego se enfría. Las condiciones térmicas varían en función del tiempo de residencia en el proceso.
	Congelado de pulpas	El producto se enfría y congela rápidamente para evitar la pérdida de sabor y color. Este proceso se realiza en túneles de congelado.
	Envasado y etiquetado	Los productos se envasan en recipientes preseleccionados, como plásticos, bolsas o cajas. Muchos de estos productos se colocan dentro de envases más grandes para su almacenamiento o envío en mayores cantidades.

Fuente: Elaboración propia en base a FDF (2020).

Otro de los subsectores es el faenamiento y la obtención de carnes rojas, cerdo, ave y cecinas. Allaires-Avalos (2023) desarrolló un inventario de sustancias HFCs en donde se menciona que existen tres ciclos de procesamiento, dependiendo del nivel de elaboración de la carne.

El Ciclo I, corresponde al proceso de faena, en donde la carne obtenida es enfriada desde los 36°C hasta los 6°C para ser trasladada o procesada. Aquí se requieren evaporadores especiales para enfrentar la alta humedad.

El Ciclo II, es el proceso de desposte, con la separación de los músculos de carne de los huesos. Este proceso requiere realizarse en una sala a una temperatura de 10°C, seguido de un almacenamiento a 0°C o congelación a -20°C. Para mantener la calidad de la carne y evitar la formación de cristales de agua, se utiliza un proceso de congelación rápida en túneles a -40°C, logrando la congelación en pocas horas.

El Ciclo III, es aquel en que se busca generar nuevos productos más procesados como hamburguesas, churrascos, entre otros. Por lo general, en este proceso se requiere un congelado rápido con una alta demanda de la capacidad de refrigeración. Normalmente es en este ciclo que los productos se congelan.

Es importante señalar que las empresas del sector pueden combinar de diversas formas los ciclos previamente mencionados. Algunas compañías se dedican exclusivamente a los Ciclos I y II antes de exportar, mientras que otras se enfocan en los Ciclos II y III. También hay empresas que solo realizan el Ciclo I o que se especializan en el Ciclo III para exportar el producto final. Al analizar inventarios, como el de Lecaros & Burgos (2022), se observa una tendencia en la que las empresas llevan a cabo los ciclos de manera continua. Es decir, pueden completar los tres ciclos, o bien los Ciclos I y II, o los Ciclos II y III, o realizar solo uno de ellos. No se identificaron empresas que realicen los Ciclos I y III juntos, ni aquellas que se dediquen únicamente al Ciclo II.

En tercer lugar, en cuanto al subsector de helados, Allaires-Avalos (2023) clasifica los helados según su tipo de ingrediente, en los que se distinguen los helados de agua, helados de crema y helados de leche. Independientemente del tipo de helado, los principales sistemas utilizados son mezcladores, homogeneizador, intercambiador de placas, batidoras o freezers, túneles de enfriamientos, entre otros.

3.2.1.3 Sector naviero

Dentro del sector naviero, se identifican los subsectores de la Armada, pesca de altamar, marina mercante y flota artesanal. Mientras que en el estudio elaborado por Lescani (2020) se discuten principalmente los tres primeros subsectores antes mencionados, en Pérez & Caro (2023) se hace un diagnóstico de las aplicaciones de refrigerante en la flota artesanal albacorera. Para efectos de este estudio, solo serán consideradas las naves de la Armada, pesca de altamar y marina mercante, debido a que el aporte al inventario nacional de HFCs por parte de la flota artesanal

es menor comparativamente al resto de los usos. De hecho, el aporte de esta flota es de alrededor de 1.000 kg, mientras que los órdenes de magnitud de los otros subsectores varían entre 10.000 a 100.000 kg.

En primer lugar, la Armada de Chile, además de las funciones diplomáticas con las que cumple, cumple con funciones como transporte de pasajeros, ayuda humanitaria, patrullaje marítimo, entre otros. Para poder cumplir estas tareas asociadas se requiere contar con diversos equipos de climatización y refrigeración.

De acuerdo con Lescani (2020), las naves de la Armada utilizan refrigerantes con dos propósitos principalmente: climatización para la tripulación, logística interna y externa. En primer lugar, en cuanto a climatización para la habitabilidad en las naves de la Armada, que se refiere a proporcionar las condiciones adecuada para la tripulación, se cuenta con sistemas de aire acondicionado integrado a un sistema principal. De acuerdo con la investigación realizada por el autor, los equipos de climatización cuentan con R-22 con cargas de 150 kg por sistema aproximadamente. También existe un uso del HFC-134a, con cargas que van entre los 6 a 80 kg por sistema. Por último, existen los equipos tipo Split que utilizan R-404A, con capacidades desde 9.000 BTU hasta 48.000 BTU.

En cuanto a la logística interna, el autor la define como aquella capacidad de cada buque para almacenar y conservar alimentos y víveres para uso exclusivo del personal. La mayor aplicación para esta logística son las cámaras frigoríficas, las que se utilizan para conservar o congelar alimentos. Por lo general, estos sistemas utilizan R-404A con carga de 3 a 6 kg. También utilizan HFC-134a en donde su carga va desde los 0,18 a 0,24 kg. Para los congelados se utiliza R-22, con cargas que van desde los 7 a 10 kg.

Por logística externa, se entiende como a la capacidad de almacenar y transportar alimentos y víveres que no están destinado al uso de personal, brindando ayuda humanitaria en caso de catástrofe o ayudando a abastecer a comunidades aisladas. Por lo general se utilizan equipos tipo reefers, los que utilizan HFC-134a y R-404A.

Para el subsector de la pesca de altamar, Lescani (2020) menciona que corresponde a la actividad extractiva realizada por embarcaciones, con sistemas de pesca tecnológicos que permiten la captura masiva de recursos pesqueros. Es importante destacar que, dentro de este subsector, se incluyen los barcos factorías, los que corresponden a aquellos en los que el recurso se procesa en la misma embarcación.

El uso de refrigerantes dentro del sector de la pesca de altamar corresponde a dos áreas de aplicación, la primera es la conservación del producto extraído, por lo que se cuenta con bodegas refrigeradas de gran capacidad, y la segunda corresponde a la alimentación del personal. Para la conservación del producto que se extrae, se utiliza principalmente R-717, y para la conservación de víveres y alimentos para la tripulación se utiliza principalmente HFC-134a y R-404A. Adicionalmente, la climatización para *comfort* humano también considera un uso importante de

refrigerante y de acuerdo con la investigación realizada por el autor el R-410A el refrigerante más utilizado.

Por último, para el subsector de la marina mercante, Lescani (2020) reporta que principalmente se utilizan remolcadores, cuya función principal es brindar apoyo logístico en diversas maniobras. Además, en caso de que un barco pesquero sufra una falla en su sistema de propulsión, los remolcadores se encargan de llevarlo a un astillero para solucionar el problema. Estos remolcadores están equipados con maquinaria para la conservación de alimentos, que incluye pequeñas cámaras de refrigeración y congelación, en su mayoría operando con los refrigerantes R-404A y HFC-134a.

Al igual que con el sector anterior, se hace necesario caracterizar cómo se distribuye la carga total en los equipos utilizados. De acuerdo con el inventario sectorial consultado, es posible extraer las siguientes conclusiones por subsector:

- Armada: la respuesta a la solicitud de información realizada a la Armada en el marco del estudio de Lescani (2020), menciona que los barcos utilizan sistemas de climatización centralizados, y que el total bordea entre los 132 kg a 164 kg de refrigerante. Respecto a la refrigeración se cuenta con 39 kg de refrigerante por sistema, lo que se puede inferir que se cuentan principalmente con equipos Tipo II y III.
- Pesca de altamar – Bodegas: en este subsector, se tiene que la carga por bodega asciende a 5.000 kg de HFCs por cada una. En base a la experiencia e información disponible para este tipo de bodegas en otros sectores económicos, se determina que predominan los equipos Tipo III.
- Pesca de altamar – Barcos: respecto a los barcos dentro de la pesca, se menciona que para climatización se posee una carga de 150 kg y para refrigeración de víveres 10 kg por embarcación. Asumiendo que son sistemas climatizados, se puede inferir que existe una predominancia de equipos Tipo II y III.
- Barcos factoría: se utiliza la misma información que para los barcos de pesca de altamar por ende se infieren equipos Tipo II y III.
- Marina mercante: se utiliza la misma información que para los barcos de pesca de altamar por ende se infieren equipos Tipo II y III.

3.2.1.4 Sector acuícola

Respecto a los usos de refrigerantes en acuicultura, definida como aquella actividad de cultivo de recursos marinos extensivo o intensivo, se detectó que la principal aplicación es en las actividades industriales de producción, que finalizan en plantas de procesamiento donde la materia prima se convierte en producto final ya sea de congelado o fresco (refrigerado) (Chávez & Pérez, 2020; Pérez & Caro, 2023). Para este sector existen dos inventarios sectoriales a considerar, en los que se profundiza a continuación.

En primer lugar, en el inventario sectorial elaborado por Chávez & Pérez (2020) con el objetivo de estimar el banco y la recarga en la zona sur austral de Chile, se realiza una estratificación según capacidad productiva, es decir estratos que agrupan plantas con niveles de producción similar, bajo el supuesto de que los equipos y por lo tanto cargas de refrigerantes pueden ser diferentes por cada estrato. En cada región, se definieron tres o cuatro estratos, dependiendo de la concentración de producción entre las plantas. Así se definieron el estrato Superior, Medio Alto, Medio Bajo e Inferior. En total, se contabilizan 191 plantas autorizadas por el SERNAPESCA al año 2018, 146 pertenecientes a la Región de Los Lagos, 32 son de la Región de Magallanes y la Región de Aysén cuenta con 13 plantas.

En segundo lugar, en el inventario sectorial elaborado por Pérez & Caro (2023), se menciona que en las plantas de procesamiento se utilizan cámaras de mantenimiento y cámaras estáticas, túneles congelados, Flow ice, hielo escama, reefers, entre otros, con el fin de atender las líneas de producción L2 (fresco-refrigerado) y L3 (congelado).

A partir de los inventarios sectoriales antes mencionados, no es posible estimar una carga por equipo. Por ello, se recurrió a un estudio elaborado por PASOS (2020), en el que se tienen la carga total y el número de equipos por plantas. En base a los datos recopilados en este último estudio, se tiene que, asumiendo una distribución uniforme, las cargas por equipos dentro del sector va desde los 6 kg por sistema hasta los 640 kg por sistema, dependiendo del estrato productivo, por lo que existe un predominio de los equipos Tipo II y III. Lo anterior fue validado a partir de las entrevistas realizadas a técnicos en refrigeración del sector acuícola, en el marco del presente estudio, en donde se indicaron cargas de entre 10 kg al orden de miles de kg (ver Anexo Digital³).

3.2.1.5 Sector lácteo

El sector lácteo comprende la producción y procesamiento de leche. La producción se puede dividir en productores primarios que corresponden a aquellos que entregan la materia prima a las industrias, mientras que el procesamiento ocurre en las denominadas Industria Láctea Mayor (ILMa) e Industria Láctea Menor (ILMe). De acuerdo con el diagnóstico hecho por CERES BCA (2022) en su inventario sectorial, todos los subsectores anteriores utilizan refrigerantes en distintos sistemas.

El inventario realizado por CERES BCA (2022) indica que a nivel nacional se producen cerca 2.550 millones de leche cruda, de los cuales cerca del 85% es recepcionado y procesado por la ILMa, un 7% por la ILMe y el porcentaje restante corresponde a auto consumo o consumo animal.

Quienes suministran la leche a las industrias recién mencionadas, son los productores primarios, cuyo total de participantes se estima entre 2.500 a 3.400 productores lecheros. De estos, se ha determinado que el 90,2% son productores con menos de 50 vacas lecheras, los que producen menos de 500.000 litros por año; luego el 8,2% corresponde a productores pequeños que poseen

³ Entrevistas con ID 27 y 28

entre 50 a 299 vacas lecheras las que producen entre 500.000 a 1.500.000 litros por año; luego un 1,6% de productores medianos que tienen entre 300 a 499 vacas lecheras que, en conjunto con productores grandes que poseen más de 500 vacas lecheras, alcanzan una producción anual de más de 1.500.000 litros por año. Dicho de otra forma, el universo de productores primarios de leche puede agruparse en tres estratos:

- Estrato 1: productores con capacidad mayor a 1,5 millones de litros anuales.
- Estrato 2: productores con capacidad de entre 500 mil a 1,5 millones de litros por año.
- Estrato 3: productores con capacidad de menos de 500 mil litros por año.

La ILMa tiene una capacidad de recepción anual mayor a los 10 millones de litros de leche, conformada por 11 empresas que controlan 18 plantas. Por su parte, la ILMe tiene una capacidad de recepción anual que va desde los 20.000 a 10 millones de litros de leche, conformada por 109 a 111 plantas.

En CERES BCA (2022) se menciona que el mercado de la leche, principalmente se comercializa en el mercado interno, cerca del 90% de la producción, y lo restante se encuentra abierto al mercado internacional, cuyos destinos más importantes son Perú, Emiratos Árabes y Estados Unidos. Los principales productos exportados corresponden a fórmulas infantiles y leche condensada; quesos y leche en polvo.

Para la producción de los productos recién mencionados, y los demás que componen los derivados de la leche, son necesario los equipos de refrigeración, en donde los más importante se describen en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7 Sistemas y funciones en el sector lácteo

Sistema	Función
Unidades de frío	Se busca forzar mecánicamente la circulación de un fluido dentro de un circuito cerrado, generando zonas de alta y baja presión. Esto permite que la leche absorba calor en una parte del circuito y lo disipe en otra.
Estanques enfriadores	Inhibe la proliferación bacteriana y se prolonga la vida útil de la leche. Para lo anterior se reduce la temperatura de 36°-38°C a 4°C dentro de las 3 primeras horas luego del ordeño. Existen variedades de estanques, como los cerrados u horizontales, abiertos, móviles y verticales.
Pre-enfriadores	Disminuyen la temperatura de la leche previo a su paso al estanque. Se hace circular leche y agua (o un refrigerante) en direcciones opuestas en circuitos adyacentes, lo que permite que se produzca un equilibrio térmico entre ambos fluidos. Este proceso logra reducir la temperatura de la leche desde 37°C hasta 20°C. Existe el pre-enfriador tubular y el pre-enfriador de placas.
Sistemas de enfriamiento instantáneo	Existen principalmente los sistemas chillers los que funcionan entregando un flujo continuo de refrigerante al lado frío del evaporador a la temperatura deseada. Posteriormente, el líquido refrigerado se bombea a lo largo del proceso para extraer el calor de los equipos y devolverlo al circuito.
Cámaras de frío	Se utilizan para mantener los productos congelados y frescos, para evitar el deterioro facilitar su conservación y prevenir el crecimiento de hongos y bacterias. Existen diversos tipos y modelos de cámaras de frío, que se distinguen principalmente por su uso específico: algunas están diseñadas para refrigerar, mientras que otras están destinadas a congelar. Entre los tipos de cámaras se encuentran las cámaras de refrigeración, cámaras de congelación, túneles de congelación y abatidores de temperatura.

Fuente: Elaboración propia en base a CERES BCA (2022).

Al analizar el uso de refrigerante por equipos en la ILMa, los autores mencionan que las cámaras de frío son aquellos equipos que mayor volumen utilizan, con un total para el periodo de 3.784 kg, lo que representa el 59,7%, y un uso promedio de 34 kg por equipo. Le siguen en importancia los chillers con un 31% del volumen y un uso promedio de 163,6 kg por equipo, los estanques enfriadores con 3,34% del volumen y un promedio de 8,15 kg por equipo. El restante 5,93% corresponden a diversos equipos de poca frecuencia carga promedio de 11,75 kg por equipo. Por lo que en base a lo que reportan los autores, los equipos predominantes dentro de la IMLa son los Tipo II y III. De igual forma, en la ILMe, los autores siguen el mismo análisis realizado en la ILMa, por lo que, en consecuencia, también existe una predominancia de equipos Tipo II y III.

En cuanto a los productores primarios, se cuenta con la siguiente información: los autores al analizar el uso de refrigerante por tipo de equipamiento y estrato de productor, se tiene que los productores del estrato 1 tiene un uso promedio por equipo de 12,7 kg para R-22 y de 18, 1 kg para HFC, en donde, 18,9 kg por equipo son de R-404A, 8 kg por equipo son de R-410A y 11 kg por equipo son de R-507. Le siguen los productores del estrato 2 con 13,1 kg por equipo de HFC, en donde la totalidad es de R-404A y 6,0 kg por equipo de R-22. Finalmente se ubica el estrato 3 con un uso promedio de 2,3 kg por equipo, correspondiente 1,6 kg por equipo de R-22 y 7,3 kg por equipo de R-410A. En base a lo anterior, se concluye que priman los equipos Tipo I y II.

3.2.1.6 Hospitales y recintos de atención primaria

Para el sector de hospitales y recintos de atención primaria, se consultó el inventario realizado por Clarke C. (2023), que incluye los recintos de salud de atención primaria y los recintos de salud hospitalarios. El autor del inventario menciona que los principales usos de sistemas de frío son climatización para *comfort* humano y refrigeración para la conservación adecuada de los medicamentos, vacunas, suero, sangre, tejidos, órganos para trasplante y otros usos que mejoran las condiciones para ciertos tratamientos.

Respecto al uso de equipos, Clarke C. (2023) destaca principalmente el uso de sistemas chillers y aires acondicionados tipo Split muro y compacto, sin embargo, no es fue posible realizar un análisis más profundo y poder distinguir entre tipos de tecnologías utilizadas debido a la baja tasa de respuestas en las encuestas realizadas durante el desarrollo del inventario.

En cuanto al tipo de equipos predominante en recintos de atención primaria, a partir el inventario sectorial no es posible extraer información suficiente para determinar la carga por equipo y así poder clasificarlos. Sin embargo, en base a las dimensiones típicas de este tipo de recintos, correspondientes a centros de salud familiar (CESFAM), consultorios o similares, el contraste de las dimensiones de estos sitios con respecto a hospitales o clínicas y el hecho de que las necesidades de refrigeración difieren significativamente de las necesidades en hospitales⁴, es posible inferir que predominantemente se utilizan equipos Tipo I.

De forma similar, en el caso de los hospitales, no se logra detectar el tipo de equipo que se utiliza solo a partir de la información extraída del inventario sectorial. Sin embargo, en base a la entrevista realizada para el sector hospitalario y las necesidades de refrigeración y climatización detectadas, se puede concluir que predominantemente se utilizan equipos Tipo II y III.

3.2.1.7 Sector vitivinícola

El sector vitivinícola comprende toda la producción del vino, desde el cultivo de la materia prima hasta el envasado y posterior almacenamiento del vino en las bodegas. Según S&C (2022) la producción vitivinícola a nivel nacional se desarrolla entre las Regiones de Atacama y los Lagos, y en donde se concentra la mayor participación es la Región del Maule y Región de O'Higgins con un 72% de la superficie.

Según un reporte del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), para el año 2021 la producción anual fue de 1.344 millones de litros. Por otro lado, de acuerdo con las cifras reportadas por Organización Internacional de la Viña y el Vino (OIV), Chile está en sexto lugar en términos de producción, representando un 5,1% de la producción mundial. Dentro de las exportaciones, Chile

⁴ La necesidad de refrigeración para conservación adecuada de sangre, tejidos, órganos u otros no se presenta en un recinto de atención primaria, debido a que estos centros tienen como objetivo principal la medicina preventiva y promocional.

es el cuarto exportador de vino a nivel mundial, y el primero en el hemisferio sur, exportando a más de 140 países.

El uso del frío en la industria del vino según menciona S&C (2022), es para diferentes etapas de la producción, dependiendo si este es vino blanco o vino tinto. En la producción de vino blanco, se destacan cinco etapas clave donde se emplean procesos de refrigeración y/o climatización, cada una con diferentes rangos de temperatura. Estas etapas son: maceración en frío, fermentación alcohólica, fermentación maloláctica, guarda en cubas o envejecimiento en barricas, y clarificación, estabilización y filtrado, y almacenamiento del producto terminado.

En el caso del vino tinto, también se identifican cinco etapas que requieren refrigeración y/o climatización: maceración en frío, fermentación alcohólica, guarda en cubas o envejecimiento en barricas, clarificación, estabilización y filtrado, y almacenamiento del vino finalizado.

A continuación, en la Tabla 3-8 se explica cada una de estas etapas y sus requerimientos.

Tabla 3-8 Etapas y sus descripciones en el sector vitivinícola

Etapas	Descripción
Maceración en frío	Este proceso comienza cuando las uvas se colocan en los tanques de fermentación. Se aplica una reducción de temperatura entre 5°C y 10°C para mantener el mosto en contacto con las pieles, extrayendo aromas y taninos hacia el mosto.
Fermentación alcohólica	Es un proceso biológico anaeróbico donde el mosto se transforma en alcohol y CO ₂ . Durante esta etapa exotérmica, la temperatura del mosto se controla para no superar los 25°C en vinos tintos y los 18°C en blancos. Temperaturas fuera de este rango pueden detener la fermentación.
Fermentación maloláctica	Conocida como la segunda fermentación, transforma el ácido málico de las uvas en ácido láctico mediante bacterias, reduciendo la acidez del vino. Este proceso se activa entre 10°C y 25°C, siendo ideal entre 20°C y 23°C.
Almacenamiento y crianza de vinos	Dependiendo del tipo de vino, esta etapa varía. En los vinos varietales, el vino se almacena en cubas de acero inoxidable con control de temperatura. En vinos reserva, se traslada a barricas de roble, donde la temperatura se mantiene entre 10°C y 15°C mediante la climatización ⁵ de la bodega.
Clarificación, estabilización y filtrado	Después del envejecimiento, el vino contiene partículas sólidas no deseadas que se eliminan mediante clarificación, utilizando sustancias como bentonita, proteínas vegetales, o clara de huevo. Luego, si es necesario, se realiza una estabilización por frío para precipitar las sales de ácido tartárico, manteniendo la temperatura baja, pero sin congelar el vino.

Fuente: Elaboración propia en base a S&C (2022).

Los principales equipos utilizados para las etapas antes mencionadas son sistemas de frío y bombas de calor, en los que destacan las cubas o estanques de acero inoxidable con camisas refrigerantes, serpentines, enfriadores de agua, bomba de calor y climatización de naves de crianza en barricas y maduración en botellas y en oficinas/laboratorios.

⁵ Cabe mencionar que a pesar de que la definición del proceso de almacenamiento utiliza el concepto de climatización, para efectos del estudio se considera que esto corresponde a refrigeración, pues la climatización se usa con el objetivo de mantener temperaturas de *comfort* humano.

Con respecto al tipo de equipos utilizados en la industria vitivinícola, a partir del inventario es posible extraer que la carga por equipo varía entre los 20 kg a los 96 kg, por lo que existe una predominancia de equipos Tipo II y III.

3.2.1.8 Centros de distribución y logística

Los centros de distribución y logística corresponden a aquellos establecimientos que forman parte de la cadena de valor al ser una etapa intermedia en el transporte de algún producto. En muchos casos, estos productos pueden requerir refrigeración para así mantener la cadena de frío hasta llegar a su destino. Para entender el sector de centros de distribución y logística, fue necesario consultar el inventario realizado por GAET (2023).

El autor del inventario de este sector menciona que el rango de temperatura varía según las necesidades del proceso o producto. Por ejemplo, un proceso de pre-enfriado abarca temperaturas entre los 0°C a los 15°C, el almacenado refrigerado se puede encontrar entre los -2°C a los 10°C, -30°C a -10°C y temperatura menores a -60°C.

En los centros de distribución y logística es común encontrar los sistemas centralizados, sistemas modulares y sistemas independientes. En la Tabla 3-9 se presenta estos sistemas, con sus respectivas descripciones y el refrigerante que predomina en estos.

Tabla 3-9 Sistemas y funciones en el sector de centros de distribución y logística

Sistema	Función	Refrigerante
Centralizados	Suelen ser los más grandes y complejos, destacándose por integrar toda la planta térmica en una sola ubicación. Estos sistemas pueden estar diseñados para ofrecer enfriamiento en diversas áreas, lo que facilita un mayor control y personalización de las temperaturas en diferentes sectores.	R-717, CO ₂ , R-507A.
Modulares	También llamados racks, son sistemas formados por módulos que se conectan en serie, permitiendo ajustar la capacidad térmica según los requerimientos de la instalación. Estos son más compactos y adaptables a diferentes necesidades.	R-717, R-507A.
Independientes	Se utilizan en áreas pequeñas con bajos requerimientos térmicos. Cada unidad de condensación funciona de manera individual junto con su correspondiente unidad de evaporación. Estos equipos se distribuyen en distintos puntos de la instalación y cuentan con controladores más sencillos.	R-507A, R-404A.

Fuente: Elaboración propia en base a GAET (2023).

La metodología utilizada por GAET (2023) se basa en la estimación de un factor de carga de refrigerante por superficie, expresado en kg de refrigerante por metros cuadrados de centro de distribución. Estos centros se distribuyen en cuatro tipos de recintos: centro logístico refrigerado pequeño, centro logístico refrigerado mediano, centro logístico refrigerado grande y centro de distribución refrigerado. Dado que es una metodología basada en superficie y no en la estimación

por número de equipos o similar, solo es posible inferir a partir de los tipos de equipos identificados y el área cubierta por estos recintos:

- Centro logístico refrigerado pequeño: se puede suponer que al tener un área menor que refrigerar se pueden utilizar los sistemas independientes, los cuales poseen una menor carga de instalación, por lo que pueden existir equipos Tipo I o II.
- Centro logístico refrigerado mediano: siguiendo la misma lógica de los centros logísticos refrigerados pequeños, se puede suponer que al tener un área menor que refrigerar se pueden utilizar los sistemas independientes, los cuales poseen una menor carga de instalación, por lo que pueden existir equipos Tipo I y II.
- Centro logístico refrigerado grande: se puede suponer que al tener mayor que refrigerar se pueden utilizar sistemas centralizados o sistemas modulares los cuales poseen una carga mayor de instalación, por lo que los equipos que pueden predominar son Tipo II y III.
- Centro de distribución refrigerado: al igual que antes, se puede suponer que al tener mayor superficie que refrigerar se pueden utilizar sistemas centralizados o sistemas modulares los cuales poseen una carga mayor de instalación, por lo que los equipos que pueden predominar son Tipo II y III.

3.2.1.9 Supermercados

Para revisar el sector de supermercados, nuevamente se consulta el inventario de GAET (2023), el que menciona que dentro del *retail*, los sistemas de refrigeración se encuentran como vitrinas, vitrinas de pisos, unidades condensadoras remotas que alimentan islas de frío entre otros. Los equipos utilizados en este sector son muy similares a los de centros de distribución y logísticos, es decir, existen los sistemas centralizados, modulares e independientes, con la diferencia que se encuentran asociados a salas de ventas y trastienda.

GAET (2023) realiza la distinción entre sistemas directos e indirectos. Por un lado, los sistemas directos se caracterizan porque el refrigerante circula desde la sala de máquinas hasta la sala de ventas, posteriormente, el refrigerante se evapora en los intercambiadores de calor de las vitrinas y regresa en forma de vapor a los racks. Otro diseño de supermercado, conocido como sistema de refrigeración distribuida, emplea una serie de racks de compresores separados, los cuales se colocan cerca de las vitrinas en lugar de utilizar un sistema centralizado.

Por otro lado, los sistemas indirectos incluyen sistemas de circuito secundario y refrigeración en cascada. Estos sistemas enfrían un fluido secundario, que se distribuye por toda la tienda hasta las vitrinas.

Nuevamente en el inventario realizado por GAET (2023) no es posible determinar con certeza el tipo de equipo predominante. Sin embargo, a partir de antecedentes recogidos en estudios anteriores realizados por GreenLab Dictuc (2017) y las entrevistas realizadas en el marco de este estudio se determinó que los equipos que predominan son Tipo II y III. Si en un supermercado predominan los Tipo II o III dependerá en gran medida de las dimensiones del supermercado.

3.2.1.10 Grandes superficies comerciales

El sector de grandes superficies comerciales incluye establecimiento como hoteles, aeropuertos, strip center, centros comerciales, malls y centros asistenciales. El inventario sectorial desarrollado por Santander (2023) busca caracterizar los sistemas típicamente utilizados y la carga de refrigerante contenida.

En primer lugar, para el subsector de hoteles, Santander (2023) revisa el “Reglamento de clasificación, calificación y registro de establecimientos de alojamiento turístico denominados hotel, motel y apart hotel”, del Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR) publicado en el diario oficial en diciembre del 2003, en donde se destaca que los aires acondicionados son exigibles solo en hoteles de 4 y 5 estrellas.

Según la consulta con diversos hoteles y proyectistas, Santander (2023) determinó que los sistemas más utilizados son chiller con tecnología de volumen de refrigerante variable (VRV o VRF por sus siglas al inglés).

En segundo lugar, el subsector de aeropuertos a nivel nacional cuenta con 16 establecimientos. En el caso del Aeropuerto Arturo Merino Benítez se consideran los 2 terminales que operan, por lo tanto, en total son 17 establecimientos. Santander (2023) menciona que, según la información de proveedores, se utilizan sistemas chiller, sin embargo, no se logra profundizar en el tipo de tecnología.

Respecto al subsector de *strip center*, centros comerciales y malls, Santander (2023) consultó a la Cámara Chilena de Centros Comerciales, dando cuenta de 278 centros comerciales a nivel nacional. Según consultas que el autor realizó a proveedores como LG y MIDEA, fue posible determinar que los equipos más utilizados en este tipo de recintos son los chiller, pero al igual que en el subsector de aeropuertos, no se logra profundizar ni realizar un análisis sobre el tipo de tecnología.

Dado que en ninguno de estos subsectores se menciona la carga por equipo y que, de forma similar a supermercados, la estimación del banco se hace a partir de un factor de carga por superficie, fue necesario consultar las fichas técnicas de los sistemas que se mencionan en el inventario de Santander (2023). A continuación, se enumeran las conclusiones extraídas de esta revisión:

- Hoteles: predominancia equipos Tipo I y II.
- Aeropuertos: predominancia equipos Tipo II y III.
- Malls, centros comerciales y strip center: predominancia equipos Tipo II y III.

3.2.1.11 Minería

En el caso del sector minería, que aborda desde la faena minera misma hasta empresas de servicios para minería, se consultó el inventario elaborado por Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023), el que cuantifica el uso de refrigerante en las tres aplicaciones detectadas dentro de la minería del cobre. Estas son climatización de cabinas de maquinaria minera, climatización en espacios habitables y refrigeración en salas eléctricas.

Respecto a la climatización de cabinas de maquinarias, Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023) consultan el Reglamento de Seguridad Minera promulgado en el Decreto 132/2004 del Ministerio de Minería, en donde se establecen ciertas condiciones mínimas que deben cumplir las cabinas de maquinarias, entre las que se encuentran la “climatización de acuerdo a las condiciones del lugar de trabajo” y “buenas condiciones de sellado para evitar filtraciones de polvo y gases. Si es preciso se deberán considerar sistemas de presurización y acondicionamiento de aire”.

En base a lo anterior, las autoras estas maquinarias se usan tanto en minería subterránea como superficial (rajo abierto) y que por cada máquina que deba ser operada por una persona, hay un sistema de aire acondicionado asociado. El principal refrigerante utilizado dentro de la climatización de cabinas de maquinarias, de acuerdo con las entrevistas realizadas por Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023), es el HFC-134a.

En segundo lugar, dentro de la minería existe la climatización de espacios habitables, que son todos aquellos espacios en donde se realizan actividades de descanso, alimentación, entretención o trabajo. Estos espacios deben estar climatizados en función de lo indicado en el Decreto 594/2000 del Ministerio de Salud y el Decreto 132/2004 del Ministerio de Energía. Estos decretos establecen rangos de temperatura para garantizar el bienestar y *comfort*, por lo que las autoras asumen que la totalidad de estos espacios se encuentran climatizados. En base a la recopilación de información a partir de las entrevistas, se establece que los refrigerantes que predominan son el R-410A y R-407C.

Por último, en cuanto a la refrigeración de salas eléctricas, Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023) mencionan que en estas se almacenan diversos artefactos como paneles de control, variadores de frecuencia, contactores y sistemas eléctricos vinculados a los procesos de la minería. Unos de los equipos típicamente utilizados son los tipo Split en los que predomina el uso de R-410A y R-407C.

Al analizar cada una de estas sub-aplicaciones del sector minero, se tiene que en los usos para climatización, es decir, en equipamiento minero y climatización de espacios habitables, en el primer caso la carga por equipo puede variar entre 1,6 a 3,5 kg, por lo que predominan los equipos Tipo I y II, mientras que en espacios habitables, en base a las entrevistas realizadas por Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023) se determinó una carga estimada de 0,8 kg por equipo, por lo que predominan los equipos Tipo I.

Por último, en salas eléctricas, las autoras determinaron que las cargas contenidas en los equipos típicamente utilizados en esta sub-aplicación varían entre 0,8 a 3 kg. Sin embargo, en base a los nuevos antecedentes recopilados en el marco de este estudio, se determinó que las salas eléctricas podrían tener necesidades de refrigeración muy superiores a lo estimado, del orden de 3 millones de BTU para aquellas salas subterráneas, por lo que es posible suponer que también existen salas con equipos Tipo III.

3.2.2 Revisión de normativa internacional

Con el objetivo de entender cómo se identifican y regulan los grandes usuarios de HFCs en otros países, se revisaron tres normativas:

- i.) Ley de Innovación y Fabricación de Estados Unidos del 2020
- ii.) Reglamento de la Unión Europea (UE) N° 517/2014
- iii.) Reglamento de la Unión Europea (UE) N° 573/2024

En primer lugar, la Ley de Innovación y Fabricación de Estados Unidos (2020) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas al inglés), mediante la cual se logra establecer un marco regulatorio para la producción y consumo de HFC. Esta Ley autoriza a la US-EPA a regular los HFCs, para lo que entrega autoridad en tres áreas principales: reducir gradualmente la producción y el consumo de ciertos HFCs; gestionar estos HFCs y sus sustitutos; y facilitar la transición a tecnologías de nueva generación a través de restricciones basadas en sectores.

Se establece una línea base para la producción y consumo, la cual se determinan a partir de promedios anuales durante los periodos de 2011 a 2013, junto con un porcentaje extra a partir de los niveles de producción y consumo de HFC y CFC desde 1989. Luego, a partir de esta línea base, se plantea reducir la producción y el consumo en un 85% con respecto a la línea base, mediante objetivos de progresivos de producción y consumo, como se muestra en la Tabla 3-10.

Tabla 3-10 Objetivos de progresivos de producción y consumo de HFC definidos en la Ley de Innovación y Fabricación de Estados Unidos

Años	Porcentaje de la línea base de producción (%)	Porcentaje de la línea base de consumo (%)
2020-2023	90	90
2024-2028	60	60
2029-2033	30	30
2034-2035	20	20
2036 en adelante	15	15

Fuente: Elaboración propia a partir de (US-EPA, 2020)

El mecanismo establecido para lograr estas reducciones es un programa de intercambio y asignación de permisos. Para poder producir o consumir HFC, las diferentes entidades tienen que

contar con permisos asignados por la US-EPA. No pueden exceder la cantidad de HFC producidos o consumidos sin tener el número correspondiente de permisos. Se deben presentar informes anuales al Administrador de la US-EPA, detallando las cantidades de HFC involucradas en las actividades. A modo de ejemplo, la distribución de asignaciones de HFC para aplicaciones específicas para 2023 fue:

- Misiones militares críticas: 46,3%
- Semiconductores: 35,0%
- Inhaladores: 13,6%
- Aerosoles de defensa: 3,4%
- Espuma para uso estructural: 1,6%

Los permisos pueden ser transferidos entre entidades, permitiendo un sistema de comercio que facilita el cumplimiento.

En segundo lugar, se revisó el Reglamento de la Unión Europea (UE) N° 517/2014 del Parlamento Europeo y del Consejo, que aborda la regulación de los gases fluorados de efecto invernadero. El objetivo principal de este reglamento es reducir las emisiones de gases fluorados de efecto invernadero en la UE para limitar el cambio climático y sus efectos negativos, y cumplir con los objetivos climáticos establecidos. Este reglamento establece:

- normas sobre contención, uso, reparación y destrucción de estas sustancias;
- condiciones de comercialización de productos y aparatos que las contengan;
- condiciones de usos específicos de estas sustancias, y
- límites cuantitativos para la comercialización de HFCs.

Dentro de las medidas principales planteadas en esta regulación se encuentran las medidas de contención para evitar fugas y garantizar el mantenimiento adecuado de los equipos que contienen gases fluorados. Con estas se busca promover el uso de tecnologías alternativas que sean seguras, energéticamente eficientes y que tengan un impacto menor o nulo sobre el clima.

Respecto al cumplimiento, se establece la necesidad de mantener registros detallados de los aparatos que contienen gases fluorados y de fomentar la responsabilidad del productor para asegurar el manejo adecuado de estos gases al final de la vida útil de los productos.

También se establece la prohibición de comercialización de los aparatos mencionados en su Anexo III:

- Sistemas no confinados de evaporación directa que contienen HFC y PFC como refrigerantes, a partir de julio de 2017.
- Aparato de protección contra incendios que contienen HFC-23, a partir de enero de 2016.
- Recipientes no recargables para gases fluorados de efecto invernadero usados para revisar, mantener o cargar aparatos de refrigeración, AA, bombas de calor, etc., a partir de julio de 2007.

- Frigoríficos y congeladores domésticos que contengan HFC con un PCA⁶ ≥ 150 , a partir de enero de 2015.
- Aparatos fijos de refrigeración que contengan HFC con un PCA ≥ 2500 , excepto los aparatos diseñados para aplicaciones destinadas a refrigerar productos a temperaturas inferiores a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, a partir de enero 2020.
- Centrales frigoríficas multicompresor compactas para uso comercial con una capacidad valorada igual o superior a 40 kW, que contenga gases fluorados de efecto invernadero con un PCA ≥ 150 , excepto en los circuitos refrigerantes primarios de los sistemas en cascada, en que pueden emplearse fases con un PCA < 1500 , a partir de enero de 2022.
- Entre otros productos y aparatos.

En cuanto al control de fugas, se define que los operadores de aparatos que contengan gases fluorados de efecto invernadero en cantidades $\geq 5\text{ ton CO}_{2\text{eq}}$ velarán por que dichos equipos sean objeto de control de fugas. Para esto, se establecen frecuencias de control de fugas dependiendo de la carga y exenciones bajo determinadas condiciones, y se establece que los operadores de aparatos que deban someterse a controles de fuga velarán por que, en caso de reparación, los aparatos sean revisados por personas físicas certificadas⁷ en conformidad con lo que indica el Reglamento.

En cuanto al control de uso, se prohíbe el uso de sustancias con PCA ≥ 2500 para el mantenimiento de aparatos que usen refrigerantes, aplicable a aparatos que usen una carga equivalente a 40 ton de CO_{2eq} o más.

En este reglamento se señala que la reducción gradual de las cantidades de HFC que pueden comercializarse es la forma más efectiva y rentable de reducir las emisiones de estas sustancias en el largo plazo. Para esto se establece un sistema de cuotas para reducir gradualmente las cantidades de HFC que se pueden comercializar en la Unión Europea, lo que implica la asignación de cuotas individuales a productores e importadores, basándose en las cantidades de HFC comercializadas durante cierto periodo. Esto asegura que las empresas puedan continuar sus operaciones en función de los volúmenes medios comercializados en esos años.

La asignación de cuotas corresponde al siguiente procedimiento:

1. A cada empresa se le establece un valor de referencia —línea base—, el cual corresponde a la media anual de HFC que haya notificado haber comercializado entre el periodo que va desde el 2009 al 2012.

⁶ Potencial de calentamiento atmosférico, equivalente al término PCG, potencial de calentamiento global, o GWP por su sigla en inglés.

⁷ La Cámara Chilena de Refrigeración y Climatización (CChRyC) ofrece diferentes certificaciones para los técnicos de este rubro. Entre los más importantes se encuentran instalador(a)/mantenedor(a) de equipos de climatización y refrigeración, instalador(a) de sistemas de climatización, instalador(a) de sistemas de refrigeración, mantenedor(a) de sistemas de climatización, mantenedor(a) de sistemas de refrigeración y operador(a) de sistemas de refrigeración con amoníaco.

2. Cada empresa a la que se le asignó un valor de referencia, su cuota corresponde al 89% del valor de referencia multiplicado por el porcentaje que se indica en la Tabla 3-11 para el año que corresponda.

Tabla 3-11 Porcentajes para obtener la cuota máxima de HFC que se puede comercializar por año

Años	Porcentaje para calcular la cuota máxima de HFC (%)
2015	100%
2016-2017	93%
2018-2020	63%
2021-2023	45%
2024-2026	31%
2027-2029	24%
2030	21%

Fuente: Elaboración propia en base al Reglamento de la UE (2014).

En Anexos se entrega mayor detalle de este procedimiento, que se define en tres fases:

- Fase 1: cada empresa recibe una cantidad que corresponde a lo solicitado en su declaración, sin embargo, no puede ser más que una parte proporcional de lo que se debe asignar en esta fase. La parte proporcional, se calcula dividiendo 100 entre la cantidad de empresas que presentaron una declaración. Se suma el total de asignaciones de esta fase (las solicitadas por las empresas), y se resta del total que se debe asignar en esta fase, en donde el resto se asigna a la siguiente fase.
- Fase 2: cada empresa que no recibió el total solicitado en la fase anterior recibe una asignación adicional la que corresponde a la diferencia entre la cantidad solicitada y la cantidad que se obtuvo en la Fase 1, sin embargo, esta no debe superar la parte proporcional de lo que se debe asignar en esta fase. La parte proporcional, se obtiene dividiendo 100 entre el número de empresas que obtienen esta asignación adicional. Se suma el total de asignaciones de esta fase, y se resta del total que se debe asignar en esta fase, en donde el resto se asigna a la siguiente fase.
- Fase 3: se repite la fase 2 hasta satisfacer todas las solicitudes o hasta que la cantidad restante por asignar sea inferior a 500 toneladas de CO₂ equivalentes.

Para mantener la flexibilidad en el mercado de los HFC, las cuotas asignadas pueden ser transferidas entre productores e importadores dentro de la Unión Europea. Esto permite a las empresas gestionar mejor sus necesidades comerciales y operativas.

Cuando los HFC se encuentran en aparatos que no se han comercializado antes de ser cargados, es necesaria una declaración de conformidad para acreditar que estos HFC se contabilizan dentro del sistema de cuotas de la Unión Europea. Esta medida asegura que todas las cantidades de HFC estén adecuadamente reguladas y controladas dentro del sistema de cuotas.

Por último, se realizó una revisión del Reglamento de la Unión Europea (UE) N° 573/2024 del Parlamento Europeo y del Consejo, en el que se deroga el Reglamento de la Unión Europea (UE) N° 517/2014.

Este nuevo reglamento establece objetivos actualizados para poder cumplir con los acuerdos asumidos, en especial, respecto al Acuerdo de París, en donde la UE aumentó su contribución inicial para el año 2030 pasando de una reducción de gases de efecto invernadero de al menos el 40% hasta al menos el 55% de reducción de dichos gases. En base a lo recién mencionado, es que al realizar una evaluación del Reglamento de la Unión Europea (UE) N° 517/2014, los objetivos propuestos no se alcanzarían de manera plena.

Existen variadas definiciones que se abordan, una de las más importante, que compete para la realización del presente informe, es la de “establecimiento de la Unión”. Se menciona que establecimiento de la Unión, tiene relación con la persona física, es decir, que esta tenga su residencia habitual en la Unión y en relación con una persona jurídica, lo que refiere a que la persona tenga un “establecimiento comercial permanente” en la Unión respecto al artículo 5, punto 32 del Reglamento UE 952/2013. Al consultar este último reglamento, se define como “establecimiento comercial permanente” a aquel centro de actividades fijo, en el que se encuentran de manera permanente los recursos humanos y técnicos necesarios; y a través del que se realizan ya sea en parte o en su totalidad, las operaciones aduaneras de una persona.

Otros de los puntos que resulta interesante de abordar es lo que se explica en el Anexo VIII sobre las cantidades máximas y cálculo de los valores de referencia. Se establece una línea base del 2015, en donde la cantidad máxima se fija en 176.700.479 ton CO_{2eq}. La cantidad máxima para los siguientes años se muestran en la Tabla 3-12.

Tabla 3-12 Cantidad máxima de HFCs en toneladas de CO_{2eq} a partir de la línea base

Años	Cantidades máximas (ton CO _{2eq})
2025-2026	42.874.410
2027-2030	21.665.691
2030-2032	9.132.097
2033-2035	8.445.713
2036-2038	6.782.265
2039-2041	6.136.732
2042-2044	5.491.199
2045-2047	4.845.666
2048-2049	4.200.133
A partir del 2050	0

Fuente: Elaboración propia en base al Reglamento UE 573/2024.

Los valores de referencias, se asignarán de la misma modalidad que implementa el Reglamento UE 517/2014, y la asignación de cuotas se implementa como se explica a continuación.

1. Asignación de cuotas a empresas con valores de referencia: Cada empresa con un valor de referencia recibe una cuota, que se calcula como:
 - 89% del valor de referencia, multiplicado por la cantidad máxima del año, dividido por la base de 176.700.479 toneladas de CO₂ eq.
 - A partir de 2027, la cuota se multiplica por un factor de 0,85.
 - A partir de 2030, la cuota se ajusta en función de la cantidad máxima de 2025. Si la asignación total excede la cantidad máxima, las cuotas se reducen proporcionalmente.
2. Asignación de cuotas a empresas sin valores de referencia: La suma total de las cuotas asignadas en el punto 1 se resta de la cantidad máxima para el año en cuestión, determinando así una reserva. Las empresas que presenten una declaración reciben una cuota proporcional de esa reserva, calculada dividiendo 100 entre el número de empresas que presentaron la declaración.

En resumen, ninguna de las dos normativas define gran usuario o los desagrega. Por un lado, la normativa estadounidense identifica cinco aplicaciones de sustancias HFCs (misiones militares, semiconductores, inhaladores, aerosoles de defensa y espuma para uso estructural) y asigna permisos de consumo a las industrias asociadas a estas aplicaciones. Por otro lado, las normativas europeas más bien identifican equipos con características determinadas para regularlos y de forma similar a la normativa estadounidense, establece un sistema de permisos y cuotas que las empresas pueden utilizar.

3.2.3 Propuesta de desagregación de grandes usuarios: criterios seleccionados

En base a los antecedentes recopilados de la investigación propia, el análisis de normativas internacionales y los inventarios sectoriales, se determinó que para desagregar a los grandes usuarios de sustancias refrigerantes son útiles cuatro categorías de clasificación:

1. Sector económico: industrial, comercial o transporte.
2. Aplicación: clima o refrigeración.
3. Tipo de equipo: I, II y III.
4. Naturaleza: fija o móvil.

En primer lugar, el sector económico al que el establecimiento corresponde habla de las características que podría tener el establecimiento mismo y el tipo de sistema o tecnología que usan. Si es un establecimiento industrial, lo más probable es que los sistemas de frío se asocien a procesos y maquinarias con las que quienes las operan deben interactuar. Si es un establecimiento comercial, se podría esperar que más bien estén asociados a sistemas estacionarios con características similares. En el caso de transporte, que, si bien se usó para clasificar sectores no incluidos en el estudio, los sistemas estarán típicamente acoplados a contenedores montados en vehículos de gran tamaño

En segundo lugar, el criterio de aplicación, referido a la necesidad de climatización, refrigeración y en algunos casos ambas, habla de los tipos de sistemas que se usan y de la temperatura en la que típicamente operan. En general los sistemas de climatización operan alrededor de los 25°C de manera estable, mientras que las temperaturas de operación de refrigeración varían entre los -40 °C hasta los 25 °C en algunas sub-aplicaciones específicas. En el caso de que un sector sea clasificado en “ambos” se debe a que ambas necesidades son igualmente importantes, como es el caso de supermercados, en que en trastienda, vitrinas y similares se utilizan sistemas de refrigeración y en la sala de ventas se utiliza climatización.

El tipo de equipo, referido a la clasificación según carga propuesta en la NCh 3231:2017, se utiliza con el objetivo de determinar qué tan distribuida está la carga de un gran usuario entre la suma de sus sistemas o equipos. Esto, sumado a la estratificación de los sectores, permitiría identificar grandes usuarios que abarcan numerosos establecimientos o fuentes con pequeñas cantidades de carga versus establecimientos o fuentes que, si bien no son numerosos en cantidad, poseen grandes cargas en sus sistemas o equipos. Cabe mencionar que, debido a que en un mismo establecimiento pueden coexistir tipos de sistemas, al momento de clasificar según tipo, se habla de predominancia de equipos según la carga alojada por cada uno.

Otras categorías que se barajaron para desagregar grandes usuarios fueron las sub-aplicaciones propuestas por IPCC (2006) y la estacionalidad que presentan ciertas actividades, como el procesamiento de ciertas frutas de estación en el sector hortofrutícola o el uso de aires acondicionados en verano.

En el primer caso, se encontró que las sub-aplicaciones, si bien son útiles al momento de diagnosticar distintos usos en la actividad económica de un país, no son capaces de abarcar la complejidad de algunos subsectores. Un ejemplo de esto es el subsector de equipamiento minero que, si bien constituye parte esencial de un proceso industrial, no podría decirse que corresponde a esta sub-aplicación debido a que el objetivo de la climatización en este caso es asegurar el *comfort* del operador/a de la maquinaria. Así mismo, tampoco podría decirse que corresponde la sub-aplicación de transporte de pasajeros, pues no es el objetivo del funcionamiento de estas máquinas.

Adicionalmente, la clasificación según sub-aplicaciones impediría diferenciar el tipo de tecnologías y sistemas presentes en, por ejemplo, sectores como el vitivinícola de los centros de distribución y logística refrigerados. Si bien, ambos serían considerados sectores que requieren la sub-aplicación de procesos industriales (esta incluye almacenamiento) y aplicación de refrigeración, se desenvuelven en sectores distintos de la economía (ver Tabla 3-13). Los sectores vitivinícolas, helados, faenadoras y otros desarrollan procesos industriales para los que requieren maquinarias que procesan materia prima y la llevan a las temperaturas necesarias (túneles, túneles verticales, cámara, antecámaras, cubas, entre otros), los sistemas utilizados en centros logísticos o de distribución refrigerados cumplen con la función de mantener la cadena de frío y, por ende, en general, usan sistemas centralizados estacionarios.

Tabla 3-13 Ejemplo de clasificación de sectores según sector económico, aplicación y sub-aplicación

Sector o subsector	Sector económico	Aplicación	Sub-aplicación
Industria vitivinícola	Industrial	Refrigeración	Procesos industriales
Sector Helados			
Faenadoras			
Frutas y hortalizas congeladas			
Carne de cerdo y ave			
Cecinas			
Centro logístico refrigerado Tramo 1	Comercial		
Centro logístico refrigerado Tramo 2			
Centro logístico refrigerado Tramo 3			
Centro de distribución refrigerado Tramo 4			

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al criterio de estacionalidad, se consideró que, si bien es un criterio útil para indicar momentos de óptima fiscalización de establecimientos o fuentes, no constituye un indicador del tipo de maquinarias, tecnologías o tamaño de los sistemas a considerar. Por lo que también fue excluido.

En base a los criterios antes propuestos las categorías quedarían como se muestra en la Figura 3-2. La clasificación exacta de cada subsector se observa en la Tabla 3-14.

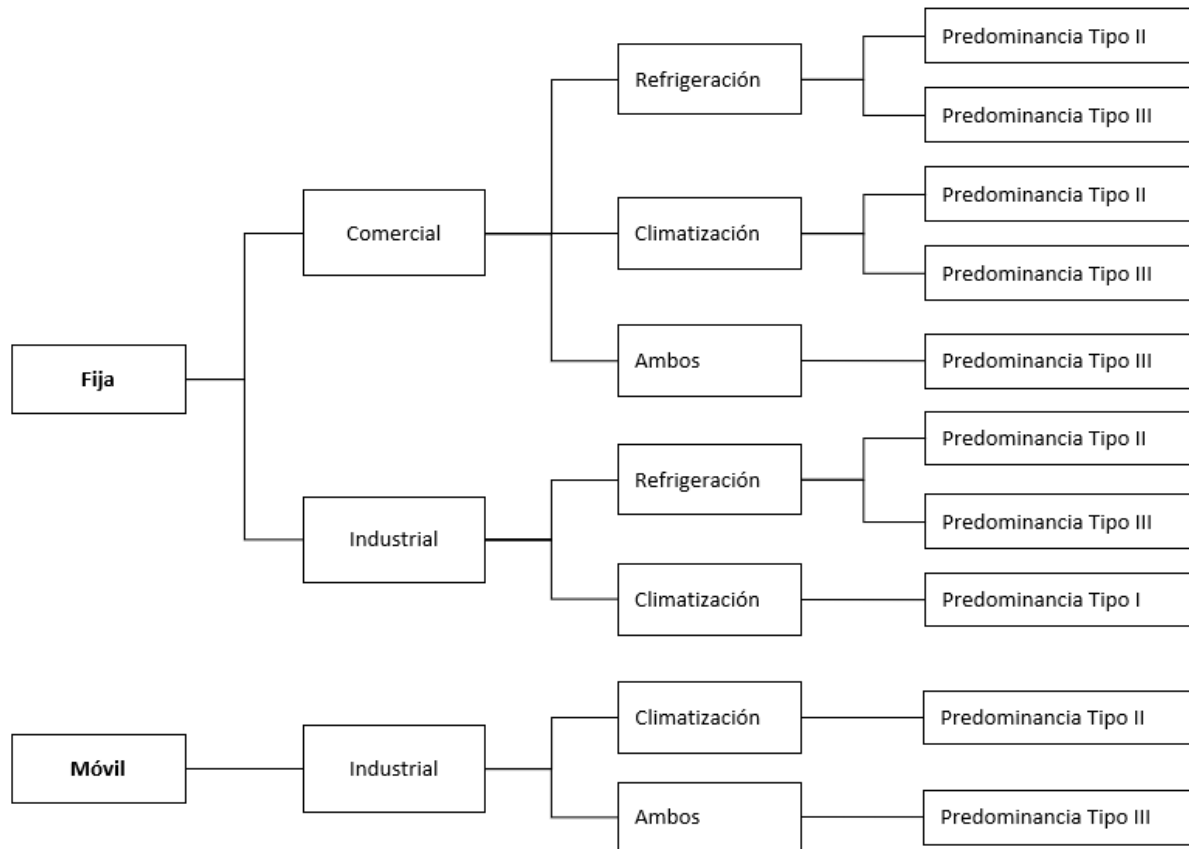


Figura 3-2 Árbol de clasificación de grandes usuarios según criterios propuestos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-14 Clasificación por sectores y subsectores

Naturaleza	Sector económico	Aplicación	Equipo predominante	Sector
Fija	Comercial	Refrigeración	Predominancia Tipo II	Centro logístico refrigerado Tramo 1
				Centro logístico refrigerado Tramo 2
			Predominancia Tipo III	Centro logístico refrigerado Tramo 3
				Centro de distribución refrigerado Tramo 4
		Climatización	Predominancia Tipo II	Hoteles
				Recintos de salud de atención primaria
			Predominancia Tipo III	Aeropuertos
				Malls
				Recintos de salud hospitalarios
		Ambos	Predominancia Tipo III	Supermercados
	Industrial	Refrigeración	Predominancia Tipo II	Productores primarios
			Predominancia Tipo III	Hortofrutícola
				Pesca de altamar-Bodegas
				Sector acuícola pesquero
				Industria Láctea Mayor
				Industria Láctea Menor
				Industria vitivinícola
				Frutas y hortalizas congeladas
				Faenadoras
				Carne de cerdo y ave
				Cecinas
				Sector helados
				Salas eléctricas minería
		Climatización	Predominancia Tipo I	Espacios habitables minería del cobre
Móvil	Industrial	Climatización	Predominancia Tipo II	Equipamiento minero
		Ambos	Predominancia Tipo III	Barcos factoría
	Transporte	Industrial	Predominancia Tipo II	Transporte refrigerado
		Climatización	Predominancia Tipo II	AA móvil (automóviles)
		Ambos	Predominancia Tipo III	Armada
				Pesca de altamar – Barcos
				Marina mercante

Fuente: Elaboración propia

3.3 Entrevistas a actores relevantes

Para caracterizar de mejor manera el mercado de grandes usuarios de sistemas de refrigeración, se realizaron entrevistas semiestructuradas a actores relevantes. Para esto, se elaboraron pautas para todos los sectores con el fin de obtener una guía a la hora de realizar las entrevistas. Los sectores en los que se hizo énfasis en la búsqueda de contactos de actores relevantes son el sector hortofrutícola, alimentos congelados, centros de distribución, recintos hospitalarios, hoteles, industria de la carne, sector lácteo, malls, sector minero, sector naviero, supermercados, sector vitivinícola y “otros” que incluyen las empresas de construcción de sistemas de frío, empresas de mantención de sistemas de frío y empresas de gestión de ResPel o reciclaje/recuperación de HFCs. Las pautas fueron validadas con la contraparte técnica de manera previa a la realización de las entrevistas. Estas se pueden revisar en el anexo digital, en la carpeta “Pautas entrevistas”.

A modo de síntesis, dentro de las preguntas más importante destacan las siguientes:

- ¿De qué sectores son sus principales clientes?
- ¿Qué tipo(s) de sistema de climatización/refrigeración tienen/instalan? (ejemplo: Aire Acondicionado Split Muro, Compacto, Rooftop, etc.)
- En su experiencia, ¿cuáles son las causas típicas que llevan a que sea necesaria una mantención?
- En su experiencia, ¿cuáles son las causas típicas que llevan a la fuga de refrigerantes?
- ¿Qué protocolos se siguen en caso de fuga?
- ¿Hay protocolos o formas de evitar la fuga de refrigerantes?
- ¿Con qué frecuencia se hace mantención por fuga/recarga?
- Si se tuviesen que cambiar el tipo de refrigerantes que se usan en la industria ¿qué costo tendría modificar los sistemas para que sean compatibles con otros refrigerantes?
- ¿Instalan/tienen equipos Tipo III? (un equipo tipo III es aquel que contiene más de 40 kg de refrigerante a alta presión y que está clasificado como A1, es decir, que no son ni inflamables ni tóxicos).
- ¿Cuál cree que sea la tendencia a futuro con respecto al uso de refrigerantes?
- ¿Cuál crees que son los beneficios de controlar el uso y fuga de refrigerantes?
- ¿Qué formas de fiscalización podrían existir para evitar las fugas?
- ¿Cree que al controlarse el uso de refrigerantes su empresa podría ser más competitiva si es que maximiza su eficiencia para su uso?

La lista de contacto se generó a partir de base de datos de informes anteriores de GreenLab, contactos provistos por la contraparte técnica y contactos obtenidos por el equipo consultor.

A la fecha de este informe, se realizaron 23 entrevistas a actores que entregaron antecedentes relevantes para el estudio; este valor no considera todos los contactos realizados que no permitieron recopilar información, ni los intentos de contacto que no tuvieron respuesta. En el caso de entrevistas programadas como videollamada, se invitó a la contraparte técnica para su participación. Sin perjuicio de lo anterior, la mayoría de las entrevistas se lograron por vía

telefónica y en menor medida por videollamada El detalle de la cantidad de entrevistados por sector o servicio se muestra en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15 Cantidad de entrevistados por sector o servicio

Sector o servicio	Cantidad de entrevistados
Hortofrutícola	2
Naviero	1
Lácteo	0
Hospitales	2
Vitivinícola	1
Alimentos congelados	0
Centro de distribución	0
Supermercados	2
Climatización grandes superficies comerciales	0
Minero	1
Instalación y mantención de sistemas de refrigeración	13
Empresas de recuperación	1
Total	23

Fuente: Elaboración propia

Las minutas de las 23 entrevistas realizadas se encuentran disponibles en el Anexo Digital, en la carpeta “Minutas entrevistas”.

Los antecedentes destacados que se obtuvieron a partir de la recaudación de información de las entrevistas se presentan en la Tabla 3-16.

Tabla 3-16 Antecedentes destacados recopilados en las entrevistas realizadas

Temática	Antecedentes destacados
Causas de fugas y recambios	Las principales causas de fugas son falta de mantención, falta de limpieza, instalación deficiente de cañerías (tuercas mal puestas, soldaduras mal hechas) y roce de las cañerías lo que lleva a que se rompan.
	Muchos técnicos reconocen liberar el refrigerante cuando reparan una fuga, si es que quedara cuando llegan.
	Se indica que el HFC-134a se "descompone" y deja de funcionar, a pesar de que no se haya fugado, lo que representa un constante cambio de refrigerante.
	Se menciona que la mejor práctica para evitar fugas es hacer mantenciones preventivas. De hecho, en el sector de minería se indicó que desde que se implementó un plan de mantenciones preventivas, ya casi no hay fugas ni fallas de equipos.
	Los técnicos independientes indican que las mantenciones preventivas periódicas benefician al cliente con ahorros energéticos significativos (en un caso se menciona que la cuenta de luz se ha llegado a reducir a la mitad), el equipo trabaja menos tiempo, y así los beneficios van al bolsillo del cliente.

Temática	Antecedentes destacados
Beneficios del control de uso y de fugas	Los beneficios que se perciben de controlar el uso y fuga de refrigerantes son principalmente económicos por menor consumo y menos reparaciones. También se perciben beneficios ambientales. En general los técnicos están conscientes de los impactos ambientales de refrigerantes, ya sea en el daño a la capa de ozono o como potencial de calentamiento global.
Motivos para no recuperar	Los motivos para no recuperar son que el costo de las recuperadoras y de invertir en cilindros o bombonas para almacenar lo recuperado es alto. Otro motivo que se repite es que la empresa que recicla se encuentra a una gran distancia de la empresa o técnico independiente. Algunos entrevistados mencionan que, aunque recuperen o reciclen, no reciben algún tipo de certificación. Respecto a los técnicos independientes, señalan que si se quisiera recuperar no tendría espacio para almacenarlo y, aunque tuviesen el espacio en sus hogares, creen que el almacenamiento representaría un riesgo para su familia. La mayoría de los técnicos no recupera, porque generalmente cuando llegan a reparar la fuga, ya se liberó todo el refrigerante. Algunos comentan que, si fuese posible atender una fuga a tiempo, sería posible recuperar.
Reemplazo de refrigerantes	Se indica que los equipos con R-407C están siendo reemplazados por los que usan R-410A. Al preguntar sobre la tendencia a futuro sobre el uso de refrigerante, se menciona algunos refrigerantes más “ecológicos” como el R-32 o el R-1234ze que está reemplazando algunos sistemas con HFC-134a. Respecto al R-32, algunos técnicos mencionan que se está cambiando hacia un refrigerante con menor impacto ambiental, en desmedro de la seguridad de las personas, ya que este tiene rasgos inflamables.
Nuevos antecedentes sistemas de climatización	Cuando se instalan sistemas de climatización, estos vienen con una longitud de cañería de fábrica, sin embargo, si esta longitud es menor a la requerida en la instalación y fuese necesario extender la cañería, se requiere una recarga extra de refrigerante sin que exista fuga previa.
Nuevos antecedentes sector minería	En minería existen salas eléctricas subterráneas que usan grandes cantidades de refrigerante para enfriar sistemas de poleas que transportan material hacia y desde la superficie. El refrigerante R-410 es el más utilizado, ha ido reemplazando al resto.

Fuente: Elaboración propia

Al respecto de la descomposición del HFC-134a, al consultar información técnica sobre este refrigerante, se encontró que los vapores se descomponen en condiciones de altas temperaturas, por llamas o calentadores de resistencia eléctrica⁸. Esto podría generar malos olores y compuestos tóxicos e irritantes. Lo anterior válida la experiencia declarada por la persona

⁸[https://www.freon.com/en/-/media/files/freon/freon-134a-push-bulletin.pdf?rev=299648e517aa4efda7674b2db8de0f3b#:~:text=Chemical%\[...\]drogen%20fluoride](https://www.freon.com/en/-/media/files/freon/freon-134a-push-bulletin.pdf?rev=299648e517aa4efda7674b2db8de0f3b#:~:text=Chemical%[...]drogen%20fluoride)

entrevistada (Ver Anexos Digitales – Entrevistas ID 7 y 15) y lleva a creer que, en las condiciones de operación de un automóvil, que podría llegar a estar a altas temperaturas, ya sea por el calor generado por el motor o la temperatura ambiental, también podría descomponerse. Respecto a esto último no se encontraron antecedentes.

Respecto a la toxicidad percibida del R-32 por parte de las personas entrevistadas (Ver Anexos Digitales – Entrevista ID 5), cabe mencionar que este refrigerante encuentra clasificado según la NCh 3241:2017 como A2, lo que implica que no es tóxico y posee una inflamabilidad menor.

Por otra parte, lo que refiere a la ampliación del sistema y por ende una recarga extra de refrigerante requerida (Ver Anexos Digitales – Entrevista ID 22), existen dos menciones al respecto. La primera es que, en el INGEl, se considera que el 80% de los equipos necesitan una ampliación, y para cumplir con los requerimientos del sistema, se necesitarían un 6,7% extra de refrigerante respecto a la carga inicial instalada. La segunda mención es de Chávez & Pérez (2020) quienes, en su inventario del sector pesquero y acuícola, proponen estratificar según el nivel de producción, bajo el supuesto de que empresas con igual capacidad productiva cuentan con equipos similares y, por ende, con cargas de refrigerante comparables. Sin embargo, los autores identifican que este supuesto no siempre se cumple, ya que cada empresa o planta, según sus necesidades, debe ampliar sus sistemas, lo que conlleva añadir refrigerante adicional que no estaba contemplado en la instalación inicial. Esto es especialmente relevante, ya que representa un factor que no siempre se considera en los inventarios revisados en el presente informe.

4. Diagnóstico de las emisiones de refrigerantes HFC en grandes usuarios

En esta sección, en primer lugar, en la Sección 4.1, se busca identificar las características por cada una de las categorías propuestas en la Sección 3.2.3, incluyendo la magnitud y distribución del banco por establecimiento y las tasas de mantención identificadas. Luego, en la Sección 4.2 presentan los inventarios de refrigerantes obtenidos por sector y categoría y por último, en la Sección 4.3 se profundiza en el análisis de los resultados obtenidos.

4.1 Fuentes emisoras de los grandes usuarios, según sector

En las secciones a continuación, se discute la información recopilada para cada sector en sus respectivos inventarios sectoriales, con el objetivo de analizar el comportamiento de los establecimientos de cada categoría e identificar las fuentes de emisión y el banco. Esto último, a pesar de no ser el propósito de esta sección, se incluye con el fin de dimensionar la tasa de fuga en relación con el banco. Pues, incluso si tenemos tasas de emisión similares entre los sectores, el impacto que tenga esa tasa será distinto dependiendo del tamaño del banco. Si se trata de un sector pequeño, una tasa de fuga equivalente en un sector grande sería menos preocupante. De forma análoga, si se trata de un sector pequeño, pero con grandes tasas de fuga, podría ser tan prioritario como un sector grande con bajas tasas de fuga.

Cabe mencionar, que, en algunos casos, fue necesario modificar algunos supuestos y cálculos de los inventarios sectoriales respectivos para obtener bancos y tasas de fuga corregidas. Lo anterior se detalla en la Sección 11.2. Además, en algunos casos, se encontró que, para determinados sectores, no es posible determinar la tasa de fuga solo en base a los inventarios sectoriales. Por lo anterior, en esos casos, se suman antecedentes recopilados en entrevistas hechas en el marco de este estudio, o alternatively, se propone utilizar las tasas reportadas en la Tabla 4-1 a modo de referencia, en base a lo indicado por (IPCC, 2006), estableciendo las similitudes correspondientes entre las categorías definidas en el presente informe y las del IPCC. Además, en la Ecuación 4-1, se muestra de forma resumida cómo se estiman las emisiones totales asociadas a un sistema de frío.

Tabla 4-1 Estimaciones para la carga, vida útil y factores de emisión en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado

Sub-aplicación	Factores de emisión (% de la carga inicial/año)		Emisión de fin de vida útil (%)	
Etapas	Emisión inicial (k)	Emisión durante la operación (x)	Eficiencia de recuperación ($\eta_{rec,d}$)	Resto de la carga inicial (p)
Refrigeración doméstica	$0,2 \leq k \leq 1$	$0,1 \leq x \leq 0,5$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Aplicaciones comerciales autónomas	$0,5 \leq k \leq 3$	$1 \leq x \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Refrigeración comercial mediana y grande	$0,5 \leq k \leq 3$	$10 \leq x \leq 35$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$50 < p < 100$
Transporte refrigerado	$0,2 \leq k \leq 1$	$15 \leq x \leq 50$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 50$
Refrigeración industrial incluido el procesamiento de alimentos y almacenamiento a baja temperatura	$0,5 \leq k \leq 3$	$7 \leq x \leq 25$	$0 < \eta_{rec,d} < 90$	$50 < p < 100$
Congeladores	$0,2 \leq k \leq 1$	$2 \leq x \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 95$	$80 < p < 100$
Aire acondicionado residencial y comercial, incluidas las bombas térmicas	$0,2 \leq k \leq 1$	$1 \leq x \leq 10$	$0 < \eta_{rec,d} < 80$	$0 < p < 80$
Aire acondicionado móvil	$0,2 \leq k \leq 0,5$	$10 \leq x \leq 20$	$0 < \eta_{rec,d} < 50$	$0 < p < 50$

Fuente: (IPCC, 2006).

En cuanto a las estimaciones de emisiones totales asociadas a un sistema de frío, de acuerdo con el IPCC (2006), estas pueden ser calculadas como la suma de las emisiones a lo largo de su vida útil (ver Ecuación 4-1). Las emisiones provenientes de los contenedores y de instalación, podrían asociarse a la emisión inicial (k) de la Tabla 4-1, las emisiones durante la operación podrían asociarse a las emisiones del mismo nombre (x), mientras que las emisiones de fin de vida útil dependerán de la eficiencia de recuperación $\eta_{rec,d}$ y el resto de la carga inicial (p). En las secciones a continuación, se reportan tasas de fuga recopiladas por los autores de los inventarios sectoriales, que en todos los casos están asociadas a la operación de los equipos.

Ecuación 4-1 Estimación de emisiones totales a lo largo de la vida útil de un sistema de frío

$$E_{total,t} = E_{contenedores,t} + E_{instalación,t} + E_{operación,t} + E_{fin\ vida\ útil,t}$$

Donde:

- $E_{total,t}$: emisiones totales para cada aplicación de refrigeración y aire acondicionado, para el año t.
- $E_{contenedores,t}$: emisiones relacionadas con la gestión de contenedores de refrigerante.
- $E_{instalación,t}$: emisiones fugitivas cuando se llenan los equipos nuevos por primera vez con una sustancia química o cuando se fabrica un producto de acuerdo con cada aplicación, para el año t.
- $E_{operación,t}$: emisiones por fugas o por difusión durante la fase de uso del producto o equipo (incluido el mantenimiento, para el año t).
- $E_{fin\ vida\ útil,t}$: emisiones cuando el equipo o producto llega al término de su vida útil y es desmantelado y eliminado, para el año t.

Para efectos del análisis, se referirá a las categorías propuestas con letras que van desde la A a la H, según indican los títulos de las secciones a continuación.

4.1.1 Categoría A: refrigeración industrial fija con predominancia de equipos Tipo III

Los usuarios clasificados en esta categoría, en donde la aplicación es refrigeración industrial fija, cuya carga se aloja predominantemente en equipos Tipo III, pueden encontrarse en los siguientes sectores y subsectores de la industria:

- Sector hortofrutícola, incluyendo frutas y hortalizas congeladas
- Industria láctea mayor y menor
- Industria de la carne, cecinas y faenadoras
- Industria vitivinícola
- Bodegas receptoras de la pesca de altamar
- Salas eléctricas de la minería
- Plantas de procesamiento del sector acuícola pesquero
- Producción de helados

El banco estimado para esta categoría se presenta en la Tabla 4-2 con un total de 4.892.300 ton CO₂ eq en donde el subsector hortofrutícola incluyendo las frutas y hortalizas congeladas abarca un 74% del banco total. El sector acuícola y las bodegas utilizadas en la pesca de altamar corresponden al 20% del banco total de CO₂ eq. Además, en esta categoría, dentro de los HFC's utilizados, predominan el R-507A y el R-404A, ambos con un potencial de calentamiento alto, 3.985 y 3.921, respectivamente. Resulta importante mencionar que el R-22 sigue siendo utilizado por algunos subsectores, sin embargo, según reportan los autores de los inventarios sectoriales correspondientes, corresponden a establecimientos con sistemas antiguos.

Tabla 4-2 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de refrigeración industrial fija con predominancia de equipos tipo III

Subsector	R-717 (kg)	R-22 (kg)	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-410A (kg)	R-32 (kg)	R-407C (kg)	R-438A (kg)	R-507A (kg)	Total banco (ton CO ₂ eq)*
Hortofrutícola	8.535.065	532.323	-	-	-	-	-	-	416.349	2.622.655
Frutas y hortalizas congeladas	231.548	34.500	-	283	-	-	-	-	231.548	986.274
Pesca de altamar - Bodegas	-	-	1.050	100.000	15.750	-	-	-	-	555.060
Acuícola	677.299	10.160	1.767	3.648	-	-	-	-	96.494	419.751
Sector helados	132.600	-	-	-	-	-	-	12	28.330	112.922
Sector vitivinícola	8.481	14.950	9.067	180	5.417	-	2.656	346	580	59.846
Faenadoras	118.934	2.074	602	4	-	-	1.874	-	8.533	41.959

Subsector	R-717 (kg)	R-22 (kg)	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-410A (kg)	R-32 (kg)	R-407C (kg)	R-438A (kg)	R-507A (kg)	Total banco (ton CO ₂ eq)*
Industria Láctea Mayor	10.893	1.707	139	580	405	-	234	-	4.346	24.142
Industria Láctea Menor	-	3.802	-	-	-	-	-	-	4.329	24.133
Salas eléctricas minería	-	-	-	-	10.520	-	-	-	-	21.961
Cecinas	71.925	1.983	-	-	-	-	-	-	2.248	12.548
Carne de cerdo y ave	335.623	4.297	-	-	-	-	-	-	821	11.049
Total	10.122.368	605.796	12.625	104.695	32.092	-	4.764	358	793.578	4.892.300

*Estimado en base a AR4

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-1 se observa la distribución del banco en términos de tonCO₂eq. Cabe notar que la mayoría de los establecimientos cuentan con un banco de menos de 3.000 tonCO₂eq y que existen *outliers* que sobrepasan las 50 mil tonCO₂eq. Para efectos del análisis, es importante observar cada sector por separado, de forma que sea posible identificar el comportamiento de esta masa crítica de establecimientos con menos de 3.000 tonCO₂eq. Cabe mencionar que los gráficos a continuación no son necesariamente representativos del universo de establecimientos que pertenecen a la categoría A, por lo que deben ser interpretados con precaución.

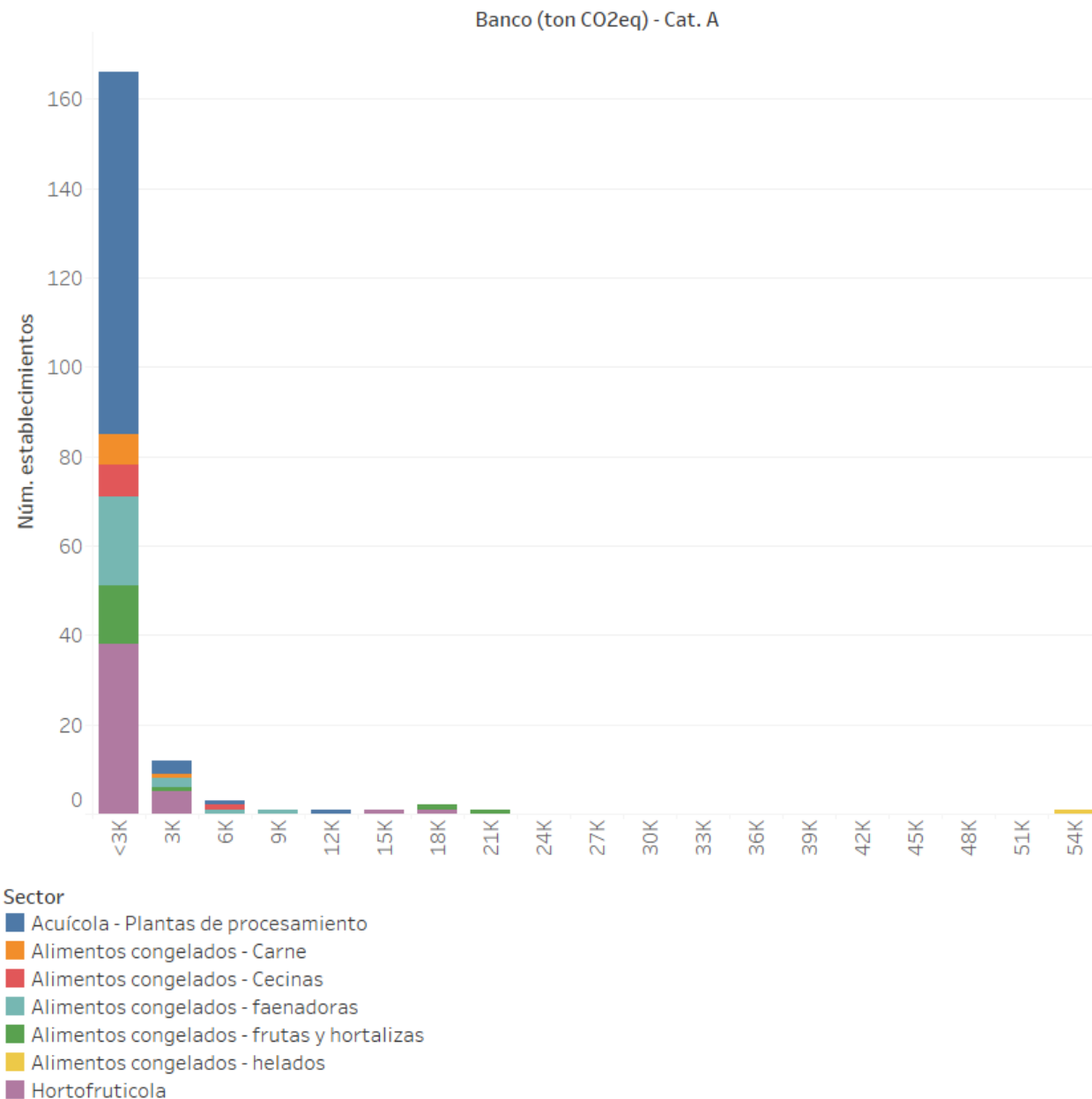


Figura 4-1 Histograma de banco (ton CO₂eq) establecimientos Categoría A por sector

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-2 se grafica la distribución de las tasas de mantención en los establecimientos pertenecientes a la categoría A. Es posible notar que la mayoría presenta tasas de mantención menores al 30%, sin embargo, existe un número no despreciable de establecimientos con tasas superiores al 100%. Es importante mencionar que en esta figura se incluyen las tasas para R-717, por lo que para profundizar este análisis para refrigerantes con PCG>0, en la Figura 4-3 se observa la distribución de las tasas de mantención por refrigerante, excluyendo el R-717. Sin embargo, el comportamiento no varía.

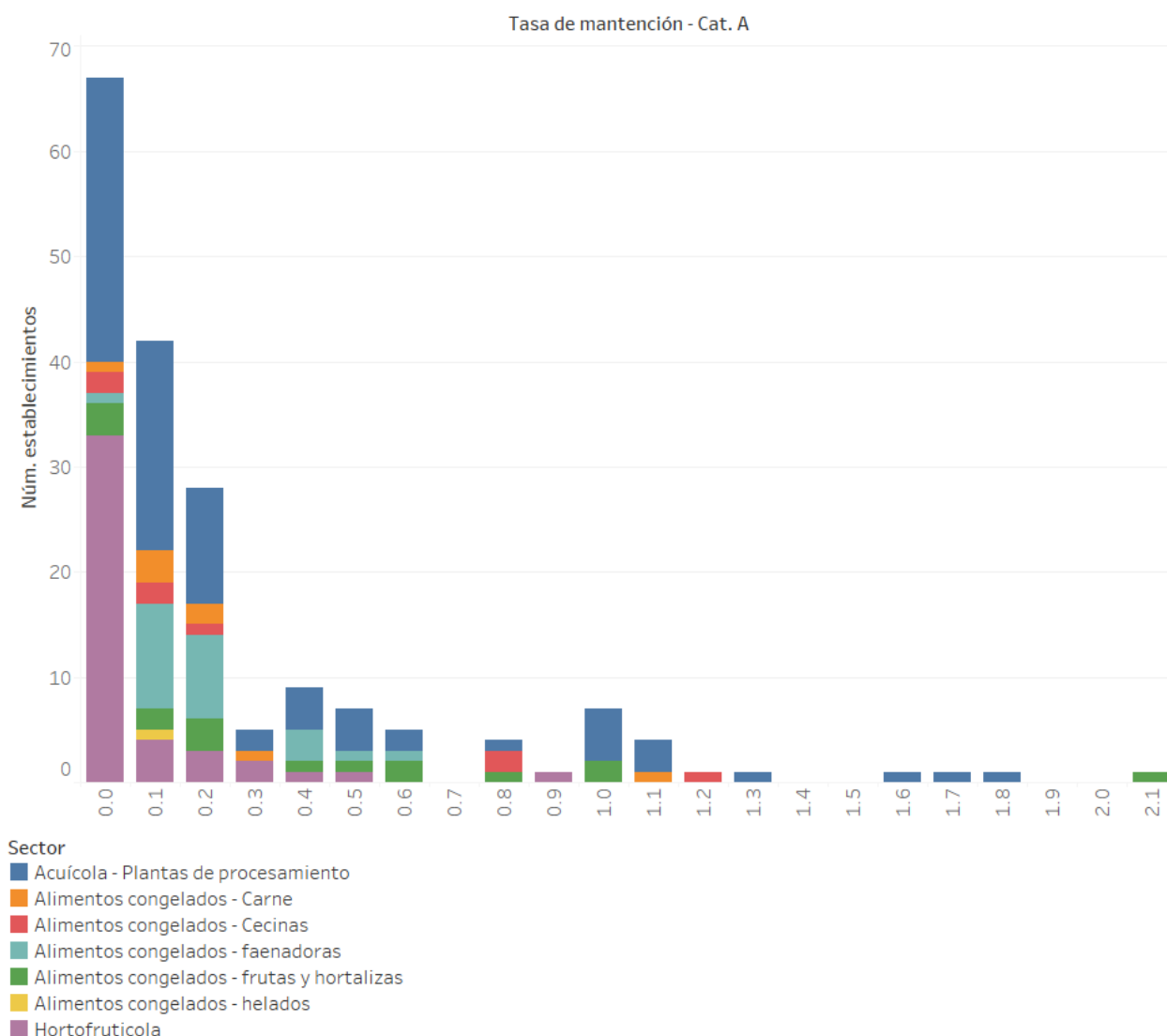


Figura 4-2 Histograma de tasa de mantención establecimientos Categoría A por sector

Fuente: Elaboración propia

Al revisar la Figura 4-3, respecto a la tasa de mantención por refrigerante, en donde se excluye el R-717, es posible notar que el R-404A y el R-507A poseen una tasa de mantención sobre el 100% en 9 establecimientos y en 4 establecimiento respectivamente. Resulta importante notar que el R-507A posee tasas de mantención en la mayoría de los rangos establecidos en la Figura 4-3, sin embargo, el R-404A se presenta entre los rangos de 0% a 30%, 50% a 70% y sobre 100%.

Respecto al R-22, presenta una tasa de mantención importante en casi todos los rangos, de hecho, son 10 los establecimientos que poseen una tasa entre el 20% y 30%, 5 los establecimientos que tienen una tasa sobre el 100%.

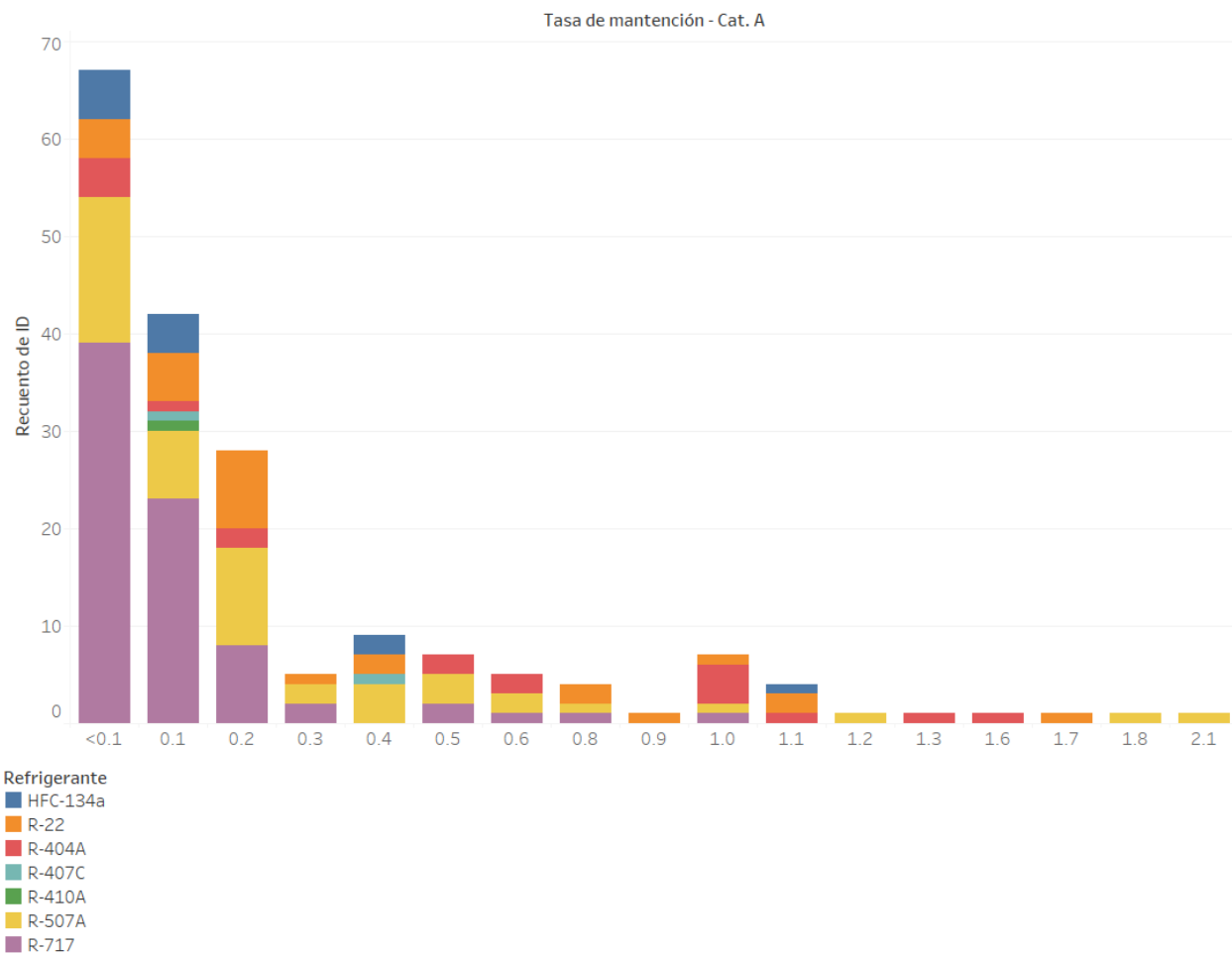


Figura 4-3 Histograma de tasa de mantención establecimientos Categoría A por refrigerante
Fuente: Elaboración propia

Al observar la Figura 4-4 que grafica la relación entre la tasa de mantención y banco de establecimientos de la categoría A, es posible notar una relación inversa entre las tasas y el tamaño del banco. Es decir, mientras menor es el banco, mayor es la tasa de fuga, y viceversa.

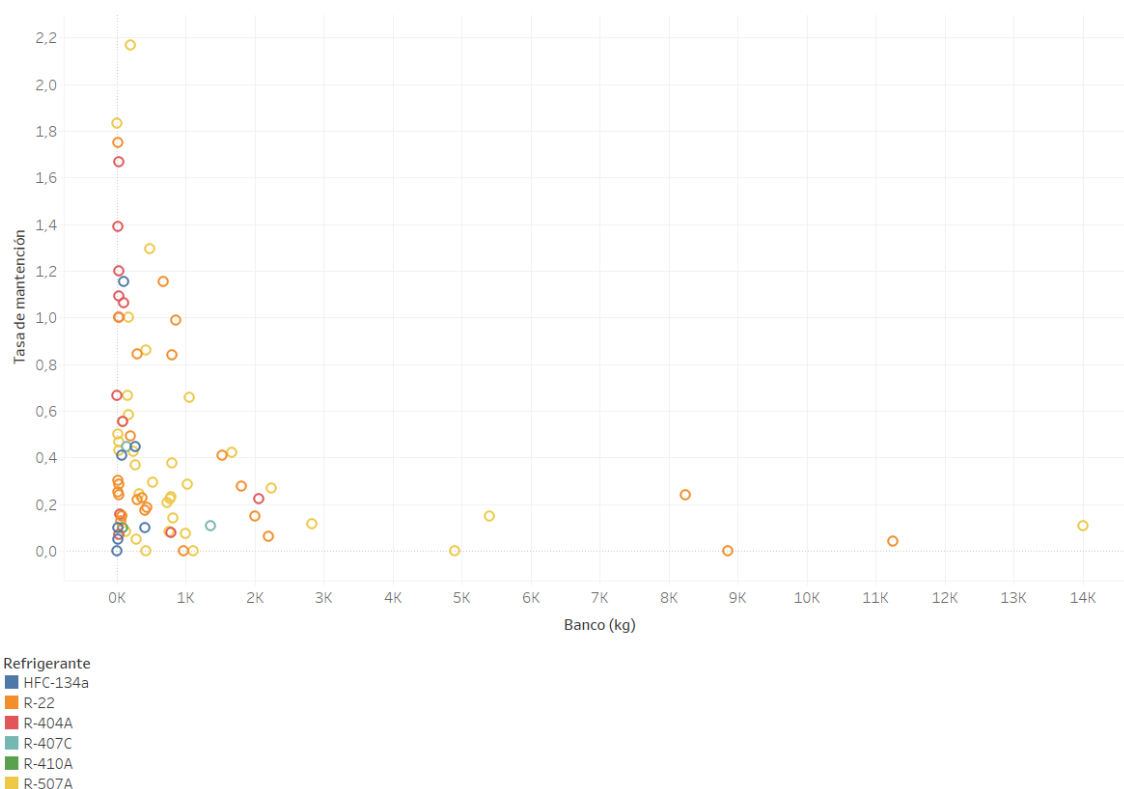


Figura 4-4 Tasa de mantención según banco para establecimientos categoría A

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Figura 4-5, se observa la distribución del banco de refrigerante en términos de masa. Es posible notar que la mayoría de los establecimientos se concentra en un banco menor a 500 kg, lo que permite inferir que, si es que cada uno estuviese asociado a un RUT independiente, estos establecimientos no pertenecerían a grandes usuarios.

Además, es relevante señalar que en la Figura 4-5 no se incluyó el uso de R-717, ya que su potencial de calentamiento global es nulo. Al respecto de los establecimientos usuarios de R-717, en general presentan bancos mucho mayores, que, de incluirlos, podría generar una interpretación distorsionada de la Figura.

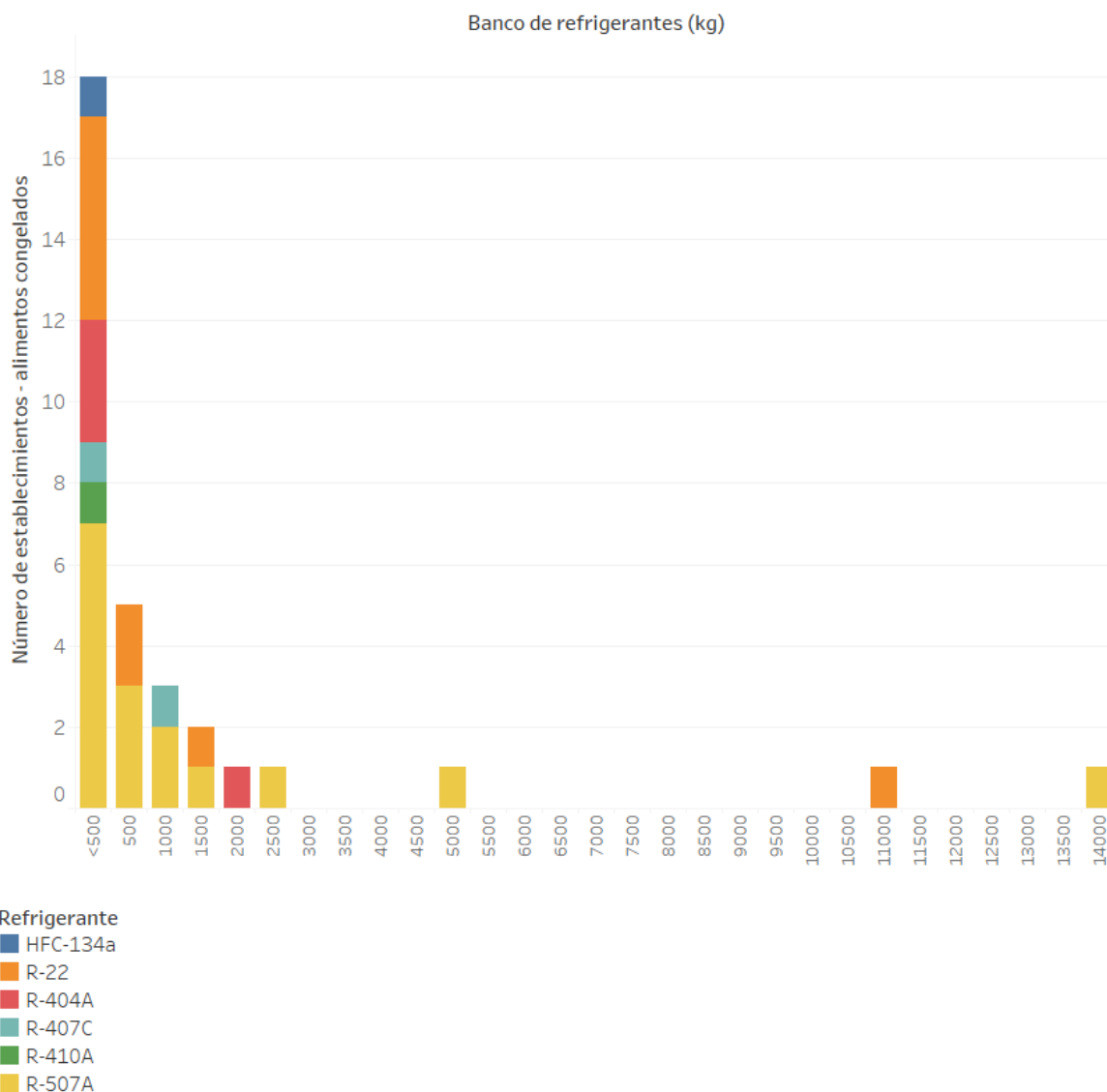


Figura 4-5 Histograma del banco (kg) por establecimientos del sector alimentos congelados

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-6 establece la relación entre el número de establecimientos del sector hortofrutícola y el banco de cada refrigerante R-22 y R-507A, excluyendo nuevamente el R-717 por los mismos motivos explicados anteriormente para el sector de alimentos congelados. Resulta importante notar, que el R-22 en este subsector tiene una gran relevancia, predominando sobre el uso de R-507A. Como ya se hizo mencionó al principio de la presente subsección, el uso de R-22 se encuentra asociado principalmente a equipos antiguos, en donde las empresas no se han reconvertido a nuevas tecnologías. Nuevamente, ocurre que la mayor parte de los establecimientos poseen menos de 500 kg en su banco, sin embargo, a diferencia del sector congelados, esta distribución es más homogénea.

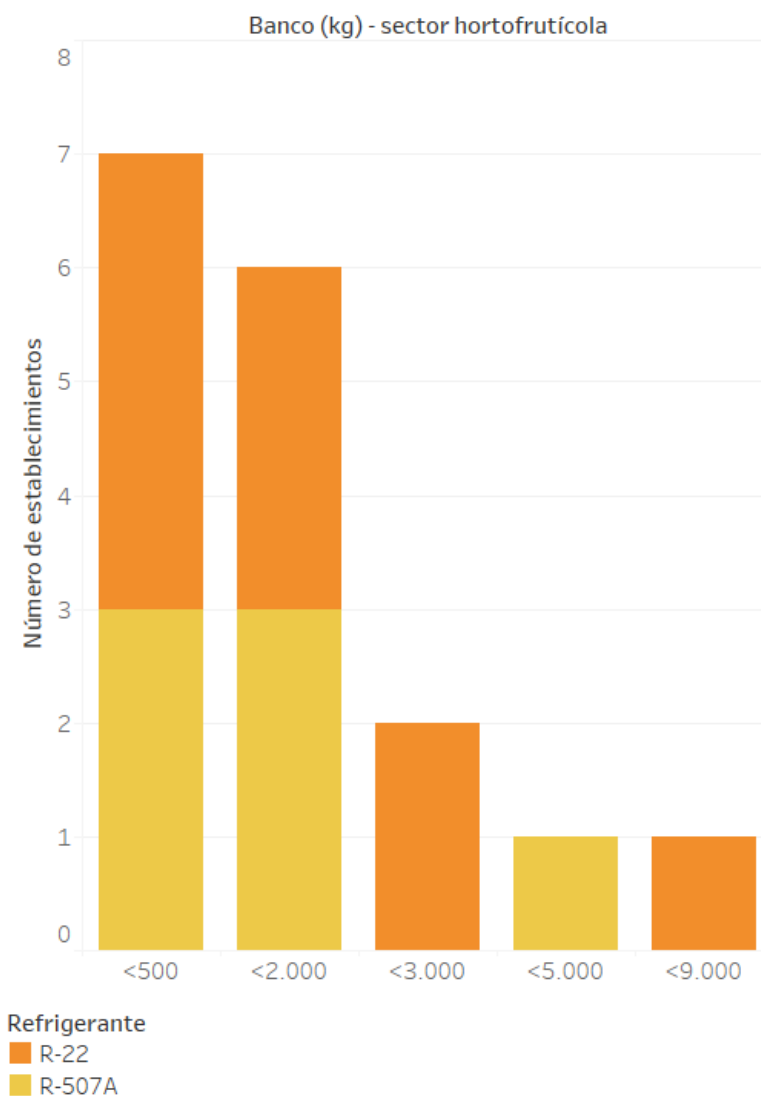


Figura 4-6 Histograma del banco de refrigerante (kg) en establecimientos del subsector hortofrutícola

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-7 en la que se establece la relación entre banco de refrigerante y establecimientos para el subsector acuícola, se observa nuevamente que la mayor cantidad de establecimientos poseen menos de 500 kg. Sin embargo, a diferencia de la distribución del subsector congelados y hortofrutícola, existe una mayor cantidad de establecimientos que poseen sobre 500 kg, destacando principalmente el uso de R-507A, seguido por el R-22. Resulta importante reiterar que, si cada uno de estos establecimientos corresponde a un RUT, no serían considerados grandes usuarios.

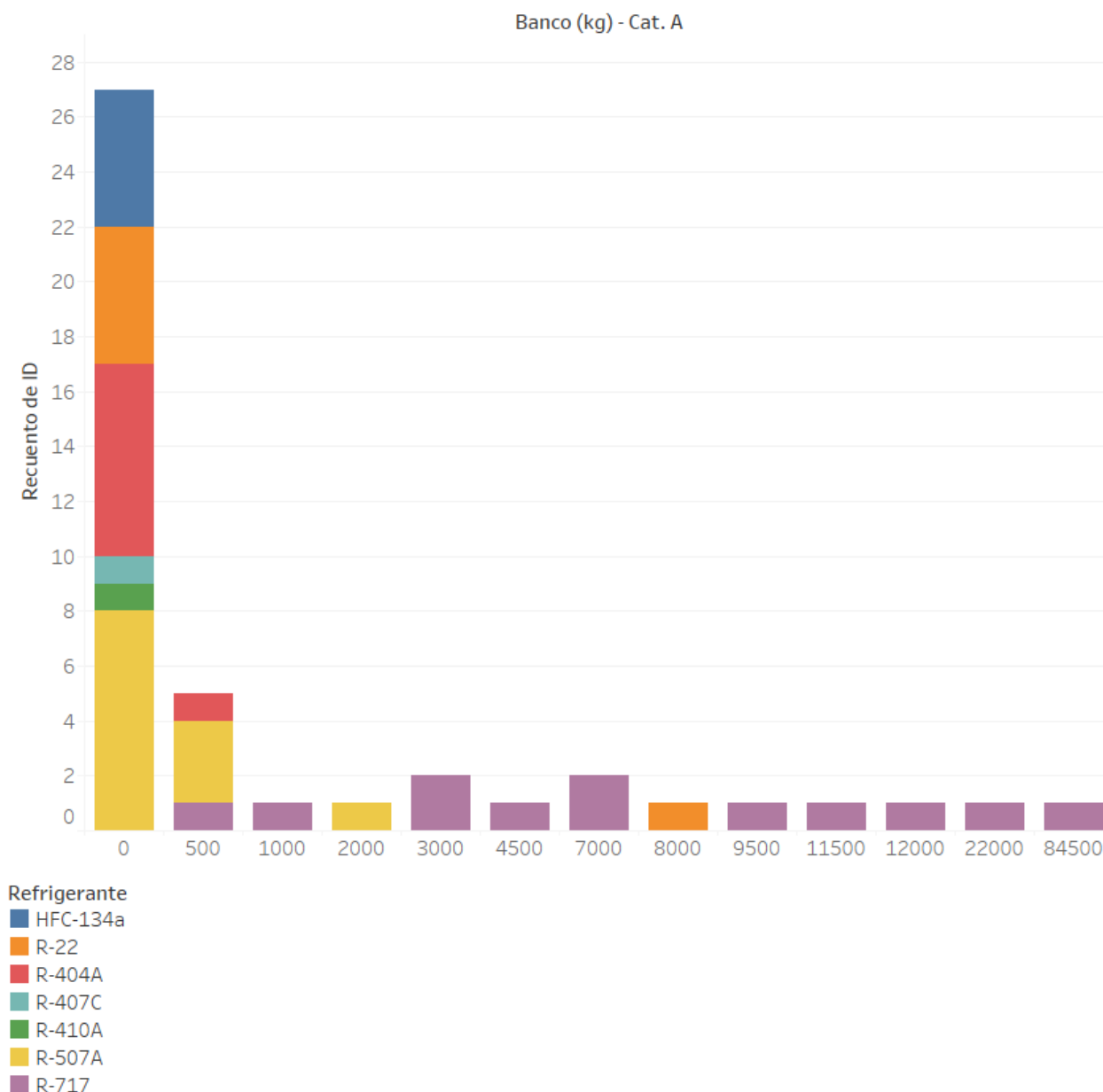


Figura 4-7 Banco de refrigerante respecto al número de establecimientos del subsector acuícola

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra un análisis similar, pero para el banco expresado en ton de CO₂ eq, para los subsectores revisados recientemente. Cabe notar que en la Figura 4-8 la mayor parte de los establecimientos presenta bancos menores a 500 tonCO₂eq y que más de la mitad de los establecimientos se encuentra por debajo de las 3.000 tonCO₂eq.

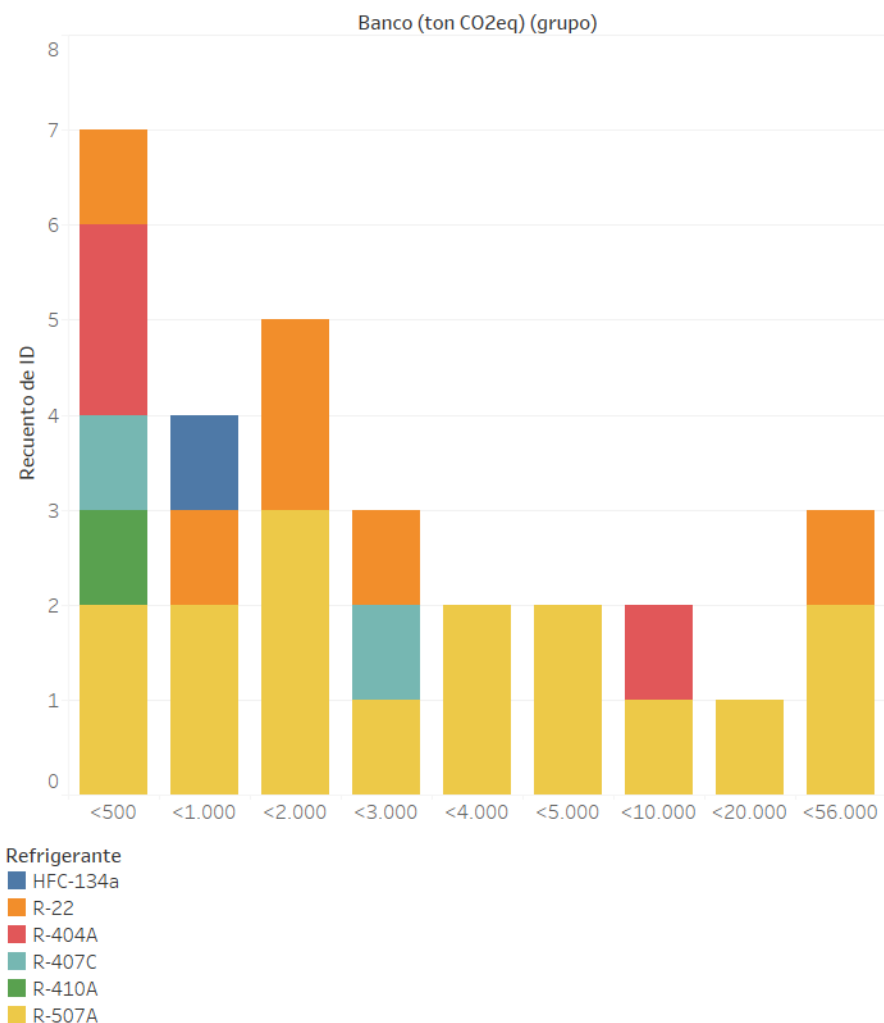


Figura 4-8 Banco de refrigerante en CO₂ eq. respecto al número de establecimientos del subsector alimentos congelados

En el caso del sector hortofrutícola, en Figura 4-9 se observa que la mayoría de los establecimientos está por debajo de las 4.000 ton CO₂eq y que de hecho la mitad de los establecimientos aporta con menos de 3.000 tonCO₂eq al banco. Por el contrario, existen dos establecimientos con grandes bancos, superiores a 14.000 ton CO₂eq. En este caso, la muestra de establecimientos pertenecientes al sector (n=17) resulta poco confiable al representar cerca de un 1% del universo.

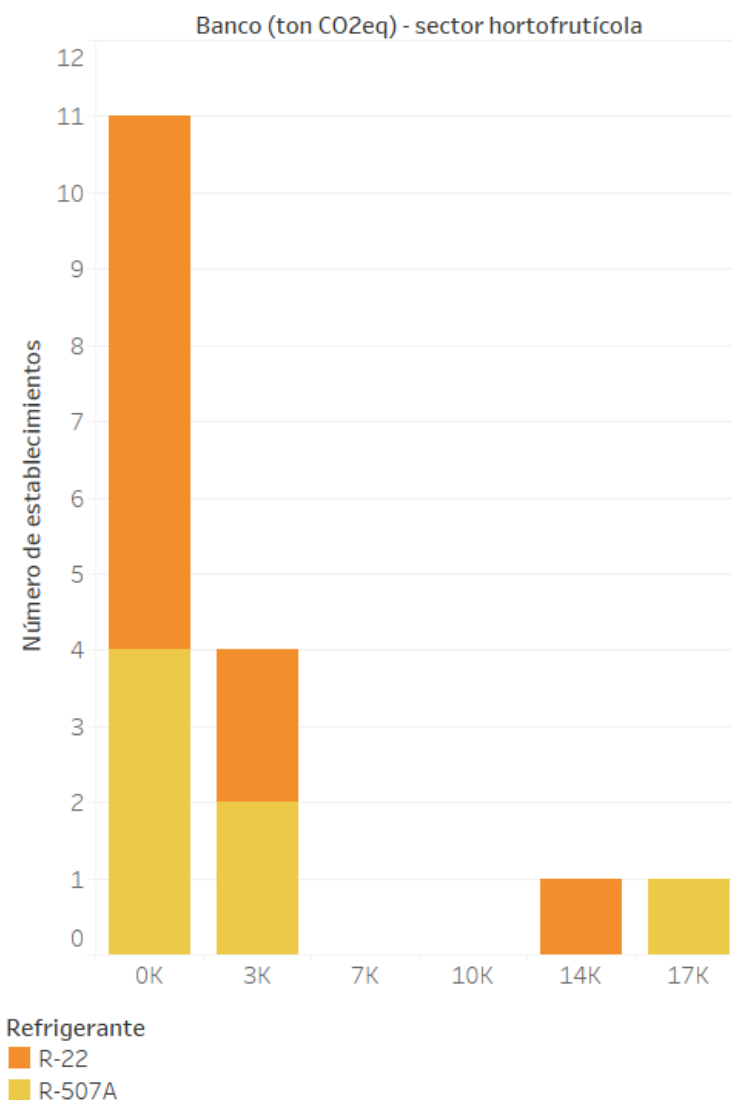


Figura 4-9 Banco de refrigerante en CO2 eq. respecto al número de establecimientos del subsector hortofrutícola

La Figura 4-10 establece la relación de banco de refrigerante en ton de CO2 eq. respecto a los establecimientos, para las plantas de procesamiento del sector acuícola. En este caso, la mayoría de los establecimientos se encuentra por debajo de las 500 tonCO2eq, mientras que hay una fracción pequeña de establecimientos con bancos mayores. Al respecto del tipo de refrigerantes, mientras que el R-507 se presenta transversalmente en los rangos de banco, hay algunos, como el HFC-134a, el R-410 y el R-407C que solo están en el rango de menor magnitud.

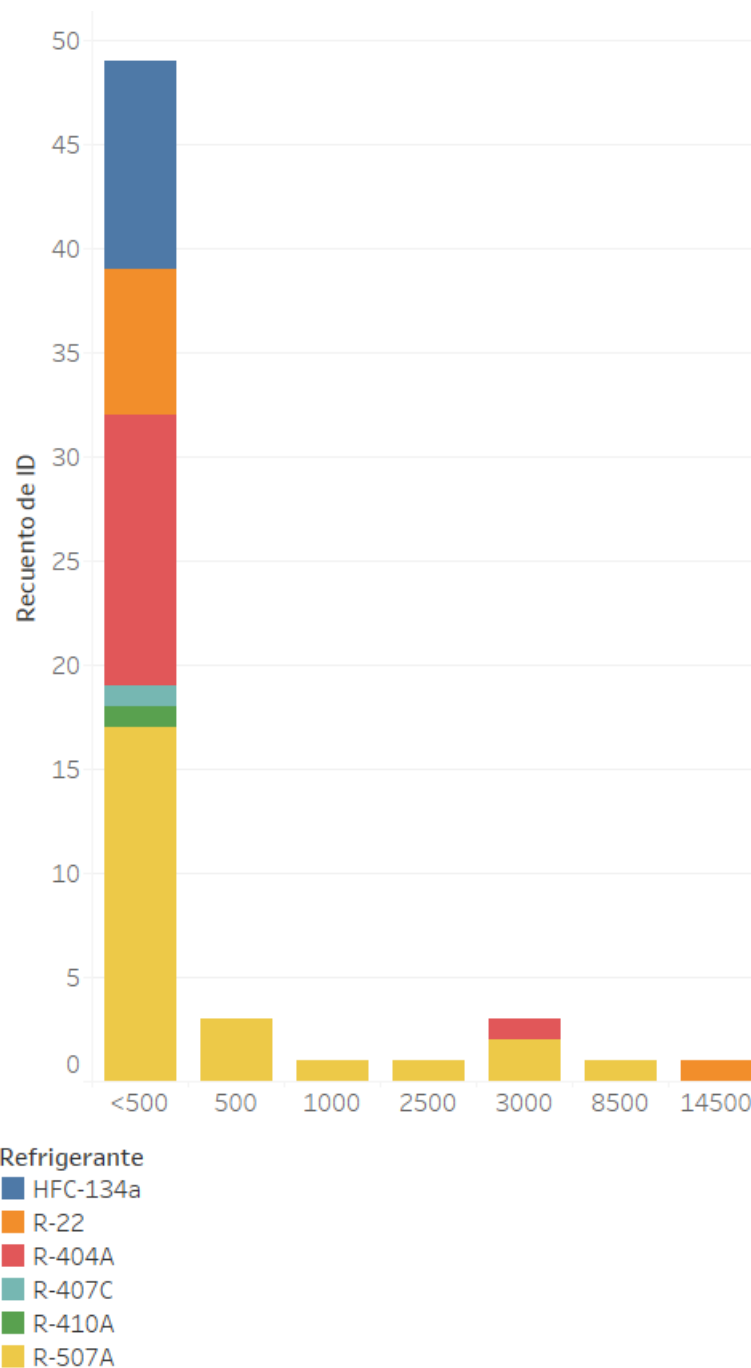


Figura 4-10 Banco de refrigerante en CO2 eq. respecto al número de establecimientos del subsector acuícola

En cuanto a las tasas de mantención, en la Figura 4-11 se observa la distribución de las tasas de mantención del sector de alimentos congelados. Al respecto, cabe notar que más de la mitad de

los establecimientos presentan tasas por debajo del 30%, mientras que existen algunos con tasas superiores al 100%.

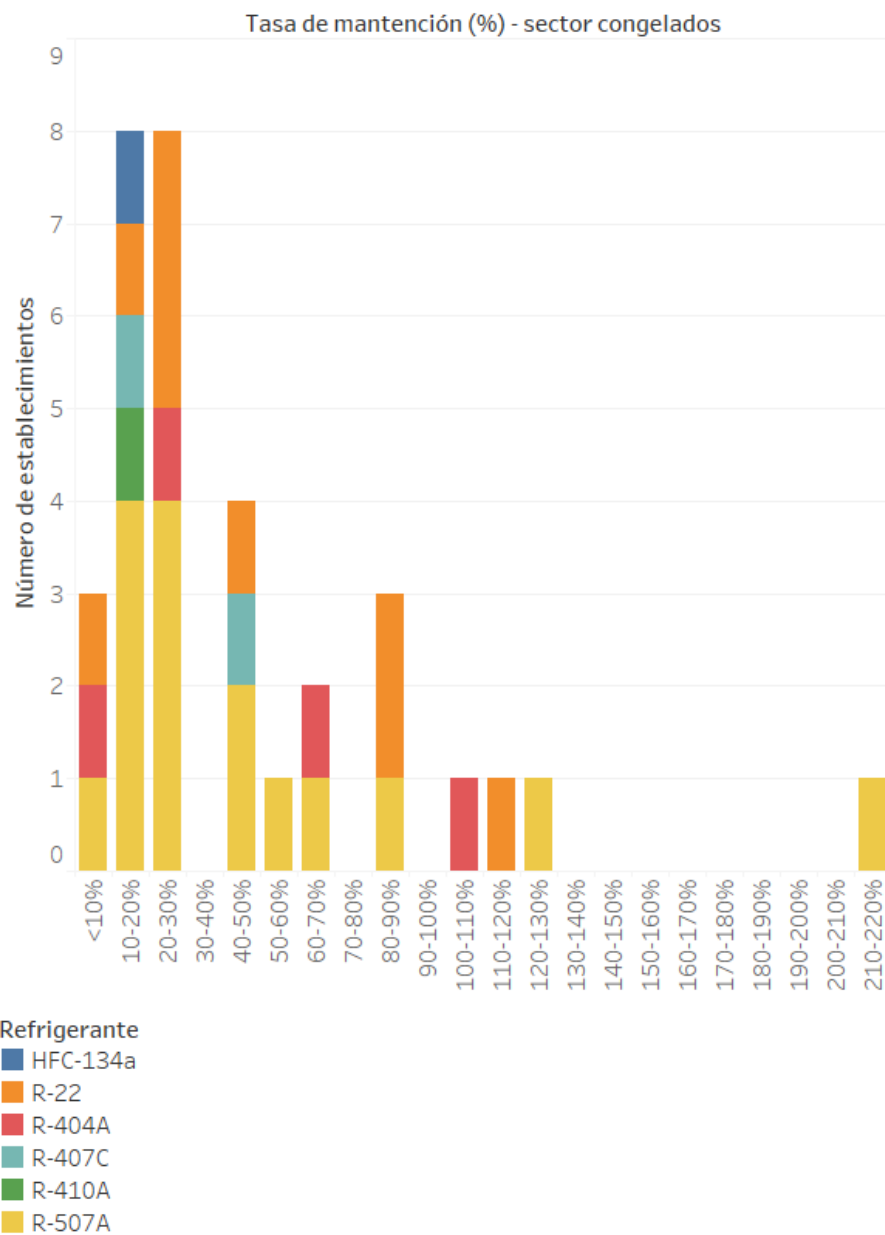


Figura 4-11 Histograma tasas de mantención por establecimientos del sector de alimentos congelados

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4-12 se observan la distribución de las tasas de mantención del sector hortofrutícola, que, a diferencia de los otros sectores, distribuye de manera más uniforme entre tasas del 10, 20 y 30%. No se presentan tasas superiores a 50% y menores a 90%, pero si superiores al 90%.

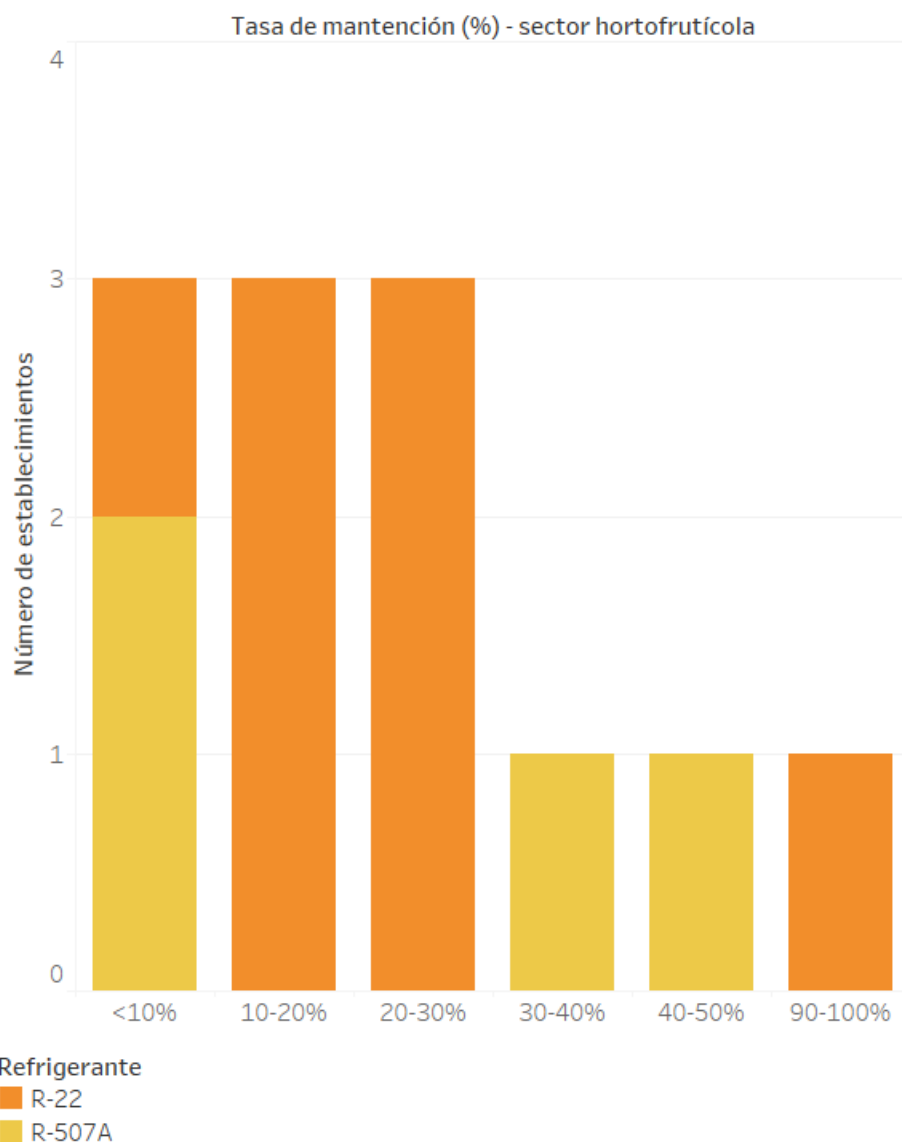


Figura 4-12 Histograma tasas de mantención por establecimientos del sector hortofrutícola

Fuente: Elaboración propia

De forma similar al caso del sector de congelados, en el caso del sector acuícola (ver Figura 4-13) se observa que más de la mitad de los establecimientos presenta tasas menores al 30% y la mayoría por debajo del 60%. Sin embargo, algunos presentan tasas superiores al 100%, alcanzando en algunos casos tasas de 400% y 1300%.

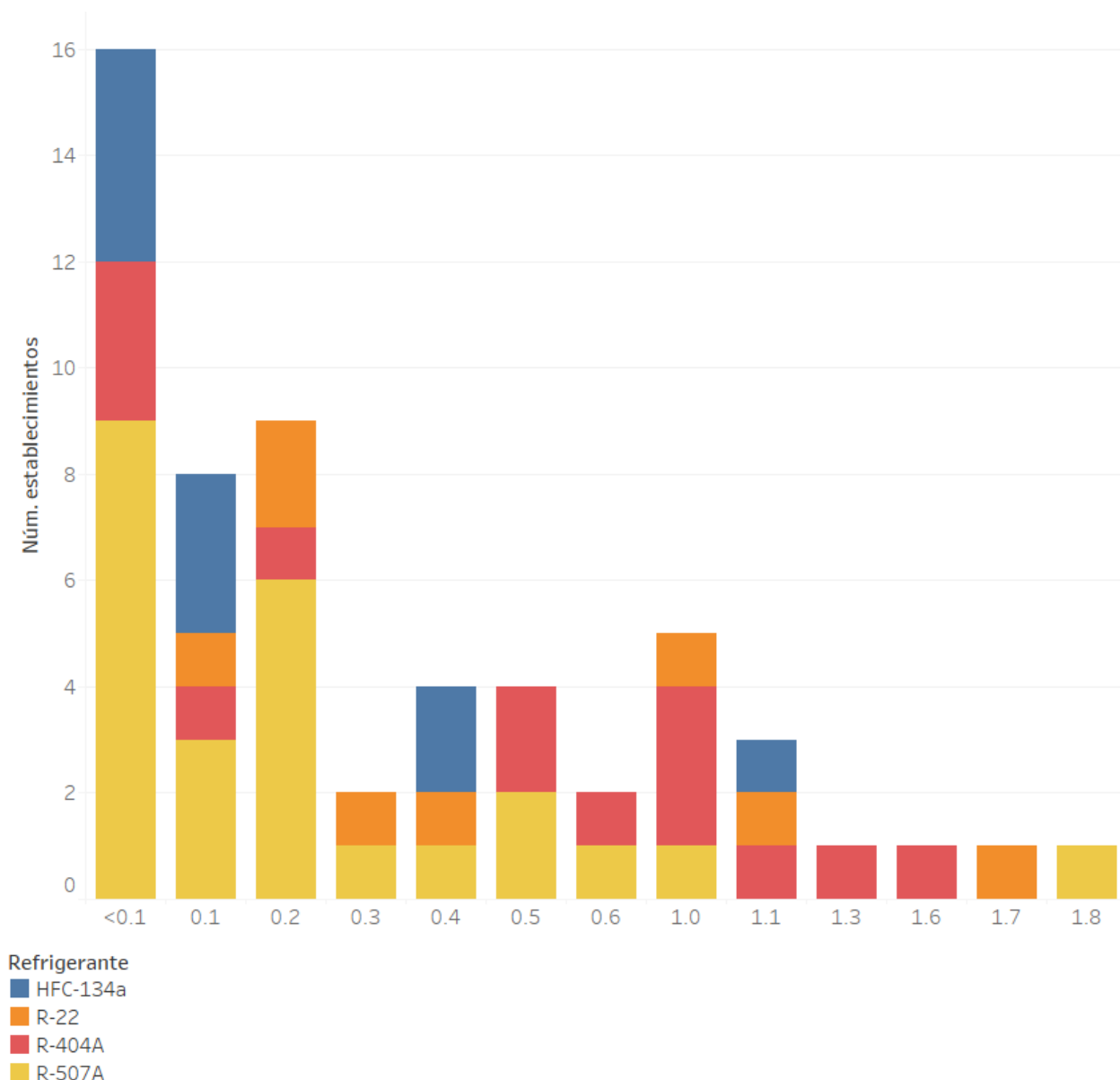


Figura 4-13 Histograma tasas de mantención por establecimientos del sector acuícola

Fuente: Elaboración propia

Al graficar las tasas de mantención versus banco (tonCO2eq) por sector, se extrae la misma conclusión que previamente en la Figura 4-4. En la Figura 4-14, Figura 4-15 y Figura 4-16, que grafican, respectivamente, el comportamiento de ambas variables para el sector de alimentos congelados, hortofrutícola y acuícola, se observa una relación inversa entre el banco y la tasa, es decir, a mayor banco, menor la tasa de mantención. En el sector acuícola se presentan ciertos *outliers*, con bancos grandes y tasas altas.

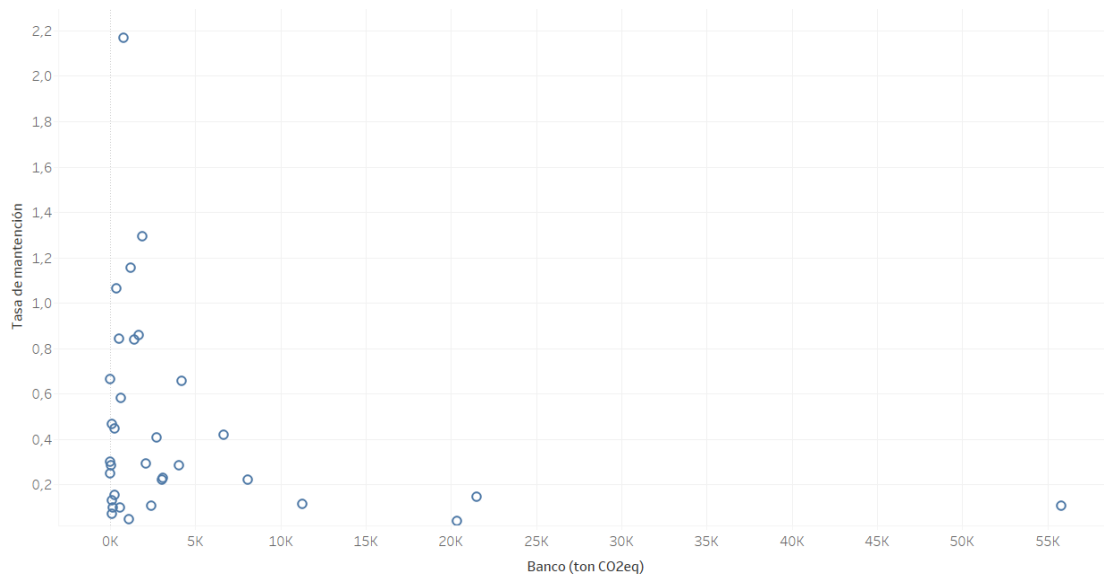


Figura 4-14 Tasas de mantención según banco sector alimentos congelados

Fuente: Elaboración propia

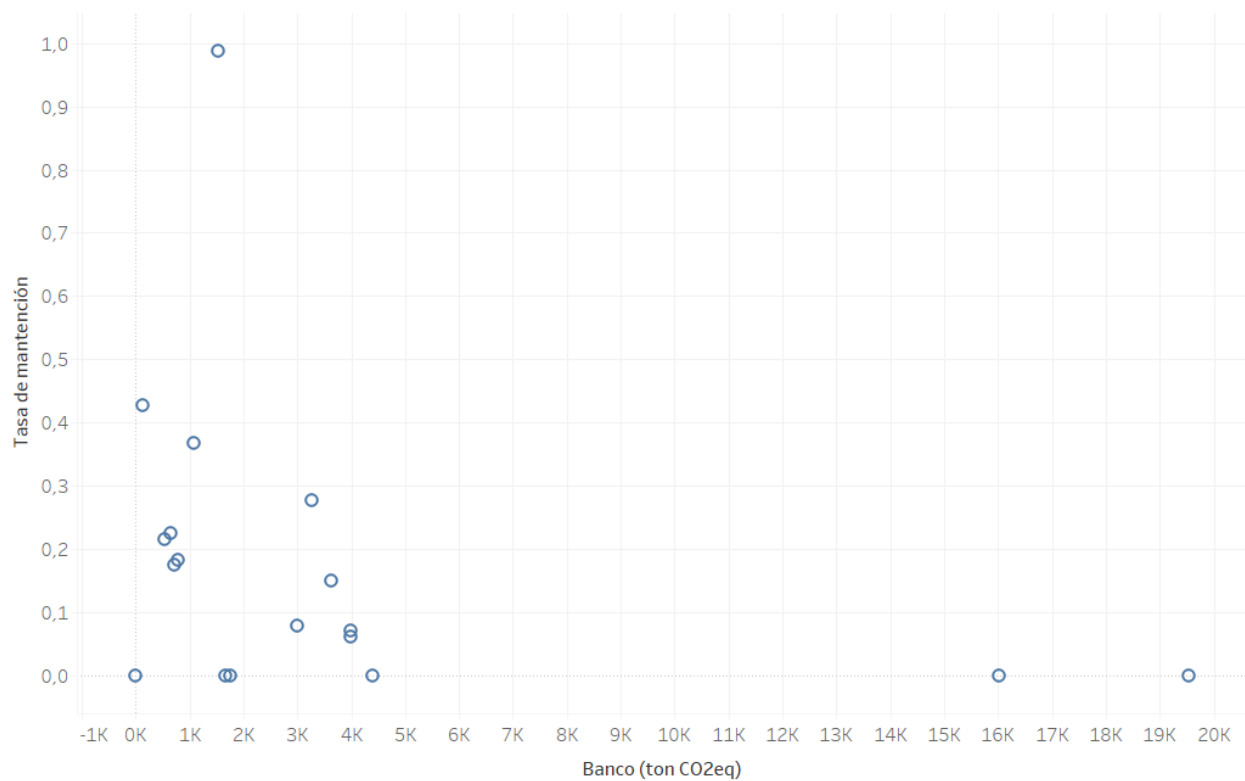


Figura 4-15 Tasas de mantención según banco sector hortofrutícola

Fuente: Elaboración propia

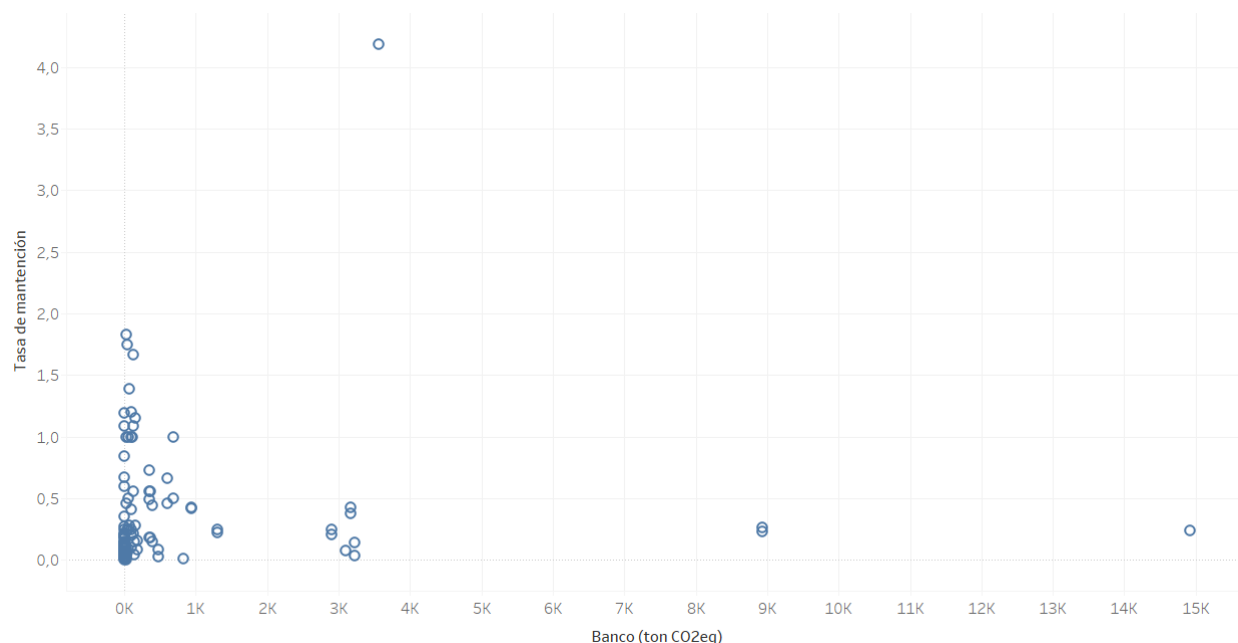


Figura 4-16 Tasas de mantención según banco sector acuícola

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los sectores para los cuales no se cuenta con información por establecimiento, no fue posible realizar un análisis detallado sobre el comportamiento de estos. En el caso de las salas eléctricas, es importante mencionar que estas presentan desafíos al momento de estimar su carga e interpretar su importancia relativa con respecto al banco total. En primer lugar, las estimaciones realizadas presentan incertidumbre al haber abarcado una muestra pequeña en relación con el universo; en segundo lugar, los antecedentes nuevos recopilados en este estudio indicarían que la carga de refrigerante por cada sala eléctrica sería mucho mayor a la estimada por Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023), en donde se estimó una masa de entre 0,8 a 2 kg por cada una y potencias de entre 9.000 y 60.000 BTU, mientras que los nuevos antecedentes sugieren cargas de hasta 67 kg⁹ y salas con potencias de hasta 3 millones de BTU (ver Anexo Digital -Entrevista ID 6). Lo anterior indica que la muestra entrevistada por Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023) está sesgada y subestima el banco de este subsector de la minería.

Adicionalmente, es importante mencionar que resulta difícil clasificar hacer la equivalencia entre establecimiento y sala eléctrica, debido a que el establecimiento en este caso sería la faena minera en sí, dentro de la cual pueden existir numerosas salas.

En lo que respecta al sector lácteo, en base al inventario elaborado por (CERES BCA, 2022) solo fue posible estimar el banco asociado a la ILMa e ILMe. Los autores, al extrapolar los resultados obtenidos para su muestra, suman la carga y recarga, lo que no permite obtener conclusiones con respecto a las tasas de mantención.

⁹ Estimado en base a revisión de fichas técnicas de equipos usados en salas eléctricas.

En la Figura 4-17 se muestran los cuartiles asociados a las tasas de mantención de la Categoría A, en donde se puede notar que el cuartil 25 presenta un 11,5% de tasa, el cuartil 50 tiene un 21,4% de tasa y el percentil 75 posee un 45,1% de tasa, con un n=78 establecimientos.

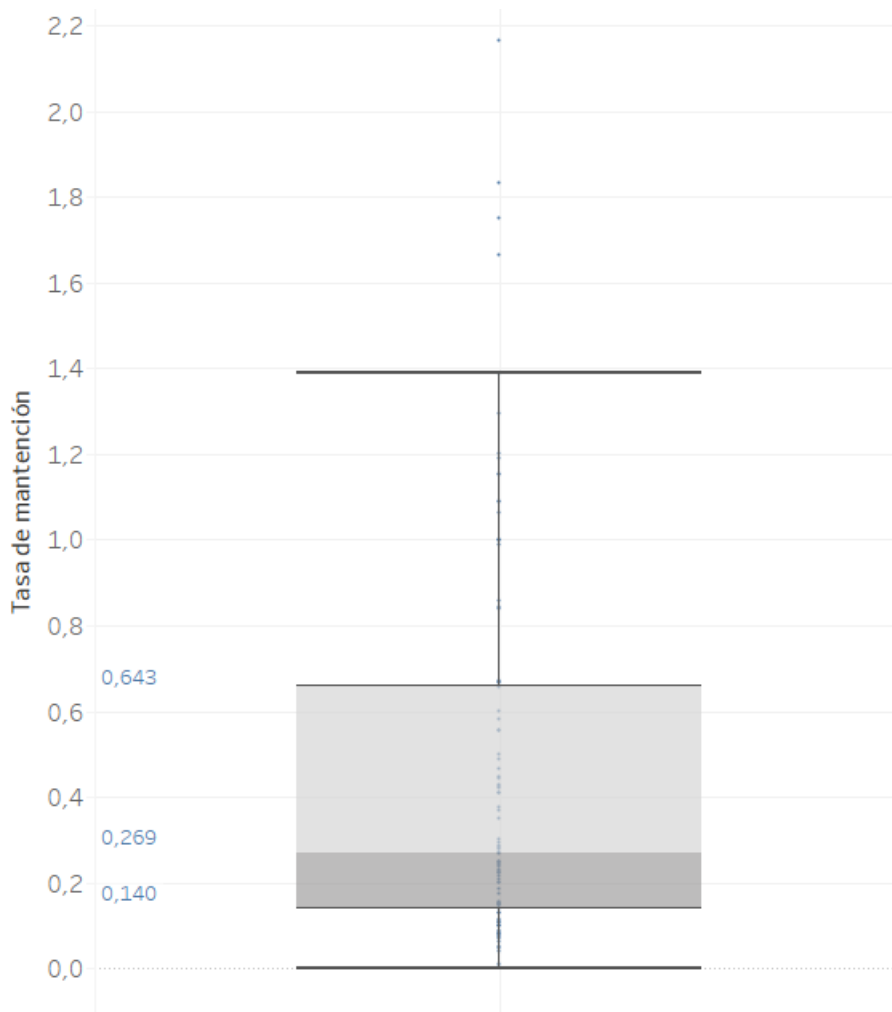


Figura 4-17 Box-plot de las tasas de mantención de la Categoría A, con n =78

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Categoría B: refrigeración industrial fija con predominancia de equipos Tipo II

Los usuarios clasificados dentro de esta categoría son productores primarios del sector lácteo. Al respecto de estos, no se cuenta con información desagregada a nivel de establecimiento. Sin embargo, en base a los antecedentes reportados por CERES BCA (2022), se estiman tasas de mantención de entre 0,25 a 0,4%, es decir, tasas menores en relación a la tasa reportada para la sub-aplicación de refrigeración industrial del IPCC (2006), de entre 7 y 25%.

Además, el tamaño del banco estimado y el número de productos primarios (2.559 al año 2022), sugiere bancos de menos de 100 kg de refrigerante por establecimiento. Es importante mencionar que este sector presenta una alta incertidumbre, pues del total del universo, en CERES BCA (2022) solo se logra obtener una muestra del 3%. Adicionalmente, la metodología de estimación del banco falla en capturar la incertidumbre asociada y reporta solo promedios de refrigerante por establecimiento.

Tabla 4-3 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de refrigeración industrial fija con predominancia de equipos tipo II

Subsector	R-717 (kg)	R-22 (kg)	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-410A (kg)	R-32 (kg)	R-407C (kg)	R-438A (kg)	R-507A (kg)	Total Banco (ton CO2 eq) AR4
Productores primarios del sector lácteo	-	19.977	-	33.961	5.227	-	-	-	6.160	204.799

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Categoría C: refrigeración comercial fija con predominancia de equipos Tipo III

Clasificados dentro de esta categoría de usuarios se encuentran los centros de distribución de mayor tamaño, pertenecientes al tramo 3 y 4, o de entre 2.000 y 4.999 m² y más de 5.000 m², respectivamente (GAET, 2023). El banco estimado para esta categoría se observa en la Tabla 4-4.

El inventario desarrollado por GAET (2023) se basa en la estimación de un factor expresado en kg/m², que multiplica la superficie de centros de distribución. Esta metodología asume un factor constante de 0,33 kg/m², independiente del tipo de refrigerante. A pesar de que los autores llegan a estimar el porcentaje de superficie que utiliza cada tipo de refrigerante, el uso de un factor único podría resultar en una falsa equivalencia, considerando que los equipos que utilizan los refrigerantes encontrados (R-22, R-404A, R-410A y R-507A), los utilizan en distintas cantidades.

La metodología utilizada, sumado a los supuestos, no permiten analizar el comportamiento de los establecimientos pertenecientes a esta categoría. Sin embargo, en base a lo recomendado por el IPCC (2006), se sugiere considerar tasas de entre 10 y 35%, ya que la aplicación en centros de distribución es asimilable a la sub-aplicación de refrigeración comercial.

Tabla 4-4 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de refrigeración comercial fija con predominancia de equipos tipo III

Subsector	R-717 (kg)	R-22 (kg)	HFC- 134a (kg)	R-404A (kg)	R-410A (kg)	R-32 (kg)	R-407C (kg)	R-438A (kg)	R-507A (kg)	Total Banco (ton CO2 eq) AR4
Centro de distribución Tramo 3	30.218	2.518	-	-	-	-	-	-	17.628	74.805
Centro de distribución Tramo 4	122.605	1.277	-	-	-	-	-	-	3.831	17.578
Total	152.823	3.795	-	-	-	-	-	-	21.459	92.383

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Categoría D: refrigeración comercial fija con predominancia de equipos Tipo II

En esta categoría de usuarios se encuentran los centros de distribución de menor tamaño, pertenecientes al tramo 1 y 2, es decir, centros logísticos refrigerados de entre 150 a 499 m² y entre 500 a 1.999 m² (GAET, 2023). El banco estimado para esta categoría se observa en la Tabla 4-5.

Al igual que en la categoría anterior, no es posible analizar el comportamiento de los centros de distribución. Se sugieren tasas de entre 10 y 35%.

Tabla 4-5 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de refrigeración comercial fija con predominancia de equipos tipo II

Subsector	R-717 (kg)	R-22 (kg)	HFC- 134a (kg)	R-404A (kg)	R-410A (kg)	R-32 (kg)	R-407C (kg)	R-438A (kg)	R-507A (kg)	Total banco (ton CO2 eq) AR4
Centro de distribución Tramo 2	7.857	7.021	-	-	-	-	-	-	31.827	139.539
Centro de distribución Tramo 1	-	14.236	-	3.942	-	-	-	-	3.723	56.062
Total	7.857	21.257	-	3.942	-	-	-	-	35.550	195.601

Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Categoría E: climatización comercial fija con predominancia de equipos Tipo III

La categoría E abarca recintos de salud hospitalarios, aeropuertos y malls, a partir de los antecedentes reportados por Clarke C. (2023) y Santander (2023) respectivamente. Resulta importante mencionar, que, en ambos inventarios, el total de refrigerante fue calculado a partir

de la superficie construida, dado la baja tasa de respuestas de los subsectores encuestados. Estas metodologías no resultan útiles para estimar la tasa de mantención de los establecimientos, por lo que no es posible analizar en profundidad el comportamiento de los establecimientos asociados a estos sectores.

Tabla 4-6 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de climatización comercial fija con predominancia de equipos tipo III

Subsector	R-717 (kg)	R-22 (kg)	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-410A (kg)	R-32 (kg)	R-407C (kg)	R-438A (kg)	R-507A (kg)	Total banco (ton CO2 eq) AR4
Recintos de salud hospitalarios	-	18.603	6.765	-	133.606	3.382	3.382	-	-	328.247
Malls	-	-	190.802	-	-	-	-	-	-	272.847
Aeropuertos	-	1.301	8.306	-	364	-	217	-	-	15.377
Total	-	19.904	205.873	-	133.970	3.382	3.599	-	-	616.471

Fuente: Elaboración propia

4.1.6 Categoría F: climatización comercial fija con predominancia de equipos Tipo II

Esta categoría considera hoteles y recintos de salud de atención primaria. El banco estimado para estos sectores se reporta en la Tabla 4-7. Al igual que en la categoría anterior, los bancos de estos sectores fueron estimados en base a la superficie de estos recintos. Además, resulta importante mencionar que en el sector hoteles, puede existir una incertidumbre un poco alta, dado que en el inventario realizado por Santander (2023) consideraba solamente los hoteles 4 y 5 estrellas, los que tienen la obligación de contener sistemas de climatización.

Tabla 4-7 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de climatización comercial fija con predominancia de equipos tipo II

Subsector	R-717 (kg)	R-22 (kg)	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-410A (kg)	R-32 (kg)	R-407C (kg)	R-438A (kg)	R-507A (kg)	Total Banco (ton CO2 eq) AR4
Hoteles	-	-	19.119	-	47.480	-	-	-	-	126.455
Recintos de salud de atención primaria	-	3.889	1.414	-	27.933	707	707	-	-	68.625
Total	-	3.889	20.533	-	75.413	707	707	-	-	195.080

Fuente: Elaboración propia

4.1.7 Categoría G: climatización industrial fija con predominancia de equipos Tipo I

La categoría G está compuesta únicamente por espacios habitables de la minería de cobre, es decir, por espacios como campamentos, casinos y espacios de ocio para trabajadores de la minería. La metodología elaborada por (Madrado-Ortega & Morandé-Thompson, 2023) considera la estimación a partir del número de trabajadores y solo fue posible estimar para campamentos. Lo anterior responde a la falta de acceso a la información y además, a la efimeridad de este tipo de espacios, que suelen trasladarse según la etapa de la faena minera.

Al igual que en el caso de las salas eléctricas, resulta difícil hacer la equivalencia entre un campamento y un establecimiento, debido a que dentro de una faena minera coexisten distintas empresas y múltiples espacios habitables.

Tabla 4-8 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de climatización industrial fija con predominancia de equipos tipo I

Subsector	R-717 (kg)	R-22 (kg)	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-410A (kg)	R-32 (kg)	R-407C (kg)	R-438A (kg)	R-507A (kg)	Total banco (ton CO2 eq) AR4
Espacios habitables minería cobre	-	-	-	-	45.780	-	-	-	-	95.566

Fuente: Elaboración propia.

4.1.8 Categoría H: refrigeración y climatización comercial fija con predominancia de equipos Tipo III

En esta categoría cae solamente el subsector de Supermercados. Para este se revisaron diferentes antecedentes entre los que se incluye el informe realizado por GAET (2023), GreenLab Dictuc (2017) y ATS Energía (2020). El primer inventario mencionado consistió en una revisión bibliográfica ya que se trata de una estimación de refrigerante en base a superficie construida, en cambio, para los siguientes dos inventarios se cuenta con la base de datos correspondientes, por lo que es posible revisar el comportamiento de este sector especialmente asociado a la recarga. El banco total que se presenta en la Tabla 4-9 corresponde a lo obtenido por GAET (2023), ya que es el inventario que se encuentra más actualizado.

Tabla 4-9 Banco estimado para sectores pertenecientes a la categoría de refrigeración y climatización comercial fija con predominancia de equipos tipo III

Subsector	R-717 (kg)	R-22 (kg)	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-410A (kg)	R-32 (kg)	R-407C (kg)	R-438A (kg)	R-507A (kg)	Total Banco (ton CO2 eq) AR4
Supermercados	-	62.200	95	53.409	1.919	-	202	-	111.026	768.974

Fuente: Elaboración propia

Para caracterizar esta categoría, se cuenta con la información reportada tanto por ATS (2020), como por GreenLab-Dictuc (2017). Se muestran los análisis obtenidos según ambos, con el fin de obtener conclusiones robustas.

Respecto a la Figura 4-18 y Figura 4-19 es posible notar que el banco (tonCO₂eq) por establecimiento distribuye de forma asimilable a la normal, en ambos casos, con una mayoría de establecimientos con bancos entre 700 y 2.200 ton aproximadamente.

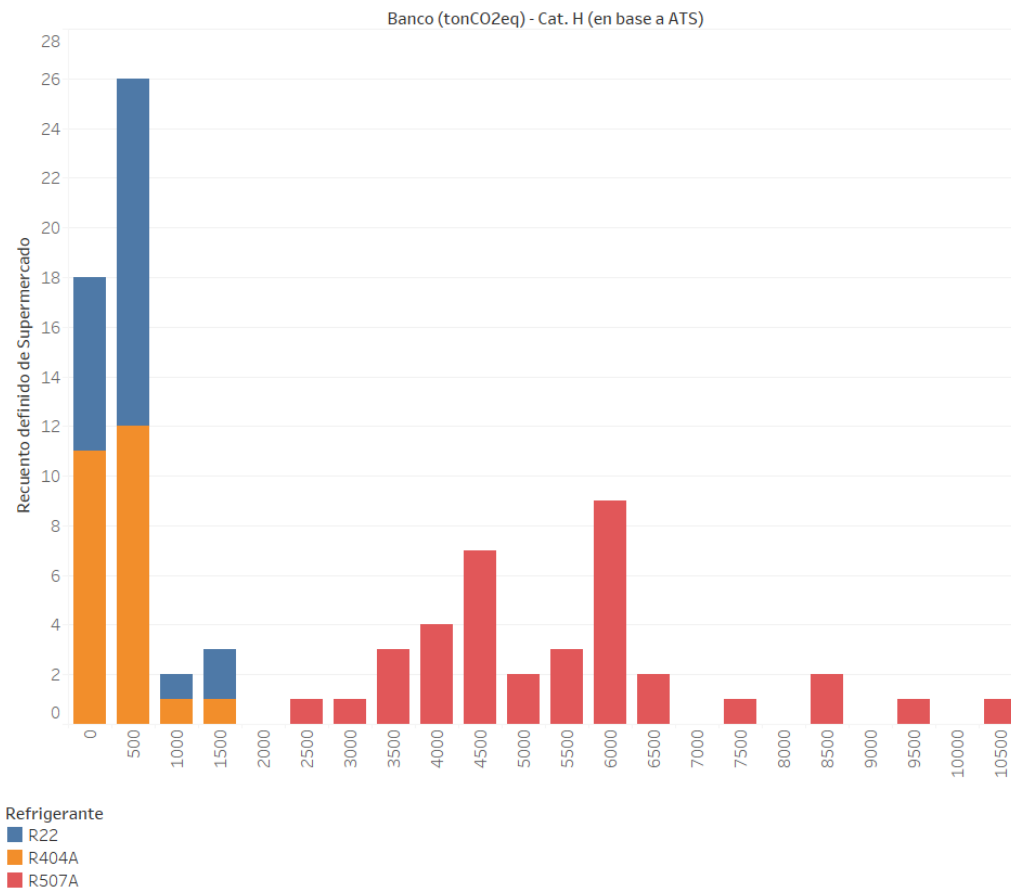


Figura 4-18 Banco de supermercado respecto al número de supermercados según ATS

Fuente: Elaboración propia

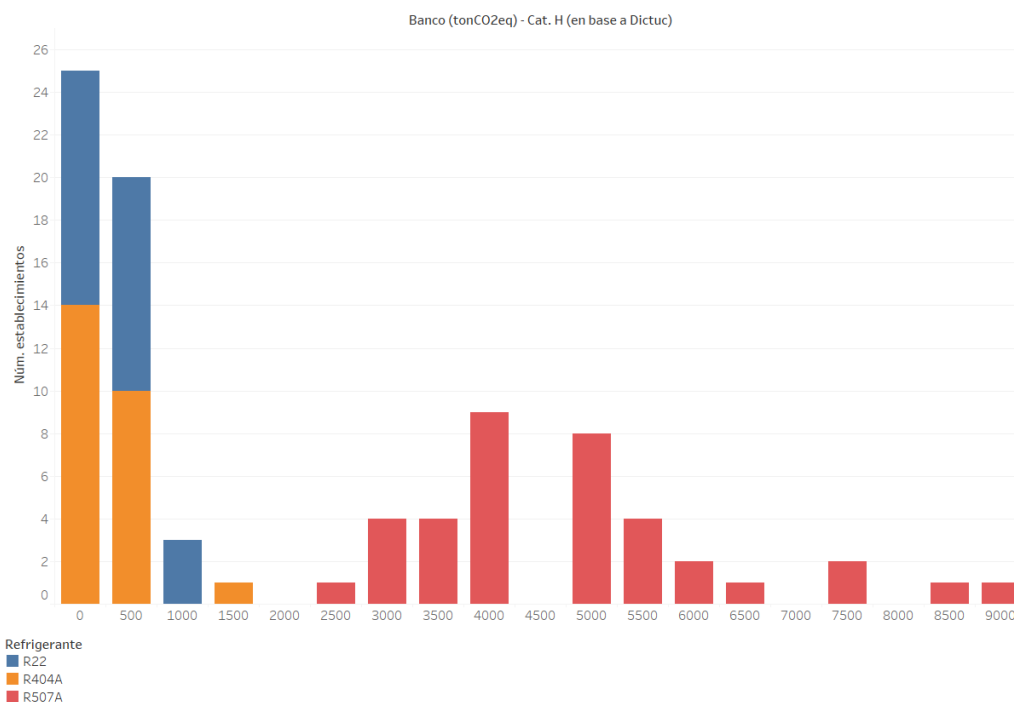


Figura 4-19 Banco de supermercado respecto al número de supermercados según Dictuc-GreenLab

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a las tasas, en la Figura 4-20 y Figura 4-21, es posible notar que estas distribuyen de manera lognormal, con una mayoría de los establecimientos presentando tasas por debajo del 60-70%.

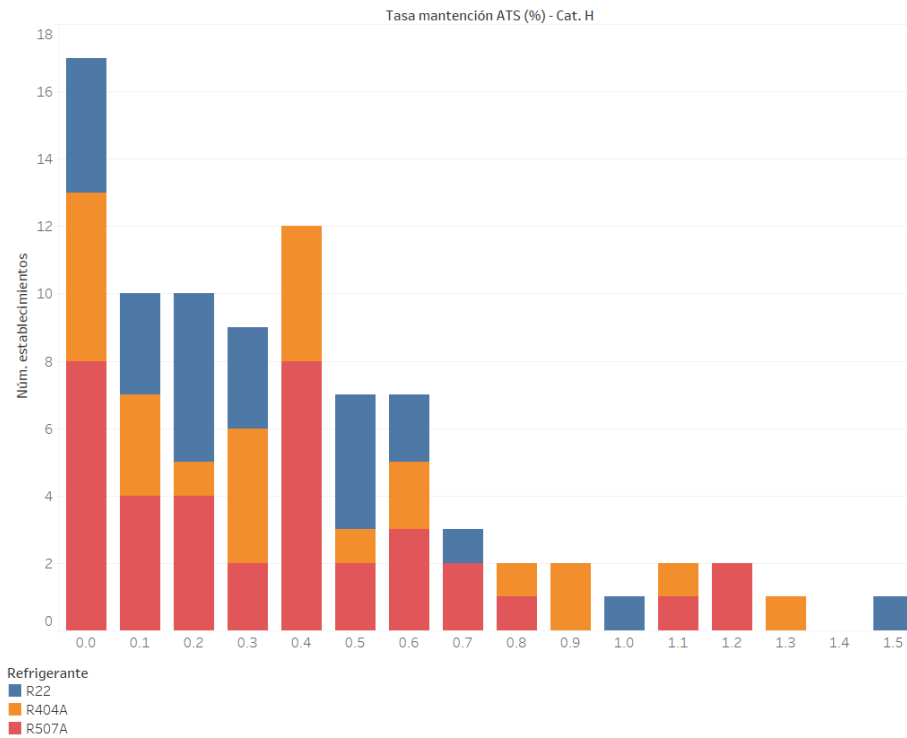


Figura 4-20 Tasa de recarga respecto al número de supermercados según ATS
Fuente: Elaboración propia

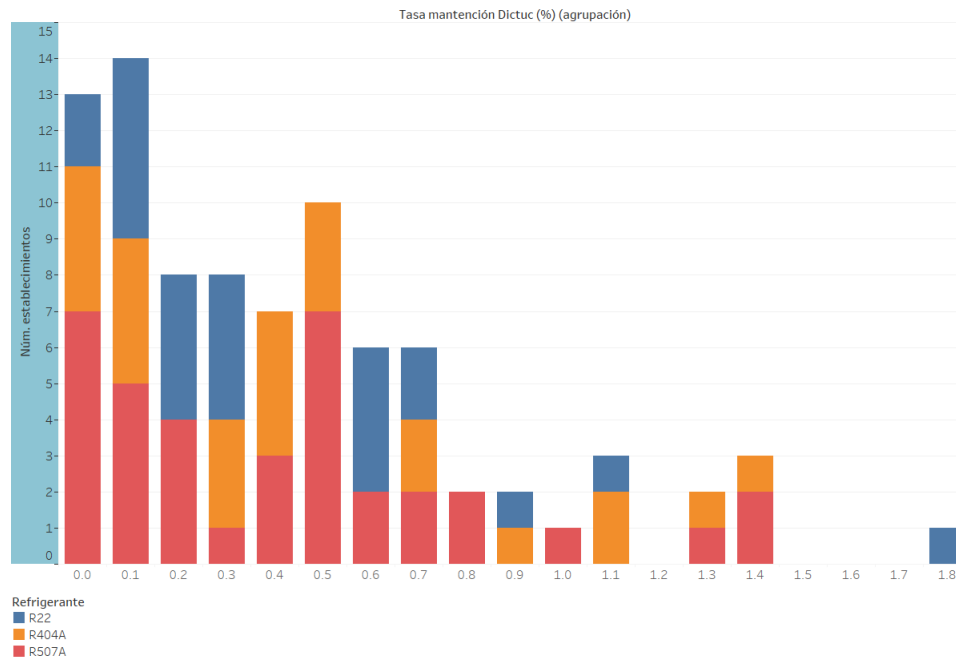


Figura 4-21 Tasa de recarga respecto al número de supermercados según Dictuc-GreenLab

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-22 se presenta la tasa de recarga en comparación con el banco según los datos reportados por ATS Energía (2020). En este gráfico se observa una relación en la que, a menor banco, mayor es la tasa de recarga. Sin embargo, este patrón no es tan evidente como en la categoría A, dado que, en este caso, se manifiesta con mayor intensidad en los bancos menores a 2.000 toneladas de CO2 equivalente, donde las tasas de mantenimiento son elevadas.

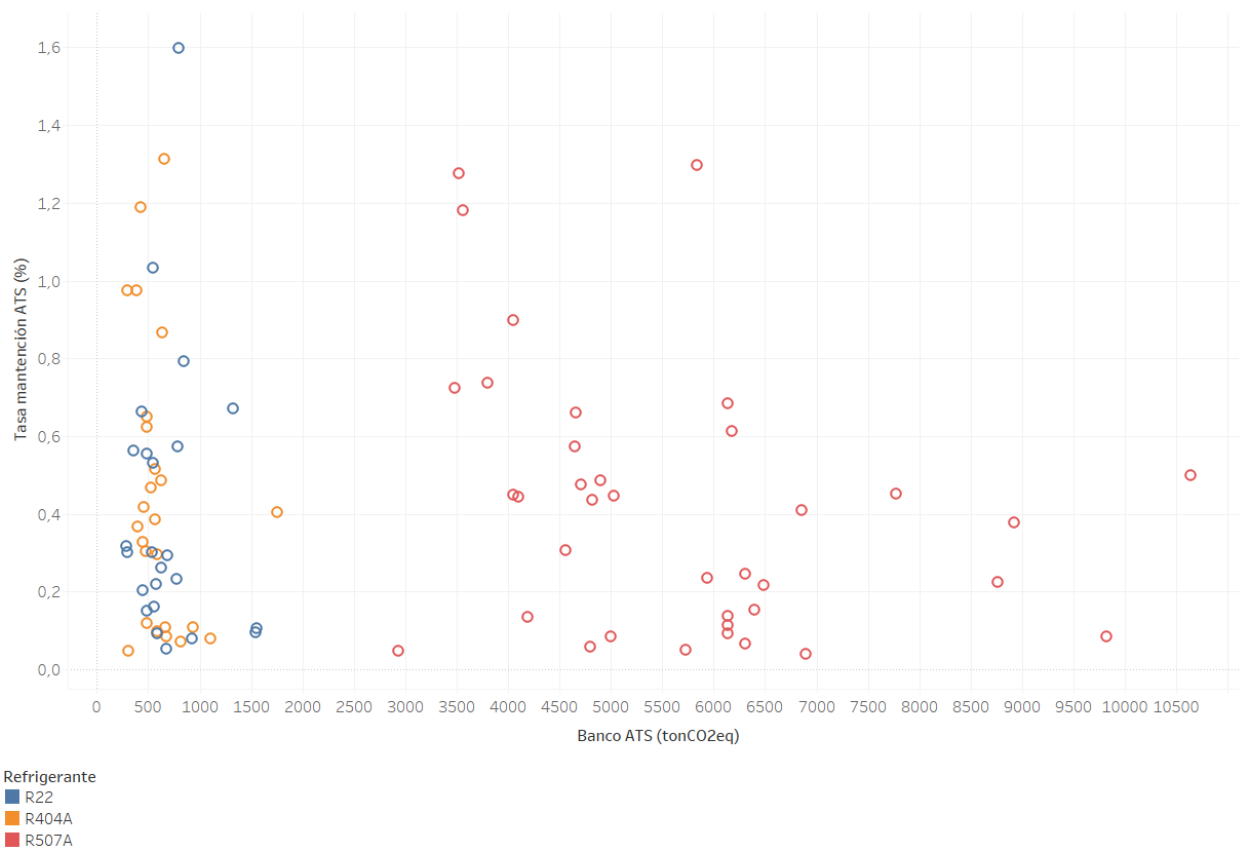


Figura 4-22 Tasa de recarga respecto al banco según ATS

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-23 presenta la tasa de recarga en comparación con el banco según los datos reportados por GreenLab Dictuc (2017). Se puede notar un comportamiento similar que el de la Figura 4-22, solo que las tasas de recarga son superiores al 140% para un banco de 2.000 ton CO2 eq.

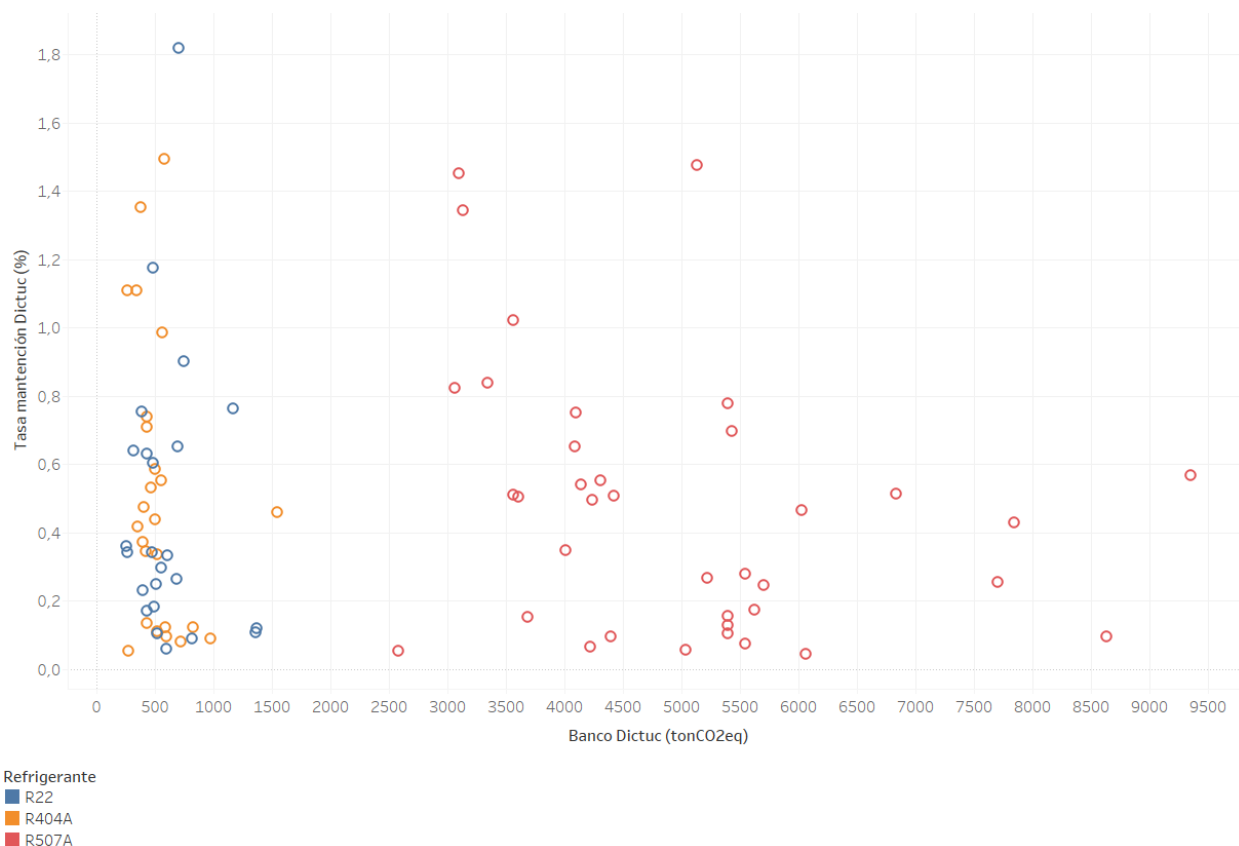


Figura 4-23 Tasa de recarga respecto al banco según Dictuc-GreenLab

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en la Figura 4-24 los cuartiles asociados a las tasas de mantención de la Categoría H, para los datos obtenidos de ATS y GreenLab-Dictuc. Para el caso de ATS es posible apreciar que el cuartil 25 presenta un 11,6% de tasa, el cuartil 50 tiene un 29,3% de tasa y el percentil 75 posee un 55,4% de tasa. Por otro lado, para el caso de GreenLab-Dictuc, para el cuartil 25, 50 y 75 se tienen unas tasas de mantención 10,2%, 26,2% y 48,7% respectivamente, con un n=89 establecimientos.

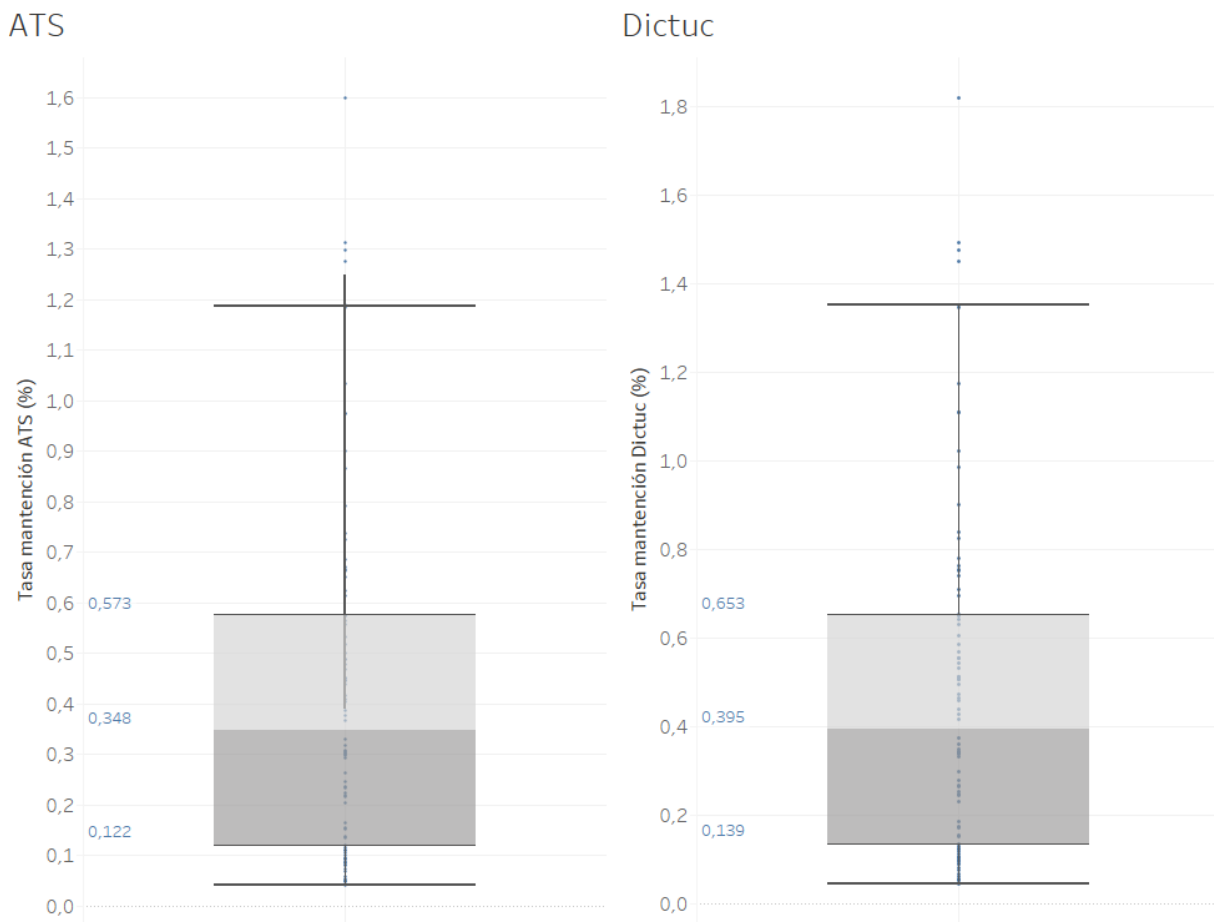


Figura 4-24 Box-plot de tasas de mantención para la Categoría H (ATS y GreenLab-Dictuc), con n = 89

Fuente: Elaboración propia

4.2 Estimación de inventario de emisiones de HFC de grandes usuarios

En la Figura 4-25 se puede observar la magnitud del banco estimado en términos de toneladas de CO₂eq (PCG-100 AR4). Es posible notar que la Categoría A, de refrigeración industrial fija con predominancia de equipos Tipo III lleva significativamente la delantera, seguida de la Categoría H, E, B, D, F, G y finalmente C. De manera similar, en la Tabla 4-10 se observa el banco estimado por cada refrigerante.

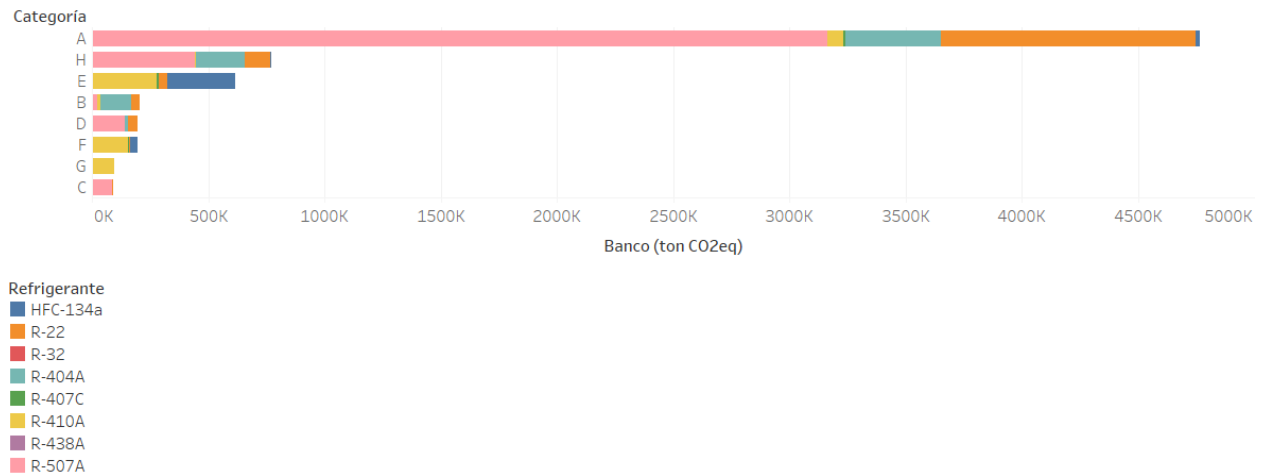


Figura 4-25 Banco (ton CO2eq) por categoría

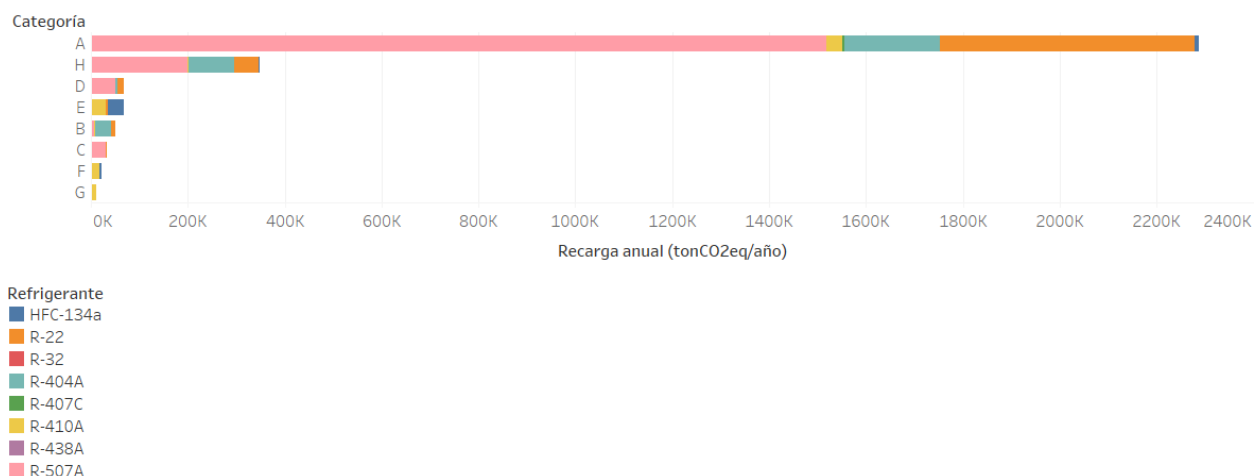
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-10 Banco (tonCO2eq) por categoría

Categoría	HFC-134a	R-22	R-32	R-404A	R-407C	R-410A	R-438A	R-507A	Total
Cat. A	18.054	1.096.491		410.572	8.451	66.992	811	3.162.408	4.763.778
Cat. B		36.158		133.181		10.911		24.548	204.799
Cat. C		6.869						85.514	92.383
Cat. D		38.475		15.459				141.667	195.601
Cat. E	294.398	36.026			6.384	279.662			616.471
Cat. F	29.362	7.039			1.254	157.425			195.080
Cat. G						95.566			95.566
Cat. H	136	112.582		209.449	358	4.006		442.439	768.974
Total	341.950	1.333.640		768.661	16.447	614.562	811	3.856.576	6.932.652

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-26 muestra la recarga anual por categoría, en donde al igual que lo que ocurre en el banco, la Categoría A y H son las de mayor tasa de mantención. En complemento en la Tabla 4-11 se tiene la tasa de mantención obtenidas en las secciones anteriores y la emisión respecto al banco.


Figura 4-26 Recarga anual (ton CO2eq/año) por categoría

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-11 Recarga anual por categoría

Categoría	Tasa mantención promedio (%)	Recarga anual (tonCO2eq/año)
A	48%	2.286.613
B	25%	51.200
C	35%	32.334
D	35%	68.460
E	11%	67.812
F	11%	21.459
G	11%	10.512
H	45%	346.036
Total		2.884.427

Fuente: Elaboración propia

La estimación por cada sector perteneciente a las categorías de la A a la H está disponible en el Anexo - Sección 11.2.

4.3 Análisis de resultados

4.3.1 Fuentes emisoras por categoría

Al respecto de la categoría A, es posible notar que existen muchos establecimientos con bancos menores a 500 kg, lo que indica que, si estos estuviesen asociados a un RUT por sí solos, no se considerarían grandes usuarios. Sin embargo, al asociar la tasa con el banco en términos de CO2 eq, fue posible observar que los establecimientos más pequeños en términos de banco en ton de CO2 eq, son también aquellos con mayores tasas de fuga, de hecho, para los establecimientos con un banco mayor o igual a 500 kg, el promedio de la tasa de mantención es del 27% y para bancos menores a 500 kg la tasa es del 66%, por lo que resulta importante considerarlos como establecimientos a incluir dentro de la norma, aunque no necesariamente esto implique la aplicación de un límite de emisión.

En el caso de la categoría H, es importante notar que a pesar de que la mayoría de los establecimientos presenta tasas de mantención menores al 60%, existen establecimientos con tasas superiores al 100%, lo que, sumado al tamaño del banco de estos establecimientos, hace que sean recintos prioritarios a los que aplicar límites de emisión. El promedio de la tasa de mantención de los establecimientos con un banco mayor o igual a 500 kg, según ATS es de 31% y según Dictuc es de 35%. Mientras que, los establecimientos con un banco menor a 500 kg poseen un promedio de tasa según ATS de 37% y según Dictuc es de 42%.

Adicionalmente, es importante mencionar que a pesar de los esfuerzos hechos en los inventarios sectoriales y en el desarrollo de este estudio, continúan existiendo brechas de conocimiento significativas en múltiples de las categorías propuestas, tanto por la dificultad de acceso a la información, como por las metodologías mismas. Esto último se explica en parte porque durante el desarrollo de los inventarios sectoriales, el objetivo principal era estimar un banco agregado, no así, estimar el banco alojado por establecimiento.

Por último, a pesar de que el objetivo es identificar fuentes de emisión asociadas a las categorías, se optó por caracterizarlas en función de las tasas presentadas, el tamaño del banco alojado en sus establecimientos, y anteriormente en la Sección 3.2.1, según tecnologías y tipos de refrigerantes. Las fuentes de emisión son transversales a todas las categorías y el levantamiento de información se enfoca en las emisiones asociadas a la operación.

4.3.2 Banco de HFCs y recarga por sector

Para complementar el análisis basado en bancos y tasas por categoría, respecto a la emisión según el PCG, en la Tabla 11-74 de la Sección 11.3 se muestran todos los subsectores analizados para el presente estudio. Cabe notar que, en algunos casos, a pesar de no contar con una tasa, es posible estimar la recarga (kg) extrapolada para el sector, no así por establecimiento.

Para la categoría A, se puede apreciar que el subsector hortofrutícola es aquel que presenta una mayor emisión con 416.349 ton de CO₂ eq, lo que enfatiza el interés en este sector y en esta categoría. Lo sigue el subsector de frutas y hortalizas congeladas con 28.498 ton de CO₂ eq., en donde ambos se prioriza el uso de R-507A el cual contiene un alto PCG. Respecto a las demás categorías, no se cuenta con la información necesaria para realizar un análisis más acabado y profundo, debido a la alta incertidumbre que presentan los datos mencionados y recopilados durante el presente informe. En la Tabla 4-12 se presentan todos los supuestos y observaciones que fueron necesarios realizar para poder contar con los datos de la manera más confiable posible. En la tabla recién mencionada, se puede notar que existen subsectores en los que fue necesario profundizar en los resultados e incluso modificarlos, ya que se cometían errores en la metodología o en los supuestos considerados, lo que en algunos casos como en el subsector lácteo, genera una gran discordancia entre lo obtenido por el inventario y los resultados

modificados en el presente estudio. El resultado detallado de estos supuestos y observaciones se muestra por sector en la Sección 11.2.

Tabla 4-12 Supuestos u observaciones a partir de los inventarios consultados

Categoría	Subsector	Supuestos y observaciones	Fuente
A	Hortofrutícola	Este sector no realiza la extrapolación para la recarga, por lo que se estimó un factor de ponderación de 35,6 el que relaciona la muestra de 39 empresas con el universo de 1.388 empresas.	Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020).
	Naviero	En el subsector de la armada existe una discordancia respecto a lo que entrega el Oficio Público O.T.A.I.P.A. N°12900/97 C.S.E de la Armada de Chile y lo que se realiza en el inventario. En el presente informe se asume una distribución proporcional de los refrigerantes informados en aquel oficio en las 49 embarcaciones. En el subsector de barcos factoría y marina mercante no se logra desagregar entre HFC-134a y R-404A para la refrigeración de víveres, por lo que en las tablas se denotan de manera conjunta.	Lescani (2020)
	Lácteo (ILMa y ILMe)	Dado que en este inventario se promedia la carga instalada con la recarga y posteriormente se extrapolan los datos, fue necesario tomar los datos de la muestra y separar la carga instalada de la recarga y luego extrapolar, para así tener una idea de la tasa de recarga de cada sector. Lo anterior, implicó que los datos presentaran una variación importante respecto a los datos originales del inventario.	CERES BCA (2022)
	Vitivinícola	Se utilizan las proyecciones para refrigeración, climatización y recarga en sistemas de climatización, con el fin de extrapolar los datos y desagregarlos por tipo de refrigerante. Además, al no tener la cantidad de refrigerante utilizada en sistema de climatización, pero sí la cantidad de quipos que utilizan cierto tipo de refrigerante para la muestra, fue necesario realizar el supuesto de que todos los sistemas poseen la misma carga de refrigerante, independientemente del tipo de refrigerante que usen.	S&C (2022)
	Alimentos congelados (Industria de la carne, cecinas, faenadoras, frutas y hortalizas congeladas)	Se utilizó los datos de la muestra, y los factores de extrapolación propuestos en el inventario para extrapolar todos los refrigerantes y las recargas, ya que solo se realiza la extrapolación para la carga instalada de los HFCs.	Allaires-Avalos (2023)
	Minero (Salas eléctricas)	La información se obtiene de diversas entrevistas realizadas a empresas prestadoras de servicios al sector minero. Se asume que cada máquina o motor de una máquina requiere de una sala eléctrica, por ende, se puede estimar que son 7.514 salas eléctricas. También se tiene la cantidad de refrigerante por equipos, que varía entre 1,5 a 3 kg.	Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023)
	Pesquero y acuícola	Se revisaron 2 inventarios, en donde el primero abarca las empresas procesadoras de las líneas de producción L2 (fresco y refrigerado) y L3 (congelado), presentes entre la Región de los Lagos y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena. El segundo inventario dedica sus esfuerzos a las mismas líneas de producción, pero desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, abarcando todo el territorio nacional. La metodología principal fue contactar a estas plantas, para luego, en base a los datos proporcionados, realizar una extrapolación confiable por regresión u otro método estadístico.	Chávez & Pérez (2020), Pérez & Caro (2023).

Categoría	Subsector	Supuestos y observaciones	Fuente
B	Lácteo (Productores primarios)	Ya que la categoría B corresponde a los productores primarios de este subsector, fue necesario realizar los mismos supuestos y observaciones que los presentados para la categoría A (ILMa y ILMe).	CERES BCA (2022)
C	Centros de distribución (Tramo 3 y 4)	El Tramo 3 según la definición del informe corresponde a recintos que se encuentran dentro de rango de 2.000 a 4.999 m ² de superficie, sin embargo, al dividir la cantidad de superficie utilizada por estos recintos (186.536 m ²) respecto a la cantidad de recintos (37), la superficie promedio de estos debiese ser de 5.042 m ² . Lo anterior indica una discordancia entre la clasificación y la superficie promedio de cada recinto. Se intentó corregir estos valores, sin embargo, en el mismo inventario se menciona que se cuenta con información reservada para obtener los datos antes mencionados, por lo que resulta difícil comprobar la información.	GAET (2023)
D	Centros de distribución (Tramo 1 y 2)	El Tramo 1 según la definición del informe corresponde a recintos que se encuentran dentro de rango de 150 a 499 m ² de superficie, sin embargo, al dividir la cantidad de superficie utilizada por estos recintos (81.118 m ²) respecto a la cantidad de recintos (48), la superficie promedio de estos debiese ser de 1.690 m ² . Al igual que en la Categoría C, se realizó un esfuerzo por corregir los valores, pero al no contar con toda la información, se optó por trabajar los datos tal y como se presentan en el inventario.	GAET (2023)
E	Hospitales (Recintos de salud hospitalarios)	Se realiza a partir de la superficie construida y se utilizan las encuestas realizadas para obtener la proporción y distribución de los diferentes refrigerantes.	Clarke C. (2023)
	Climatización grandes superficies comerciales (Malls)	Se obtiene a partir de la superficie construida en donde se tienen 278 centros comerciales en el país, lo que corresponde a 4.437.289 m ² . Posteriormente se utiliza la información obtenida por especialistas en climatización para obtener un factor que relacione la masa del refrigerante con la superficie.	Santander (2023)
	Climatización grandes superficies comerciales (Aeropuertos)	Se tienen 17 aeropuertos con su respectiva superficie, y en base a la información de proyectistas se obtiene un factor de masa por superficie.	Santander (2023)
F	Hospitales (Recintos de salud de atención primaria)	Se realiza a partir de la superficie construida y se utilizan las encuestas realizadas para obtener la proporción y distribución de los diferentes refrigerantes.	Clarke C. (2023)
	Climatización grandes superficies comerciales (Hoteles)	En el subsector de hoteles, el banco de refrigerante se obtiene a partir de la superficie hotelera construida por año, sin embargo, por lo que para el año 2019-2020 correspondería al último banco de refrigerante actualizado, sin embargo, en el inventario se procede a sumar el banco de cada año, lo que es erróneo, por lo que en este informe se considera el banco hasta los años ya mencionado.	Santander (2023)
H	Minería (Espacios habitables minería del cobre)	La metodología para la estimación de refrigerante en este subsector se basa principalmente en la información obtenidas por entrevistas. En donde un equipo que climatiza 15 m ² , contiene 800 gramos de refrigerantes, por lo que considerando la cantidad de espacios habitables se puede obtener la carga total.	Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023)
G	Supermercados	Se estima a partir de la superficie construida y asumiendo que solo el 24,16% de la superficie de supermercado se encuentra refrigerada.	GAET (2023)

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Comparación del banco y las emisiones con el INGEI 2022

Para comparar el banco obtenido de los diferentes inventarios con los resultados del INGEI 2022¹⁰, se procedió a agrupar los sectores en tres grupos: refrigeración industrial, refrigeración comercial, y aire acondicionado estacionario en instalaciones. Lo anterior se realizó con el fin de poder comparar de manera adecuada con la base de datos del INGEI, que presenta entre otras, estas tres clasificaciones. Cabe mencionar que no necesariamente coinciden con las aplicaciones identificadas para cada sector, pero que se agrupan según conveniencia con el fin de poder comparar.

En la Tabla 4-13 se puede observar la comparación de ambos bancos, aquel estimado en base a los inventarios sectoriales y el estimado en el INGEI, expresados en ton CO_{2eq}. Es posible notar que en refrigeración industrial y aire acondicionado existe una diferencia significativa entre ambos bancos estimados. Lo anterior se debe a que la metodología de estimación de ambos es distinta. En primer lugar, los inventarios sectoriales se estiman con la metodología *bottom-up*, mientras que el INGEI se estima con el método *top-down* a partir de datos de importación y exportación. Por un lado, el método *bottom-up*, al estar basado en el levantamiento de información primaria autoreportada por parte de los usuarios mismos y al solo ser posible estimar en base a muestras pequeñas con respecto al universo, podría subestimar los bancos. De manera complementaria para esta metodología, la subestimación del banco se puede deber a que algunos usuarios de HFC no se presentan en los subsectores revisados. También existe la posibilidad de que haya ciertos sesgos, y contesten usuarios más grandes que utilizan R-717 en vez de algún HFC, como ocurre en el subsector hortofrutícola, en donde existe una predominancia del refrigerante natural. Otra hipótesis corresponde a que los usuarios más nuevos que tienden a utilizar HFC por sobre R-22 presente en equipos antiguos, no se vean reflejados por la antigüedad de los estudios y su poca consolidación dentro de los usuarios de refrigerantes. Un último punto importante a considerar para intentar explicar esta subestimación, corresponde a que la extrapolación que se realiza en los inventarios revisados, no se considera el recambio de instalaciones antiguas a nuevas que utilizan HFC, por ejemplo, aquellos supermercados que transiten desde el R-22 al R-507A.

Por otro lado, el método *top-down*, al estar basado en información secundaria en la que no es posible diferenciar si un sistema de frío ingresa efectivamente a los establecimientos de usuarios, podría estar sobreestimando el banco. Esta sobreestimación para esta metodología se puede deber a que las tasas de fugas tienden a ser más grandes de lo esperadas como ocurre en las Categorías A y H, en donde se tienen valores de tasa de mantención más altas que las recomendadas por el IPCC. En complemento, puede existir un almacenamiento masivo de refrigerantes, especialmente a granel, que todavía no entra a utilizarse en las diferentes aplicaciones o subaplicaciones, e inclusive puede ser que los refrigerantes se estén utilizando para otras aplicaciones no consideradas en el INGEI.

¹⁰ La contraparte técnica entregó el borrador del INGEI 2022 para este fin.

Tabla 4-13 Comparación de banco estimado a partir de inventarios sectoriales e INGEI (ton CO2eq)

Sector	Banco de HFC en base a inventarios sectoriales (ton de CO2 eq)*	Banco de HFC en base al INGEI (ton de CO2 eq)*	Sub-aplicación
Hortofrutícola	2.596.039	10.718.923	Refrigeración Industrial
Armada	133.794		
Pesca de altamar	552.680		
Barcos factoría	65.574		
Marina mercante	144.293		
Acuícola	419.091		
Industria Láctea Mayor	23.950		
Industria Láctea Menor	23.943		
Productores primarios	203.663		
Vitivinícola	56.567		
Helados	112.920		
Faenadoras	41.496		
Frutas Y hortalizas	984.555		
Carnes de cerdo y ave	10.843		
Cecinas	12.448		
Salas eléctricas minería	20.235		
Subtotal	5.402.091	1.001.371	Refrigeración Comercial
Centros de distribución refrigerado Tramo 1	55.434		
Centros de distribución refrigerado Tramo 2	139.188		
Centros de distribución refrigerado Tramo 3	74.679		
Centros de distribución refrigerado Tramo 4	17.515		
Supermercados**	766.639		
Subtotal	1.053.455	1.665.281	Aire Acondicionado Estacionario - Instalaciones
Recintos de salud de atención primaria	63.560		
Recintos de salud hospitalario	304.020		
Malls	248.043		
Hoteles	116.182		
Aeropuertos	14.140		
Equipamiento minero**	15.036		
Espacios habitables	88.058		
Subtotal	849.039	13.385.575	
Total	7.304.585		

*Estimados a partir de AR5. **No necesariamente clasifica dentro de sub-aplicación de INGEI.

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4-14 compara las emisiones (o tasas de mantención) entre los datos recopilados de inventarios sectoriales y los valores reportados en el INGEI respecto a las emisiones de la etapa de operación¹¹. Para las emisiones derivadas de inventarios sectoriales, para realizar la comparación, se aplicaron tasas promedio de mantención: 48% para la categoría A y 45% para la

¹¹ En esta comparación se excluyen las emisiones asociadas a la instalación, contenedores y fin de vida útil incluidas en el INGEI, dado que el tipo de información compiladas en los inventarios sectoriales no incluye dichos ítem, sino únicamente lo correspondiente a emisiones por operación/mantención.

categoría H. En el caso de las categorías E, F y G, que representan principalmente sistemas de climatización comercial, se empleó la tasa sugerida por el IPCC. Al analizar los resultados, se observa que las emisiones de ambas fuentes son bastante cercanas, especialmente en el caso de la sub-aplicación de refrigeración industrial, donde la diferencia es solo del 17,5%. En el total de emisiones, la discrepancia entre los datos del INGEI y los de inventarios sectoriales es de aproximadamente un 2,4%.

Tabla 4-14 Comparación de emisiones estimado a partir de inventarios sectoriales e INGEI (ton CO2eq)

Sub-aplicación	INGEI	Inventarios sectoriales		
	Emisiones de HFC (ton de CO2 eq)	Tasa de emisión promedio por categoría (%)	Banco de HFC en base a inventarios sectoriales (ton de CO2 eq)	Emisiones de HFC (ton de CO2 eq)
Refrigeración industrial	2.140.503	48%	5.402.091	2.593.004
Refrigeración comercial	564.987	45%	1.053.455	474.055
Aire Acondicionado Estacionario - Instalaciones	532.269	11%	849.039	93.394
Total	3.237.759	-	7.304.585	3.160.453

Fuente: Elaboración propia

5. Propuesta, descripción y evaluación de mecanismos y medidas que permitan la reducción de emisiones de HFC en grandes sistemas de refrigeración

En las secciones a continuación se exponen los antecedentes recopilados con respecto a normativas y recomendaciones extranjeras (Sección 5.1), medidas de control y reducción de emisiones (Sección 5.2) y, por último, los mecanismos de fiscalización encontrados en la normativa revisada (Sección 5.3).

5.1 Antecedentes normativos y recomendaciones extranjeras sobre regulación de emisiones de HFC

En la Sección 3.2.2 se revisaron las regulaciones internacionales sobre el consumo de HFC's con el propósito de identificar formas de desagregación de usuarios y generar una propuesta y definición de grandes usuarios para compararla con lo desarrollado en el presente informe. En complemento con lo ya mencionado en la Sección 3.2.2, en esta subsección se revisarán otras normativas, las sustancias reguladas, los límites de consumo, las unidades de emisión si es que aplicara, las fuentes con restricciones de uso, los mecanismos de fiscalización y los alcances de las diferentes normativas en relación con las restricciones de refrigerantes.

Las normativas revisadas son:

- i.) Ley de Innovación y Fabricación de Estados Unidos del 2020, Protection of Environment Chapter I —Environmental Protection Agency Subchapter C —Air Programs- Part 84.
- ii.) Reglamento de la Unión Europea N°517/2014 y Reglamento de la Unión Europea (UE) N° 573/2024
- iii.) Regulación Federal de Halocarbonos, 2022, SOR/2022-110 y Regulación sobre Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono y alternativas de Halocarbonos, 2016, SOR/2016-137 de Canadá
- iv.) Reglamento para implementar un mecanismo de cuotas de importación para la reducción gradual del uso de Hidrofluorocarbonos (HFC), o sustancias controladas del Anexo F del Protocolo de Montreal y Reforma del artículo 13 del Decreto Ejecutivo N° 37614-MINAET, de Costa Rica.

En las siguientes subsecciones se presenta el detalle de la revisión de cada normativa, las que se organizan en: i) definiciones relevantes, ii) límites de consumo y calendarios de reducción, entre otros aspectos sobre reducción del consumo y producción de sustancias reguladas, iii) fuentes con restricciones de uso, según sea el caso, y iv) mecanismos de fiscalización, como requisitos de control, registro y reporte que deben seguir las empresas y personas involucradas en el manejo de estas sustancias. Las definiciones relevantes se seleccionan en cada caso según su importancia para comprender la ley en cuestión o si es que la definición pudiese ser replicable en la propuesta de norma.

Además, se describen las especificaciones técnicas y criterios para la instalación, mantenimiento, detección de fugas, eliminación y conservación de registros de actividades relacionadas con sustancias reguladas, destacando las obligaciones de los operadores y las autoridades en cuanto a la verificación del cumplimiento de las normativas y la presentación de informes en caso de fugas o liberaciones de dichas sustancias. Al final de esta sección se incluye una tabla comparativa que resume los aspectos más importantes de las cuatro normativas, destacando las principales similitudes y diferencias entre ellas.

Es importante destacar que, inicialmente, se intentó identificar límites de emisión, los que no se encontraron en las normas ya mencionadas, sin embargo, sí se establecen límites de consumo, los cuales indirectamente contribuyen a reducir las emisiones de HFC a la atmósfera a través de dos mecanismos: 1) al restringir la cantidad de consumo permitida para un usuario se fomenta la adopción de buenas prácticas como las mantenciones preventivas, que evitan el consumo; 2) al disminuir las importaciones, se promueve el uso de prácticas como la recuperación de refrigerantes.

Una norma de consumo a nivel nacional limita la circulación de sustancias HFC en el mercado, mientras que una norma de emisión sirve a modo de complemento a la primera en los aspectos que esta no aborda o en los que presente incentivos débiles. La norma de emisión podría prevenir que las sustancias se utilicen en aplicaciones con altas tasas de emisión y promovería un sistema de recuperación, regeneración y reciclaje más completo. Ambas cosas en conjunto permitirían una mejor eficiencia de implementación de la primera.

5.1.1 Ley de Innovación y Fabricación de Estados Unidos del 2020

5.1.1.1 Definiciones relevantes

Esta ley, que en su idioma original se denomina American innovation and manufacturing Act, Protection of Environment Chapter I —Environmental Protection Agency Subchapter C —Air Programs- Part 84, en adelante Ley AIM, define algunos conceptos esenciales para comprender el documento. A continuación, se ofrece un resumen de las más importantes:

- Administrador: responsable principal de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos o a su representante autorizado.
- Permiso: autorización limitada para producir o consumir una sustancia regulada, establecida bajo la Ley AIM. Estos permisos no representan un derecho de propiedad.
- Permiso específico para aplicaciones: permiso que se otorga para la producción o importación de sustancias reguladas destinadas a aplicaciones específicas, tal como lo estipula la Ley AIM.
- Consumo: suma de la producción más las importaciones, menos las exportaciones de una sustancia regulada.
- Destrucción: proceso mediante el cual una sustancia regulada es eliminada, alcanzando un nivel eficiente de destrucción.

- Importador: persona o entidad responsable de traer una sustancia regulada a los Estados Unidos.
- Sustancia regulada: hidrofluorocarbonos (HFC) identificados en la Ley AIM o cualquier otra sustancia que el administrador haya incluido en la lista. Dentro del listado se encuentran los HFC's, en conjunto a todas sus mezclas correspondientes.
- Cliente final: último comprador de una sustancia regulada antes de que se utilice para su propósito previsto. Esta definición abarca a contratistas de aire acondicionado en el mercado de aire acondicionado residencial, casas de sistemas de espuma, rellenos de aerosoles, fabricantes de semiconductores, fabricantes de equipos de aire acondicionado y refrigeración que envían equipos precargados y fabricantes de extintores de incendios.
- Uso crítico para misiones militares: usos de sustancias reguladas que son esenciales para la capacidad operativa de las fuerzas armadas, de acuerdo con el Departamento de Defensa de EE. UU.

5.1.1.2 Límites de consumo y producción

Respecto a la reducción de consumo, se establecen los siguientes límites.

- El nivel base de producción para las sustancias reguladas es de 382.535.439 toneladas métricas de valor de intercambio equivalente (ton CO₂ eq).
- El nivel base de consumo para las sustancias reguladas es de 302.538.316 toneladas métricas de valor de intercambio equivalente (ton CO₂ eq).
- Los límites anuales de producción y consumo en toneladas métricas de valor de intercambio equivalente se calculan multiplicando el nivel base de producción o consumo por el porcentaje establecido en la Tabla 3-10.

En la Tabla 5-1 se muestra el calendario de reducción para la producción y consumo establecido por el reglamento. En esta tabla cabe notar que el nivel de consumo es siempre menor a la producción, pues como se define en el Protocolo de Montreal, consumo = importación + producción – exportación. Cabe destacar que estos límites establecidos por la EPA son equivalentes a lo que se establece en la enmienda de Kigali. En complemento, es importante destacar que las líneas base establecidas en la normativa difieren de lo indicado en el Protocolo de Montreal, ya que la línea base de producción y consumo corresponden a 382.005.967 ton CO₂ eq y 302.538.289 ton CO₂ eq respectivamente.

Tabla 5-1 Calendario de reducción para la producción y consumo de HFC

Años	Producción total (ton CO ₂ eq)	Consumo total (ton CO ₂ eq)
2022-2023	344.299.157	273.498.315
2024-2028	220.521.263	181.522.990
2029-2033	114.760.632	90.761.495
2034-2035	76.507.088	60.507.663
2036 en adelante	57.380.316	45.380.747

Fuente: Elaboración propia a partir de (US-EPA, 2020)

5.1.1.3 Aplicaciones reguladas

En el reglamento se menciona que existen asignaciones específicas para aplicaciones individuales. Estas asignaciones son para garantizar que las sustancias reguladas se utilicen solamente en las aplicaciones críticas y que se encuentran autorizadas, evitando el uso para otros fines. A continuación, se enumeran las aplicaciones:

- Propulsor en inhaladores dosificados.
- Aerosoles de defensa.
- Espuma de poliuretano preformada para uso marino y remolques.
- Grabado de materiales semiconductores y limpieza de cámaras de depositación química en la fabricación de semiconductores.
- Usos militares críticos, como sistemas de supresión de incendios en vehículos blindados y embarcaciones, y aplicaciones desplegadas y expedicionarias.
- Supresión de incendios en aeronaves.

Se establecen los requisitos para la instalación y el uso de las sustancias que se encuentran reguladas por sector y fecha en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2 Requisitos de sistemas regulados por sector y fechas

Fecha de inicio	Sistema	Prohibición	Condición/Excepción
1 de enero del 2025	Aire acondicionado y bombas de calor (residenciales y comerciales ligeras)	Prohibido instalar sistemas con PCG ¹² $\geq 700^*$	Excepción: sistemas de flujo variable de refrigerante. Sistemas fabricados/importados antes de 2025 pueden instalarse hasta el 1 de enero del 2026
	Enfriadores para enfriamiento de <i>comfort</i> y pistas de hielo	Prohibido instalar sistemas con PCG ≥ 700	No aplica
	Transporte refrigerado (contenedores intermodales)	Prohibido usar sustancias con PCG ≥ 700 si la temperatura del refrigerante es de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ o mayor	No aplica
	Transporte refrigerado (carretera y marítimo)	Prohibido usar refrigerantes como R-404A y R-410B	No aplica
1 de enero del 2026	Sistema de flujo variable de refrigerante para aire acondicionado y bombas de calor	Prohibido instalar sistemas con PCG ≥ 700	No aplica
	Enfriadores para refrigeración de procesos industriales	Prohibido instalar enfriadores con PCG ≥ 700 si la temperatura del fluido es mayor a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$	No aplica

¹² PCG: potencial de calentamiento global. El PCG corresponde a un valor basado en las propiedades de los gases de efecto invernadero, que mide el forzamiento radiativo de cierto gas a lo largo del tiempo, en comparación con el causado por el CO₂ (IPCC, 2013).

Fecha de inicio	Sistema	Prohibición	Condición/Excepción
	Almacenes frigoríficos y sistemas de refrigeración en supermercados	Prohibido instalar sistemas grandes ¹³ con PCG ≥ 150 y sistemas pequeños ¹⁴ con PCG ≥ 300	No aplica
	Unidades de condensación remota para refrigeración de alimentos	Prohibido instalar sistemas con PCG ≥ 150 para grandes y PCG ≥ 300 para pequeños	No aplica
1 de enero de 2027	Sistemas en centros de datos, equipos TI y habitaciones de computadoras	Prohibido instalar sistemas con PCG ≥ 700	No aplica
	Máquinas de hielo comerciales automáticas (condensador remoto)	Prohibido usar refrigerantes como R-404A y R-507A	No aplica
	Equipos de procesamiento y distribución de alimentos refrigerados (condensador remoto)	Prohibido usar refrigerantes como R-404A y HFC-134a	No aplica
1 de enero de 2028	Sistemas de refrigeración de procesos industriales (excepto enfriadores) y supermercados	Prohibido instalar sistemas con PCG ≥ 700 si la temperatura del refrigerante que entra al evaporador está entre -50 °C y -30 °C	No aplica

*Los valores de PCG se encuentran en AR4, establecidos por la Ley AIM.

Fuente: Elaboración propia a partir de (US-EPA, 2020)

5.1.1.4 Mecanismos de monitoreo y fiscalización

Debe existir un registro y reporte en donde cualquier persona involucrada en actividades como producción, importación, exportación, transformación, uso como agente de proceso, destrucción, recuperación o reempaqueado de sustancias reguladas debe registrarse y presentar reportes. Estos informes deben enviarse dentro de los 45 días después al final de cada trimestre, a menos que se indique otra cosa. El contenido de los informes solicita el detalle de la cantidad (en kilogramos) de refrigerantes utilizados en las actividades mencionadas anteriormente. Adicionalmente se debe reportar el uso de estas sustancias, ya sea para instalaciones propias o externas, y proporcionar la información correspondiente de las cantidades producidas y permisos de emisión asociados. También se requiere indicar las sustancias vendidas o transferidas a terceros para procesos de transformación y destrucción, así como las exportaciones de sustancias que serán transformadas o destruidas en el extranjero. Estos requisitos aseguran que todas las actividades con sustancias reguladas estén debidamente documentadas y cumplan con las normativas.

En complemento, la EPA publicó una norma en el Registro Federal el pasado 11 de octubre, la que abarca las temáticas de gestión de HFC y sus respectivos sustitutos, haciendo énfasis en la

¹³ Un sistema grande corresponde a que posee una capacidad de carga de refrigerante de 200 libras o más (90,7 kg o más).

¹⁴ Un sistema pequeño es aquel que posee una capacidad de carga de refrigerante menor a 200 libras (menor a 90,7 kg).

reparación de fugas, sistemas de detección de fugas, normativa para refrigerantes HFC recuperados, recuperación de HFC en cilindros desechables antes de su eliminación y mantenimiento de registros, informes y etiquetado.

Esta norma introduce algunas definiciones como técnico certificado, inspección de fugas, tasa de fuga, recuperar, entre otras.

Se destaca que la venta de gas refrigerante recuperado se encuentra prohibida, al menos que haya sido recuperada por una persona certificada de acuerdo con lo que establece la EPA o que la venta, distribución o transferencia sea únicamente para su recuperación o destrucción.

Las reparaciones de fugas son aplicadas a aparatos que contengan refrigerante con una carga completa igual o mayor a 15 libras (6,8 kg) para los HFC, encontrándose exentos de esta aquellos aparatos que contengan únicamente una sustancia con potencial de agotamiento de ozono (PAO) y, los sistemas utilizados en el subsector de aire acondicionado y bombas de calor residenciales y comerciales ligeros. Estos requisitos son aplicados a partir del 1 de enero del 2026.

Los responsables de aparatos que contengan refrigerante deben reparar las fugas si superan la tasa de fuga establecida. Si no logran reducir la tasa de fuga por debajo del límite aplicable, deben implementar un plan de modernización o retiro del equipo. Las reparaciones deben ser realizadas por un técnico certificado. Las tasas de fuga aplicables son: 20% para aparatos de refrigeración comercial, 30% para aparatos de refrigeración de procesos industriales y 10% para aparatos de refrigeración de confort, transporte refrigerado o cualquier aparato con una carga completa de 15 libras o más de refrigerante.

Los propietarios u operadores de aparatos con refrigerante que superen las tasas de fuga establecidas deben realizar inspecciones periódicas de fugas. Para aparatos de refrigeración comercial o de procesos industriales con una carga de 500 libras (226,8 kg) o más, las inspecciones se deben realizar cada tres meses hasta demostrar que el aparato no ha tenido fugas superiores a la tasa permitida durante cuatro trimestres consecutivos. Para aparatos con una carga de 15 a 500 libras, las inspecciones deben hacerse una vez al año hasta demostrar que no han superado la tasa de fuga durante un año. Los aparatos de refrigeración de confort y otros sistemas también requieren inspecciones anuales bajo las mismas condiciones. Estas inspecciones deben ser realizadas por un técnico certificado usando métodos adecuados para cada tipo de aparato.

Se debe llevar un registro detallado de las inspecciones de fugas. Este registro debe incluir la fecha de la inspección, los métodos empleados para detectar fugas, una lista de las ubicaciones de cada fuga encontrada y una certificación de que se inspeccionaron todas las partes visibles y accesibles del aparato. Al finalizar la inspección, los técnicos certificados deben proporcionar al propietario o al operador del equipo la documentación correspondiente que cumpla con estos requisitos.

Para los sistemas de refrigeración utilizados en procesos industriales o comerciales que contengan 1.500 libras (680,4 kg) o más de refrigerante con una sustancia regulada, o su sustituto con un PCG superior a 53, deben instalar y operar un sistema automático de detección de fugas.

A partir del 1 de enero de 2026, estará prohibido vender, identificar o declarar que un refrigerante ha sido recuperado para su uso en la instalación, mantenimiento o reparación de equipos que contienen refrigerante si contiene más del 15% en peso de sustancias reguladas vírgenes, donde una sustancia regulada virgen se define como cualquier sustancia que no haya tenido uso genuino en un equipo. Finalmente, a partir de la misma fecha, los recuperadores certificados deberán etiquetar los contenedores con refrigerantes recuperados, certificando que el contenido no supera el 15% de sustancias reguladas vírgenes.

Por último, respecto a los cilindros desechables, se establece que, a partir del 1 de enero de 2028, cualquier persona que emplee un cilindro desechable deberá enviarlo para su procesamiento posterior con el fin de retirar el remanente, en los siguientes casos: 1) si el cilindro desechable contiene una o más sustancias reguladas; 2) si el cilindro desechable fue utilizado en el mantenimiento, reparación o instalación de equipos que contenían refrigerante o sistemas de extinción de incendios; y 3) si la persona no planea reutilizar el cilindro desechable en futuros trabajos de mantenimiento, reparación o instalación de equipos con refrigerante o de sistemas de extinción de incendios.

5.1.2 Reglamento de la Unión Europea N°517/2014 y Reglamento de la Unión Europea (UE) N° 573/2024

En la subsección 3.2.2 se revisaron ambas normativas de la UE, cubriendo los límites de consumo, en donde el Reglamento 517/2014 establece porcentajes de reducción y el Reglamento 573/2024 define una reducción a partir de la línea base de consumo del año 2015, en toneladas equivalentes de CO₂ eq. En complemento, se abordó el sistema de cuotas otorgadas por la UE a los importadores y algunas definiciones. Es importante destacar que el Reglamento 573/2024 sustituye al Reglamento 517/2014, ya que introduce objetivos actualizados para cumplir con los compromisos asumidos, especialmente en relación con el Acuerdo de París. En este contexto, la UE aumentó su meta de reducción de gases de efecto invernadero para 2030, pasando de un mínimo del 40% a al menos un 55%.

A partir de lo anterior, al comparar ambos reglamentos, se identifica una considerable similitud en varios de sus artículos. Por esta razón, esta sección se centrará principalmente en el Reglamento 573/2024, ya que constituye la normativa más actual en Europa y detalla con mayor precisión los mecanismos de fiscalización, como el Artículo 29, que establece la obligación de realizar controles.

5.1.2.1 Definiciones importantes

A continuación, se presentan algunas de las definiciones incluidas en este reglamento:

- Operador: empresa responsable del funcionamiento técnico de productos, aparatos o instalaciones reguladas por el reglamento.
- Aparato Sellado Herméticamente: aparato con partes estancas para contener gases fluorados con un índice de fugas bajo.
- Recuperación: recogida y almacenamiento de gases fluorados de efecto invernadero durante el mantenimiento, revisión o eliminación de productos o aparatos.
- Reciclado: nuevo uso de gases fluorados tras un procedimiento básico de limpieza.
- Regeneración: tratamiento de gases fluorados recuperados para que actúen como sustancias vírgenes.
- Destrucción: proceso de descomposición permanente y completa de un gas fluorado.
- Desmantelamiento: retirada permanente de productos o aparatos que contengan gases fluorados.
- Reparación: restauración de productos o aparatos que contengan gases fluorados para que funcionen correctamente.
- Instalación: unión de componentes que contengan gases fluorados para montar un sistema en su lugar de funcionamiento.
- Mantenimiento o Revisión: actividades que implican manipular circuitos o partes que contienen gases fluorados, incluidas reparaciones o adiciones de gas.
- Recipiente: receptáculo diseñado para transportar o almacenar gases fluorados.
- Sistema de Detección de Fugas: dispositivo para la detección de fugas de gases fluorados.
- Empresa: persona física o jurídica que realice actividades reguladas por el reglamento.
- Aire Acondicionado: proceso de tratamiento del aire para controlar temperatura, humedad, limpieza o distribución.
- Bomba de Calor: aparato que utiliza calor ambiente o residual para producir calor o frío.
- Refrigeración: proceso de mantener o disminuir la temperatura de un producto, sustancia o sistema.
- Enfriador: sistema que enfría un fluido transmisor térmico, como agua o glicol, con fines de refrigeración o *comfort*.
- Establecimiento en la Unión: se refiere a la persona física que tiene su residencia habitual en la Unión Europea y, en cuanto a una persona jurídica, a que cuente con un "establecimiento comercial permanente" en la Unión, de acuerdo con el artículo 5, punto 32 del Reglamento UE 952/2013. Este reglamento define un "establecimiento comercial permanente" como un centro fijo de actividades donde se disponen de manera permanente los recursos humanos y técnicos necesarios, y a través del cual se llevan a cabo, parcial o totalmente, las operaciones aduaneras de dicha entidad.
- Equipo militar: armas, municiones, y material de guerra destinados a fines militares que resultan necesarios para los intereses de la seguridad de los Estados miembros.

5.1.2.2 Límites de consumo

Lo que respecta a los límites de consumo, resulta importante destacar que el Reglamento 573/2024 fija línea base para el año 2015 en 176.700.479 ton CO₂ eq y a partir del 2025, se establece un calendario de reducción hasta el 2030, como se observa en la Tabla 3-12. Por otro lado, cabe mencionar que esta cifra difiere de la que se indica en el Protocolo de Montreal, ya que la línea base se fija en 163.576.330 ton CO₂ eq.

5.1.2.3 Sustancias reguladas

En el Reglamento de la Unión Europea, las sustancias reguladas se presentan en los Anexos I, II y III de dicho documento. Este abarca principalmente hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hidro(cloro)fluorocarbonos (HCFC) insaturados (conocidos como hidrofluoroolefinas HFC; e.g. HFC-1234yf, HFC-1234ze, HFC-1336mzz) y todas las mezclas correspondientes. El artículo 13 sobre controles de uso, menciona las prohibiciones y excepciones para limitar el uso de gases fluorados y SF₆. En la Tabla 5-3 se muestra las prohibiciones y excepciones del uso de estos gases del Reglamento 517/2014 y a modo de contraste la Tabla 5-4 se resume los puntos más importantes del artículo del Reglamento 573/2024. Cabe notar que, si bien estos Reglamentos norman principalmente el consumo, también establece prohibiciones para usos o equipos específicos, en un calendario específico que se muestra en las Tablas antes mencionada. También resulta importante mencionar que ambos reglamentos restringen los SF₆, sin embargo, la versión más actualizada ofrece una amplia gama de prohibiciones que a su vez son más específicas, en especial para aquellos gases que sobrepasen cierto PCG.

Tabla 5-3 Prohibiciones y excepciones de gases fluorados

Prohibición	Fecha de vigencia	Excepciones
Uso de SF ₆ en fundición y reciclado de aleaciones de magnesio	Inmediata	Se aplica a partir del 1 de enero del 2018 para aquellas instalaciones que usen una cantidad < 850 kg al año.
Uso de SF ₆ en neumáticos de vehículos	Inmediata	Ninguna
Uso de gases fluorados con PCG ≥ 2.500 para mantenimiento de refrigeración con carga ≥ 40 ton de CO ₂ eq	Desde 2020	No aplica a equipos militares ni refrigeración bajo -50°C.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Reglamento 517/2014).

Tabla 5-4 Prohibiciones y excepciones de gases fluorados

Prohibición	Fecha de vigencia	Excepciones
Uso de SF ₆ en fundición y reciclado de aleaciones de magnesio	Inmediata	Ninguna
Uso de SF ₆ en neumáticos de vehículos	Inmediata	Ninguna
Uso de gases fluorados con PCG ≥ 2.500 para mantenimiento de refrigeración con carga ≥ 40 ton de CO ₂ eq	Inmediata	No aplica a equipos militares ni refrigeración bajo -50°C. Hasta 2030 se permite el uso de gases regenerados o reciclados.

Prohibición	Fecha de vigencia	Excepciones
Uso de gases fluorados con PCG $\geq$ 2.500 para mantenimiento de cualquier aparato de refrigeración	Desde el 2025	Ninguna
Uso de gases fluorados con PCG $\geq$ 2.500 para mantenimiento de aire acondicionado y bombas de calor	Desde 2026	Exención hasta 2032 para gases regenerados o reciclados bajo condiciones específicas.
Uso de gases fluorados con PCG $\geq$ 750 para aparatos de refrigeración fijos (excepto enfriadores)	Desde 2035	No aplica a equipos militares, enfriamiento de medicamentos bajo -50°C, ni centrales nucleares.
Uso de SF₆ para mantenimiento de aparata eléctrica	Desde 2035	Permitido solo si es regenerado o reciclado, con excepciones por razones técnicas o emergencias
Uso de desflurano como anestésico inhalado	Desde 2026	Permitido solo en casos estrictamente necesarios por razones médicas
Puesta en funcionamiento de aparata eléctrica con gases fluorados de alto PCG	Desde 2026 a 2032 (según características del equipo)	Exenciones en procesos de contratación pública sin ofertas alternativas o por razones técnicas

Fuente: Elaboración propia a partir de (Reglamento 573/2024).

5.1.2.4 Mecanismos de monitoreo y fiscalización

En los artículos 5, 6 y 7 del Reglamento de la Unión Europea, se mencionan mecanismos para el control de fuga, sistemas de detección de fugas y registro de actividades respectivamente. En cuanto al control de fugas, se indica que este es obligatorio, y que debe ser aplicado a equipos móviles y fijos. Además, se determina la frecuencia de control:

- **Obligatoriedad**
 - Operadores y fabricantes de aparatos con al menos 5 ton de CO₂ eq. de gases fluorados (HFC y PFC) o 1 kilogramo de gases fluorados (HCFC) insaturados (“HFO”) deben realizar controles de fugas.
 - Aparatos sellados herméticamente están exentos si contienen menos de 10 ton de CO₂ eq. de HFC o PFC, o menos de 2 kg HCFC insaturado (“HFO”). A excepción de aparatos en edificios residenciales que contengan menos de 3 kg de gases fluorados están exentos si están etiquetados como sellados herméticamente.
 - Excepciones para equipos eléctricos si cumplen con una de las condiciones siguientes: tienen una tasa de fugas inferior al 0,1% anual según las pruebas del fabricante, están equipados con un sistema de alerta automática de presión o densidad, o contienen menos de 6 kilogramos de HFC o PFC.
- **Aplicación:**
 - Aplica a equipos fijos que contengan HFC o PFC, como: refrigeración, aire acondicionado, bombas de calor, sistemas de protección contra incendios, ciclos Rankine, equipos eléctricos.
 - Aplica también a equipos móviles, como: unidades de refrigeración en camiones y remolques frigoríficos, aire acondicionado y bombas de calor en vehículos

pesados, maquinaria agrícola y de construcción, trenes, metros, tranvías y aeronaves.

- Frecuencia de controles:
 - Aparatos con menos de 50 ton de CO₂ eq. de HFC o PFC, o menos de 10 kg de HCFC: control al menos cada 12 meses, o cada 24 meses con sistema de detección de fugas.
 - Aparatos con 50 a 500 ton de CO₂ eq. de HFC o PFC, o entre 10 y 100 kg de HCFC insaturado ("HFO"): control al menos cada 6 meses, o cada 12 meses con sistema de detección de fugas.
 - Aparatos con más de 500 ton de CO₂ eq. de HFC o PFC, o más de 100 kg HCFC insaturado ("HFO"): control al menos cada 3 meses, o cada 6 meses con sistema de detección de fugas.

En cuanto a los sistemas de detección de fugas, el Reglamento indica la obligatoriedad de instalar estos sistemas para ciertos equipos, además del deber de mantener estos sistemas:

- Obligación de instalar sistemas de detección de fugas:
 - Para aparatos fijos del artículo 5, desde refrigeración hasta sistemas de protección contra incendios, que contengan HFC o PFC en cantidad igual o superior a 500 ton de CO₂ eq., o gases HCFC insaturado ("HFO") en cantidad igual o superior a 100 kg. Estos sistemas deben alertar al operador o a la empresa de mantenimiento de cualquier fuga.
- Obligación adicional para aparatos instalados a partir de 2017:
 - Para aparatos fijos del artículo 5 (ciclos Rankine y equipos eléctricos), que contengan HFC o PFC en cantidad igual o superior a 500 ton de CO₂ eq., instalados a partir del 1 de enero de 2017, también deben contar con sistemas de detección de fugas que alerten de cualquier fuga.
- Mantenimiento de los sistemas de detección:
 - Los operadores de aparatos deben asegurarse de que estos sistemas de detección de fugas sean inspeccionados al menos cada 12 meses para garantizar su correcto funcionamiento.
 - En el caso de los aparatos de ciclo de Rankine y equipos eléctricos, los sistemas de detección de fugas deben ser inspeccionados al menos cada 6 años.

En cuanto a los registros, el Reglamento indica que operadores, empresas de venta de equipos y empresas de venta de sustancias controladas, deberán mantener registros acerca de la cantidad y tipo de refrigerante, fechas de controles, ventas, entre otros. En la Figura 5-1 se muestra de manera explicativa la información que debe tener los registros para cada usuario de gas

refrigerante. En la Sección 11.4¹⁵ se encuentra el detalle de estos registros para un mayor entendimiento.



Figura 5-1 Árbol explicativo de los registros para usuarios de gases refrigerantes del Reglamento 573/2024

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en el Artículo 29 que se refiere a la obligación de efectuar controles por parte de las autoridades para determinar el cumplimiento de reglamento. En este artículo se destaca lo siguiente.

- Las autoridades realizarán controles basados en un enfoque de riesgo, considerando el historial de cumplimiento de las empresas, el riesgo de incumplimiento de productos específicos y la información relevante de la Comisión, aduanas y otras autoridades.
- También se realizarán controles si hay pruebas o información que sugiera un posible incumplimiento.
- Los controles incluirán visitas in situ, verificación de documentación y equipos, y revisión de plataformas en línea.
- Las autoridades deben registrar los controles y conservar los registros durante al menos cinco años.

¹⁵ Aunque no se especifica la frecuencia con la que se realizan estos registros, se puede deducir que se documentan directamente en un sistema. En caso de que dicho sistema no exista, los registros se mantienen y conservan por un periodo mínimo de cinco años, garantizando su disponibilidad para las autoridades competentes.

5.1.3 Regulación Federal de Halocarbonos, 2022, SOR/2022-110 y Regulación sobre Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono y alternativas de Halocarbonos, 2016, SOR/2016-137, Canadá

Ambas regulaciones fueron revisadas, ya que la regulación SOR/2022-110 proporciona diversas definiciones, así como las sustancias y fuentes reguladas, y los mecanismos de supervisión. De manera complementaria, la regulación SOR/2016-137 establece un cronograma para la reducción del consumo de HFC y define la línea base de consumo.

5.1.3.1 Definiciones importantes

En esta regulación se establecen algunas definiciones importantes que se presentan a continuación:

- Persona acreditada: es aquella que posee un certificado que indica la finalización de un curso de concienciación ambiental sobre el reciclaje, recuperación y manipulación de refrigerantes halocarbonos. También se encuentra reconocida por las Fuerzas Canadienses o bajo las leyes de Canadá o de una provincia calificada para poder trabajar en sistemas de aire acondicionado o sistemas de refrigeración.
- Recipiente: es un contenedor que contiene o está diseñado para contener un halocarbono con el fin de almacenaje o transporte.
- Instalación: corresponde a un sistema de aire acondicionado, sistema de refrigeración o sistema de solventes, la unión de dos o más componentes que contienen o están diseñados para contener un halocarbono esencial para el funcionamiento del sistema.
- Sistema grande: corresponde a un sistema de aire acondicionado o sistema de refrigeración que consiste en: un solo circuito de refrigerante que contiene o está diseñado para contener más de 10 kg de halocarbono; o múltiples circuitos de refrigerante, los cuales contiene o está diseñado para contener más de 10 kg de halocarbono.
- Sistema pequeño: corresponde a un sistema de aire acondicionado o sistema de refrigeración que consiste en: un solo circuito de refrigerante que contiene o está diseñado para contener 10 kg o menos de halocarbono; o múltiples circuitos de refrigerante, los cuales contiene o está diseñado para contener 10 kg o menos de halocarbono.

5.1.3.2 Límites de consumo

El calendario de reducción de consumo, que coincide con lo establecido en la Enmienda de Kigali para los países desarrollados, se muestra en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5 Calendario de reducción de consumo de HFC en norma canadiense

Años	Reducción de consumo (%)
2019-2023	90%
2024-2028	60%
2029-2033	30%
2034-2035	20%
2036 en adelante	15%

Fuente: Elaboración propia a partir de SOR/2016-137.

En complemento, establece que el consumo base asignado a una persona responsable de un sistema que contiene halocarbonos, se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 5-1 Determinación de consumo base asignado a responsable de un sistema según norma canadiense

$$\text{Consumo base} = \frac{C}{D} * E$$

donde

- C representa el consumo promedio de HFC de la persona durante los años 2014 y 2015, expresado en ton de CO2 eq.
- D es el consumo promedio de HFC en Canadá para los años 2014 y 2015, también expresado en ton de CO2 eq.
- E corresponde a la línea base de consumo, el que equivale a 18.008.795 ton de CO2 eq.
-

5.1.3.3 Sustancias reguladas

En el reglamento se establecen que serán regulados todos los halocarbonos y sus respectivas mezclas, con énfasis en los HCFC, PFC, HBFC y HFC.

En lo que respecta a la instalación, mantenimiento y retiro de halocarbonos en sistemas de aire acondicionado o refrigeración, la normativa establece que solo una persona acreditada está autorizada para llevar a cabo estas tareas, así como la recuperación de los halocarbonos en un recipiente adecuado.

5.1.3.4 Fuentes reguladas

Los tipos de equipos regulados incluyen sistema de aire acondicionado, sistema de refrigeración, sistema de solventes, sistema de extinción de incendios y contenedores.

En cuanto a la frecuencia de fugas, los sistemas que contengan más de 10 kg de halocarbonos deben someterse a pruebas de fugas al menos una vez al año y con un intervalo máximo de 15

meses entre cada prueba. Si se detecta una fuga, la persona acreditada debe, dentro de los siete días posteriores a la detección, realizar una de las siguientes acciones: reparar la fuga, aislar la parte afectada del sistema y recuperar el halocarbono, o recuperar todo el halocarbono del sistema.

Además, para cada sistema de aire acondicionado o refrigeración de gran capacidad, o recipiente que contenga más de 10 kg de halocarbonos, se debe crear un inventario que incluya información clave, como el tipo de equipo, el nombre y dirección del propietario, el responsable del sistema, la ubicación, el número de serie o identificador del sistema, el tipo de halocarbono utilizado y su capacidad de carga en kilogramos.

También es obligatorio llevar un registro de actividades para los sistemas grandes y pequeños, donde se documenten todas las operaciones relacionadas con el sistema o recipiente, como la instalación, mantenimiento, desmantelamiento o transferencia de propiedad.

Respecto a los documentos, ya sean inventarios, informes y registros de actividades, no se indica de manera específica al lugar que se deben enviar, sin embargo, en el apartado sobre retención de documentos, se menciona que el usuario se debe quedar con una copia por al menos 5 años, y se requieren que estén disponibles cuando el ministro los solicite.

5.1.3.5 Mecanismos de monitoreo y fiscalización

En caso de una liberación de 100 kg o más de halocarbonos, el propietario del sistema debe presentar dos informes al Ministerio. El primero, que puede ser verbal o escrito, debe enviarse dentro de las 24 horas posteriores a la detección y debe incluir información sobre el equipo, el propietario, el responsable y la cantidad de halocarbono liberado. El segundo informe, más detallado, debe presentarse dentro de los 30 días y debe contener información adicional, como el número de serie del sistema, la ubicación exacta, la fecha de la liberación, las circunstancias que la causaron, y las medidas correctivas y preventivas tomadas.

Si la liberación es de entre 10 kg y menos de 100 kg, también debe presentarse un informe dependiendo de la fecha de la liberación, a más tardar el 31 de julio para las liberaciones detectadas entre el 1 de enero y el 30 de junio del mismo año; y a más tardar el 31 de enero del año siguiente para las liberaciones detectadas entre el 1 de julio y 31 de diciembre. El informe debe contener el mismo nivel de detalle que el segundo informe requerido para liberaciones mayores a 100 kg.

5.1.4 Reglamento para implementar un mecanismo de cuotas de importación para la reducción gradual del uso de Hidrofluorocarbonos (HFC), o sustancias controladas del Anexo F del Protocolo de Montreal y Reforma del artículo 13 del Decreto Ejecutivo N°37614-MINAET, de Costa Rica

La regulación establecida por el Gobierno de Costa Rica se basa en un sistema de cuotas para importadores distribuidas partir de la línea base. Incluye un calendario de reducción de consumo de HFC, prohibiciones y sanciones. Resulta importante la mirada de este reglamento, ya que corresponde a un país que al igual que Chile, es un país latinoamericano perteneciente a la OCDE. Al respecto de esta normativa cabe mencionar que es similar al reglamento de Chile (ver Sección 6.1.1), en cuanto a las definiciones y los mecanismos de asignación de cuotas para importadores.

5.1.4.1 Definiciones importantes

A continuación, se muestran algunas definiciones relevantes incluidas en el Reglamento de Costa Rica:

- Cuota de importación: cantidad máxima anual permitida para la importación de HFC por parte de un importador, y medida en CO₂ eq.
- Cuota remanente: cuota adjudicada que no fue utilizada por el importador.
- Importador de gases refrigerantes: persona física o jurídica, pública o privada, que nacionaliza gases refrigerantes para su venta o uso propio.
- Importador histórico: importadores que hayan nacionalizado HFC al menos en uno de los años entre 2020 y 2022.
- Importador nuevo: persona o entidad no registrada antes del 31 de diciembre de 2022, que desea nacionalizar gases refrigerantes. Una vez registrado, debe cumplir con las regulaciones de asignación de cuotas y calendarios de reducción, siendo considerado como importador histórico.
- Línea base país: promedio de HFC consumidos entre 2020 y 2022 más el 65% del consumo promedio de HCFC entre 2009 y 2010, medido en CO₂ eq, usado para calcular cuotas individuales de importadores históricos y que es lo indicado en la Enmienda de Kigali para los países en desarrollo.
- Usos críticos o esenciales de las sustancias agotadoras de ozono (SAO): usos que son necesarios para la salud, seguridad, o el funcionamiento de la sociedad, y que no tienen alternativas técnica y económicamente viables.

5.1.4.2 Asignación de cuotas

El decreto asigna cuotas de importación de HFC en base a una fórmula detallada que se ajusta al promedio de consumo de los últimos años y los compromisos internacionales bajo el Protocolo de Montreal:

Ecuación 5-2 Determinación de cuotas de importación según Reglamento Costa Rica

$$C = \left\{ Y + \left[\left(\frac{Y}{T} \right) * (Z * 0,65) \right] \right\} * 0,88$$

- C: cuota asignada a cada importador.
- Y: promedio de importaciones del importador en toneladas de CO2 eq. entre 2020, 2021, y 2022.
- T: promedio total de consumo de HFC en Costa Rica entre 2020, 2021, y 2022.
- Z: promedio de consumo de HCFC entre 2009 y 2010.

La fórmula toma en cuenta el 65% del consumo de HCFC y el 88% de la base calculada, lo que asegura una reducción gradual del uso de HFC, respetando el principio de no regresión, el que establece que la cuota definida no puede ser superior a ninguna cuota establecida en los años anteriores ni a las importaciones realizadas en el año anterior.

El Estado dispondrá de un fondo de reserva equivalente al 12% de la línea base del país. Este fondo se utilizará para:

- Garantizar el suministro de HFC para usos críticos o esenciales y para hacer frente a situaciones de fuerza mayor, emergencias, o cualquier otra necesidad imprevista o relevante para el desarrollo del país y el bienestar de sus habitantes. Para esto, se destinará un 2% de la cuota nacional.
- Asignar cuotas a nuevos importadores, disponiendo de un 10% de la cuota nacional para este fin.

Si no hay nuevos importadores, ese 10% se sumará a las cuotas remanentes y se redistribuirá anualmente entre todos los interesados.

- Las solicitudes para el fondo de reserva pueden presentarse durante todo el año, con la justificación correspondiente y sujeta a disponibilidad.
- Los nuevos importadores deben presentar una solicitud de interés entre el 1 y 15 de agosto del año anterior, indicando la cantidad de CO2 eq. que desean importar.
- Si no hay nuevos solicitantes, las cuotas no asignadas se sumarán a las remanentes para su redistribución.
- El total asignado a nuevos importadores no superará el 20% del fondo de reserva destinado a ellos.

Las cuotas no utilizadas por los importadores se destinarán a:

- Reabastecer el fondo de reserva del Estado.
- Asegurar la disponibilidad de HFC en el mercado.
- Autorizar a un importador histórico a importar más de su cuota asignada.

- Autorizar a un nuevo importador a superar su cuota asignada si ya cuenta con una.

Los importadores no podrán acumular ni transferir las cuotas de HFC no utilizadas de un año calendario al siguiente, ni cederlas a otro importador.

5.1.4.3 Límites de consumo

Se aplicará una reducción gradual de HFC a todos los importadores registrados, como se muestra la Tabla 5-6.

Tabla 5-6 Calendario de reducción de consumo de HFC

Años	Reducción (%) sobre la cuota de 2024	Límite máximo de consumo
2024-2028	0%	Línea base
2029-2034	10%	No superar la cantidad importada en 2028
2035-2039	30%	No superar la cantidad importada en 2034
2040-2044	50%	No superar la cantidad importada en 2039
2045 en adelante	80%	No superar la cantidad importada en 2044

Fuente: Elaboración propia a partir del Reglamento para implementar un mecanismo de cuotas de importación para la reducción gradual del uso de Hidrofluorocarbonos (HFC), de Costa Rica.

5.1.4.4 Fuentes reguladas

Los equipos que se encuentran regulados son aquellos que están incluidos en el Anexo D del Protocolo de Montreal, ratificado por Costa Rica a través de la Ley N° 7223 del 8 de abril de 1991. Estos corresponden principalmente a equipos de aire acondicionado en automóviles y camiones que estén o no incorporados a los vehículos, equipos de refrigeración y aire acondicionado/bombas de calor domésticos y comerciales, como refrigeradores, congeladores, deshumificadores, enfriadores de agua, máquinas productoras de hielo, equipos de aire acondicionado y bombas de calor, productos en aerosol, salvo productos médicos en aerosol, extintores portátiles, planchas, tableros y cubiertas de tuberías aislantes y prepolímeros. A pesar de lo recién mencionado, es importante destacar que al consultar el Anexo D de la Ley N° 7223, se refiere a los equipos que utilizan gases normados en el Anexo A (CFC y Halones), pero en el Artículo 3 del Reglamento revisado, los equipos regulados son los del Anexo D cayendo en una discordancia.

5.1.4.5 Mecanismos de monitoreo y fiscalización

No se establecen mecanismos de fiscalizaciones preventivos relativos a las fugas o mantenimiento de los sistemas, pero sí se mencionan sanciones al no cumplimiento del reglamento. Estas sanciones incluyen amonestaciones, restricciones o paralización de actividades, cancelación de permisos otorgados, y suspensión o cancelación del registro de importador de HFC. Estas medidas pueden aplicarse tanto a particulares como a funcionarios públicos.

5.1.5 Comparación entre normativas

En la Tabla 5-7 se muestra un resumen de las cuatro normas recientemente revisadas, con los criterios más importantes y de manera complementaria en la Tabla 11-76 de Anexos se realiza una comparativa a partir de la reducción de consumo propuesta por las diferentes normativas y lo establecido en la Enmienda de Kigali para Chile.

Tabla 5-7 Comparativa de normas y reglamentos

Criterios	Norma US, 2020	Reglamento UE, N°573/2024	Regulación Canadiense, SOR/2022-110	Regulación de Costa Rica, 2023
Sustancias reguladas	HFC	HFC, PFC y HCFC	Halocarbonos	HFC
Límites de consumo línea base	382.535.439	176.700.479	18.008.795	1.450.799
Unidades utilizadas	Libras, kg, ton CO2 eq	ton CO2 eq	kg, ton CO2 eq	ton CO2 eq
Fuentes reguladas	Propulsor en inhaladores dosificados, aerosoles de defensa, espuma de poliuretano preformada para uso marino y remolques, grabado de materiales semiconductoras y limpieza de cámaras de deposición química en la fabricación de semiconductores, usos militares críticos, supresión de incendios en aeronaves, aire acondicionado y bombas de calor, transporte refrigerado, almacenes frigoríficos y sistemas de refrigeración en supermercados, unidades de condensación remota para refrigeración de alimentos, sistemas de refrigeración de procesos industriales.	Equipos de refrigeración, aire acondicionado, bombas de calor, sistemas de protección contra incendios, ciclos Rankine, equipos eléctricos. unidades de refrigeración en camiones y remolques frigoríficos, aire acondicionado y bombas de calor en vehículos pesados, maquinaria agrícola y de construcción, trenes, metros, tranvías y aeronaves.	Sistema de aire acondicionado, sistema de refrigeración, sistema de solventes.	Equipos de aire acondicionado en automóviles y camiones (estén o no incorporados a los vehículos). Equipos de refrigeración y aire acondicionado/bombas de calor domésticos y comerciales, como refrigeradores, congeladores, deshumificadores, enfriadores de agua, máquinas productoras de hielo, equipos de aire acondicionado y bombas de calor, productos en aerosol, salvo productos médicos en aerosol, extintores portátiles, planchas, tableros y cubiertas de tuberías aislantes y prepolímeros.

Criterios	Norma US, 2020	Reglamento UE, N°573/2024	Regulación Canadiense, SOR/2022-110	Regulación de Costa Rica, 2023
Restricciones de uso	Prohibido instalar enfriadores para refrigeración de procesos industriales con un PCG $\geq$ 700 si la temperatura del fluido es mayor a -30 °C. En almacenes frigoríficos y sistemas de refrigeración en supermercados, está prohibido instalar sistemas grandes con un PCG $\geq$ 150 y sistemas pequeños con un PCG $\geq$ 300. En los sistemas de refrigeración de procesos industriales (excepto enfriadores) y en supermercados, está prohibido instalar sistemas con un PCG $\geq$ 700 si la temperatura del refrigerante que entra al evaporador está entre -50 °C y -30 °C.	Uso de gases fluorados con PCG $\geq$ 2.500 para mantenimiento de refrigeración con carga $\geq$ 40 ton de CO2 eq. Además, se prohíbe el uso de gases fluorados con un PCG $\geq$ 750 para aparatos de refrigeración fijos, con excepción de los enfriadores.	No aplica.	No aplica.
Mecanismos de fiscalización	Registro de actividades tanto para productores como consumidores.	Controles de fugas, sistemas de detección de fugas, conservación de registros de actividades, controles basados en enfoque de riesgo.	Controles de pruebas de fugas, registros de actividades, elaboración de informes en caso de fugas especificando actividades preventivas y correctivas.	Sanciones a incumplimientos.

Fuente: Elaboración propia

5.2 Medidas de control y reducción de emisiones

En esta sección se discute sobre las medidas de control descritas en la literatura. Es importante notar que, a diferencia de otros contaminantes, para los cuales existen tecnologías de abatimiento, para las sustancias HFC, no existen símiles, sino que más bien son medidas asociadas a buenas prácticas, reemplazo de sustancias con alto PCG por otras con menor o nulo PCG.

5.2.1 Buenas prácticas

A continuación, en la Tabla 5-8, se muestra una ficha descriptiva de las medidas consideradas buenas prácticas, que se refieren al conjunto de medidas que incluyen la utilización de mejores componentes, prevención de fugas durante el uso y recarga, mantenimiento de los sistemas y recuperación al final de su vida útil. En relación con estas medidas, la experiencia de las personas técnicas, evidenciada en las entrevistas realizadas en la primera etapa de este estudio, confirman la eficiencia y menor costo de tomar acciones preventivas.

Tabla 5-8 Ficha de medidas asociadas a buenas prácticas

Medida	Consideraciones	Descripción	Fuente
Buenas Prácticas	Aspectos operacionales	Requiere de modificaciones en la operación actual de sistemas, como incluir mantenencias preventivas de rutina y recuperación.	(Purohit et al., 2020); Entrevistas ID 6 y 28 – Anexos Digitales
	Categorías de establecimientos en que es aplicable	Todas las categorías.	
	Efectividad de reducción	Se estima que aplicando estas buenas prácticas se puede eliminar del 30% al 42% de las emisiones acumuladas en los equipos de refrigeración y aire acondicionado, y el 88% de las emisiones provenientes de equipos desechados debido a la recuperación al final de su vida útil.	
	Costos	Los costos se asocian a el aumento en la frecuencia en mantenencias preventivas, en la mejora de los componentes (cañerías, tuercas y otras componentes del sistema) o inversión en sistemas de detección.	
	Ahorros	Los ahorros podrían estar derivados de evitar mantenencias correctivas, que suelen ser más costosas que las preventivas y del menor consumo de sustancias HFC.	

Fuente: Elaboración propia

Del estudio de Purohit & Höglund-Isaksson (2017), se extrajeron directamente los datos sobre la eficiencia de captura y costos de buenas prácticas, incluyendo controles preventivos y recuperación al final de la vida útil.

De manera complementaria en la Tabla 5-9 refleja las buenas prácticas asociadas a cada categoría, con su respectiva eficiencia de remoción, costos de inversión, operación y mantenimiento. Cabe destacar que la unidad utilizada en esta última tabla es UF/ton y se convierte a partir de la unidad €/kton con el mismo procedimiento de la Ecuación 5-4.

Tabla 5-9 Costos de medidas de buenas prácticas, por categoría

Categoría	Tipo	Tipo de buena práctica	Eficiencia de remoción	Costos de inversión [UF/ton refrigerante]	Costos de operación y mantenimiento [UF/ton refrigerante]
A	Banco	Control de fugas a partir de mejora de componentes	42%	0	40
	Emisión	Recolección al final de vida útil	88%	0	5
B	Banco	Control de fugas a partir de mejora de componentes	42%	0	40
	Emisión	Recolección al final de vida útil	88%	0	5
C	Banco	Control de fugas a partir de mejora de componentes	33%	0	76
	Emisión	Recolección al final de vida útil	80%	0	32
D	Banco	Control de fugas a partir de mejora de componentes	33%	0	76
	Emisión	Recolección al final de vida útil	80%	0	32
E	Banco	Control de fugas a partir de mejora de componentes	30%	0	40
	Emisión	Recolección al final de vida útil	88%	0	923
F	Banco	Control de fugas a partir de mejora de componentes	30%	S.I.	S.I.
	Emisión	Recolección al final de vida útil	88%	S.I.	S.I.
G	Banco	Control de fugas a partir de mejora de componentes	30%	0	40
	Emisión	Recolección al final de vida útil	88%	0	924
H	Banco	Control de fugas a partir de mejora de componentes	30%	0	40
	Emisión	Recolección al final de vida útil	88%	0	923

S.I.: Sin Información

Fuente: Elaboración propia a partir de (Purohit Pallav & Höglund - Isaksson Lena, 2017).

Estos datos, originalmente expresados en millones de euros por kilotonelada de refrigerante, fueron convertidos para los fines de este estudio mediante el siguiente procedimiento:

1. Obtener conversión divisa: se calcula el promedio anual del tipo de cambio euro-peso chileno del año 2017 (año en el que se publicó el documento estudiado), utilizando los datos proporcionados por el Banco Central de Chile.
2. Ajustar por inflación: se ajusta la conversión divisa obtenida en el paso anterior utilizando la calculadora de IPC del INE. Este ajuste se realiza entre el periodo de enero de 2017 hasta septiembre de 2024, y entrega el valor del IPC, el índice de precios al consumidor, la variación del periodo.
3. Se calcula la conversión según la Ecuación 5-3:

Ecuación 5-3 Conversión de divisas

$$Y = X * (1 + IPC) * ConvDivisa$$

Donde:

- Y: Valor de CLP, año 2024.
- X: Valor en €, año 2017.

- $1 + IPC$: Variación del periodo, inflación.
- $ConvDivisa$: Promedio anual del tipo de cambio euro-peso chileno.

4) Se convierte los valores en CLP al valor UF¹⁶.

Los resultados de dicha conversión se presentan en la Tabla 5-10.

Tabla 5-10 Costos buenas prácticas desagregadas

Medida	Categoría al que aplica	Refrigerante	Eficiencia de captura (%)	Costo OM (UF/ton/año)
Control de fugas a partir de mejora de componentes	A	Todos	42	40
	B	Todos	42	40
	C	Todos	33	76
	D	Todos	33	76
	E	Todos	30	40
	F	Todos	30	S.I.
	G	Todos	30	40
	H	Todos	30	40
Recolección al final de vida útil	A	Todos	88	5
	B	Todos	88	5
	C	Todos	80	32
	D	Todos	80	32
	E	Todos	88	923
	F	Todos	88	S.I.
	G	Todos	88	924
	H	Todos	88	923

S.I.: Sin información.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Purohit Pallav & Höglund - Isaksson Lena, 2017).

Como se puede observar en la Tabla 5-10, la recolección al final de vida útil tiene una alta eficiencia de captura, sin embargo, se considera que ese valor aplica únicamente para el refrigerante capturado con esa acción, de modo que este alto valor no se asociaría al banco total del sistema evaluado. Por lo anterior, para el análisis se decide modelar una única medida de buenas prácticas, cuya eficiencia de captura se elige igual a la del control de fugas a partir de mejora de componentes, a modo conservador, a la cual se le asigna un costo equivalente a la suma de dicha medida con el costo de la recolección al final de vida útil; lo anterior se presenta en la siguiente tabla.

¹⁶ Valor del UF corresponde al día 24 de octubre del 2024.

Tabla 5-11 Costo y eficiencia medida buenas prácticas

Categoría	Eficiencia	Costo (UF/ton/año)
A	42%	45
B	42%	45
C	33%	108
D	33%	108
E	30%	963
F	30%	S.I.
G	30%	964
H	30%	963

Fuente: Elaboración propia

5.2.2 Recambio de refrigerantes

En cuanto al reemplazo de HFC con sustancias de menor o nulo PCG, existen cinco alternativas: HFC-152a, HFO-1234yf, hidrocarburos como propano e isobutano, amoníaco y CO₂ transcrito (o presurizado). El HFC-152a es un refrigerante de bajo PCG en comparación con otros HFCs, lo que lo convierte en una alternativa para la sustitución de refrigerantes de alto PCG en diversas aplicaciones. El HFC-152a tiene características termo físicas y de rendimiento similares a las del HFC-134a.

De forma similar, el HFO-1234yf (2,3,3,3-tetrafluoropropeno) es un refrigerante de cuarta generación con cero Potencial de Agotamiento de la capa de Ozono, muy bajo PCG y características de rendimiento termodinámico similares al HFC-134a.

En cuanto a los hidrocarburos, estos exhiben propiedades termodinámicas altamente eficientes, lo que los posiciona como refrigerantes equivalentes o superiores a los HFC y HCFC para la mayoría de las aplicaciones. Son clasificados como refrigerantes naturales y presentan un PAO igual a cero y PCG prácticamente insignificante. Los hidrocarburos más utilizados son R290 (propano), R600a (isobutano) y R1270 (propileno).

El amoníaco (R-717) es un compuesto químico inorgánico perteneciente al grupo de las aminas, compuesto por un átomo de nitrógeno unido covalentemente a tres átomos de hidrógeno. Es ampliamente utilizado como refrigerante en aplicaciones industriales debido a sus propiedades termodinámicas, que incluyen una alta eficiencia energética y capacidad de enfriamiento. Como parte de los refrigerantes naturales, tiene un PAO igual a cero y un PCG casi nulo.

El CO₂ (dióxido de carbono) es un refrigerante natural conocido por su bajo impacto ambiental, ya que no contribuye al agotamiento de la capa de ozono y tiene un PCG de 1, lo que lo convierte en una alternativa ecológica a los refrigerantes fluorados (HFC).

Tabla 5-12 Ficha de medidas asociadas al reemplazo de sustancias HFC de alto PCG

Medida	Consideraciones	Descripción	Fuente
Recambio a HFC-152a	Aspectos operacionales	El R-152a tiene una “clasificación de inflamabilidad ASHRAE A2”, con una velocidad de llama relativamente alta. La mitigación de los problemas de inflamabilidad sería más difícil con el HFC-152a que otros refrigerantes como el HFC-32, por lo que posiblemente podría requerir la limitación de la carga máxima de refrigerante o el uso de circuitos secundarios	(Purohit et al., 2020; UNEP, 2009)
	PCG ¹⁷	El PCG de HFC-152a es 124, mucho menor que los valores de otros HFC como el HFC-134a (1.430) o el HFC-404A (3.922).	
	Efectividad de reducción	El HFC-152a se ha demostrado como una alternativa eficaz en aplicaciones de refrigeración y climatización comercial alcanzando eficiencias de eliminación desde los 93,81% hasta 96,13%. Para los sistemas de refrigeración industrial se estima una reducción de emisiones cercana al 95%.	
	Categorías de establecimientos en que es aplicable	El HCF-152a puede ser utilizado en reemplazo de R-410A, R-407C y HCFC-22, los cuales son aplicados en establecimientos de categorías A, B, C, D, E, F y H.	
	Vida útil	10 años	
	Costos	Los costos incluyen la adquisición del nuevo refrigerante y el sistema.	
	Ahorros	Existen ahorros anuales significativos en los costos de operación y mantenimiento.	
	Impactos sociales, ambientales, y económicos	Debido al bajo PCG del HFC-152a, genera una menor contribución al cambio climático en caso de fugas o liberación de este gas a la atmósfera. El cambio hacia este refrigerante significa un impacto económico debido a que está ligado a una inversión ya que es necesario rediseñar significativamente los sistemas de HCFC-22, R-410A o R-407 para que puedan utilizar HFC-152A. Adicionalmente, el riesgo de operación es mayor debido a la inflamabilidad de este refrigerante.	
Recambio a HFC-32	Aspectos operacionales	Clasificado como ligeramente inflamable. No reemplaza a otros refrigerantes de mayor PCG en todas sus aplicaciones.	(Longo et al., 2015)
	PCG	675-677	
	Efectividad de reducción	S.I.	

¹⁷ Obtenidos de AR4 según el documento consultado.

Medida	Consideraciones	Descripción	Fuente
	Categorías de establecimientos en que es aplicable	Podría reemplazar al R-410A y HCFC-22. Categorías E, F y G en equipos de mediano tamaño.	
	Vida útil	S.I.	
	Costos	Los costos incluyen la adquisición del nuevo refrigerante y el sistema.	
	Ahorros	Ahorros anuales provenientes de menor consumo energético.	
	Impactos sociales, ambientales, y económicos	Debido al bajo PCG del HFC-152a, genera una menor contribución al cambio climático en caso de fugas o liberación de este gas a la atmósfera.	
Recambio a HFO-1234yf	Aspectos operacionales	El HFC-1234yf trabaja a presión más baja que el R-410A y el HCFC-22, por lo tanto, los sistemas de aire acondicionado, que utilizan HCFC-22 o R-410A requerirían un rediseño significativo para utilizar este refrigerante. Los cambios de diseño incluirían compresores de mayor desplazamiento, intercambiadores de calor más grandes y circuitos de refrigerante modificados para que coincidan con el rendimiento. Por otro lado, este refrigerante puede considerarse un reemplazo casi inmediato para sistemas que utilicen HFC-134.	(Purohit et al., 2016, 2020; Purohit & Höglund-Isaksson, 2017; UNEP, 2009)
	PCG	4	
	Efectividad de reducción	En la climatización comercial el uso de HFO-1234yf alcanza una eficiencia de eliminación casi total de 99,8% debido a su casi nulo PCG.	
	Categorías de establecimientos en que es aplicable	Categorías A, B, E, F, G y H	
	Vida útil	10 años	
	Costos	Los costos incluyen la adquisición del nuevo refrigerante y el sistema.	
	Ahorros	No existen ahorros en el uso de este refrigerante.	
	Impactos sociales, ambientales, y económicos	Existe un impacto económico importante en el uso de este nuevo refrigerante debido a su alto precio, el HFO-1234yf puede llegar a costar 5 veces lo que cuestan refrigerantes como el HFC-32, R-410A O HFC-404 ^a	
Recambio a hidrocarburos	Aspectos operacionales	Requeriría del recambio de sistemas; preocupación de una correcta gestión debido a su inflamabilidad.	(Purohit et al., 2016, 2020; Purohit & Höglund-Isaksson, 2017; RCG, n.d.)
	PCG	< 5	
	Efectividad de reducción	En los sectores de climatización y refrigeración comercial la eficiencia de eliminación es 99,85% y en refrigeración industrial 99,88%.	

Medida	Consideraciones	Descripción	Fuente
	Categorías de establecimientos en que es aplicable	En reemplazo de HFC-134A HFC-404A HFC-410	
	Vida útil	10 años	
	Costos	Los costos incluyen la adquisición del nuevo refrigerante y el sistema.	
	Ahorros	Se generan ahorros significativos en términos de operación y mantenimiento en los sectores mencionados. Además, se registraron ahorros en la demanda de electricidad en la refrigeración industrial y comercial.	
	Impactos sociales, ambientales, y económicos	Reducción de emisiones en términos de CO ₂ eq si es que hubiese fuga; no se identifican otros impactos ambientales directos; provienen de la industria petroquímica. En cuanto a salud humana, el contacto con el líquido de isobutano puede causar quemaduras por frío o congelación y ser asfixiante a altas concentraciones.	
Recambio a amoníaco	Aspectos operacionales	La operación debería asegurar que nunca hubiese fuga debido a los riesgos en salud humana que presenta el amoníaco.	(Purohit & Höglund-Isaksson, 2017)
	PCG	0	
	Efectividad de reducción de tonCO ₂ eq	100%	
	Categorías de establecimientos en que es aplicable	Categoría A	
	Vida útil	10 años	
	Costos	Los costos incluyen la adquisición del nuevo refrigerante y el sistema.	
	Ahorros	La utilización de amonio como refrigerante genera un gran ahorro en los costos de operación anuales y se registran ahorros energéticos.	
	Impactos sociales, ambientales, y económicos	Intoxicación y riesgos en salud si es que hubiese fuga. En cuanto a impactos ambientales, el NH ₃ es precursor de otros contaminantes como el N ₂ O.	

Medida	Consideraciones	Descripción	Fuente
Recambio a CO₂ transcrito (o presurizado)	Aspectos operacionales	El uso de este refrigerante requiere operar a presiones mucho más altas que refrigerantes como el R404-A. Los sistemas de CO ₂ transcrito pueden alcanzar presiones de hasta 130 bar, debido a la necesidad de componentes especializados las instalaciones podrían llegar a ser un 20% más caras. Cabe destacar que el COP (Coeficiente de rendimiento) de los sistemas de CO ₂ puede ser hasta un 10% menor que el de los sistemas de HFC en climas cálidos, lo que genera un mayor consumo energético en esos contextos.	(Giroto et al., 2004; Purohit & Höglund-Isaksson, 2017)
	PCG	1	
	Efectividad de reducción	La eficiencia de eliminación en la refrigeración industrial y comercial alcanza el 99.95%.	
	Categorías de establecimientos en que es aplicable	Categoría A y H	
	Vida útil	10 años	
	Costos	Los costos incluyen la adquisición del nuevo refrigerante y el sistema.	
	Ahorros	Se presentan ahorros en la mantención.	
	Impactos sociales, ambientales, y económicos	Existe un impacto ambiental y económico ligado al uso de esta medida debido a que está ligada a un aumento considerable en la demanda de electricidad, se estima que el aumento es de 200 GWh en climatización comercial, 300 GWh en refrigeración comercial y 69 GWh en refrigeración industrial.	

Fuente: Elaboración propia

Además, en los estudios mencionados previamente, se encontraron los costos y eficiencias de captura asociados a las alternativas de reemplazo de HFC, los cuales a diferencia de las buenas prácticas fueron adaptados a las categorías propuestas en el presente informe estableciendo las relaciones de recambio entre los refrigerantes según las equivalencias identificadas previamente. En este análisis, se llevó a cabo una desagregación de la información de manera que, cuando el estudio original sugería el uso de un refrigerante alternativo de menor PCG para un sector específico, se consultaron los informes sectoriales para identificar los refrigerantes utilizados en las categorías equivalentes, esto con el objetivo de ampliar y detallar la base de datos. Por ejemplo, en el caso de la refrigeración comercial, el estudio proponía la sustitución por HFC-152a, por lo que las relaciones de recambio se ajustaron a las sustancias identificadas en el banco sectorial correspondiente a las categorías C, D y H. Estas sustancias incluyen HFC-134a, R-404A, R-507A, R-410A, R-407C y R-22. Este enfoque se aplicó de la misma forma en todos los sectores donde se plantearon medidas de reemplazo con alternativas de menor PCG. En la Tabla 5-13 se muestran los costos identificados para el recambio por tipo de refrigerante, por sector y cómo se realizó la asignación de a qué categoría aplica cada sector, para poder hacer uso de esta información en el análisis según las categorías definidas en el presente estudio.

Tabla 5-13 Sector y categoría a la que aplica el recambio de refrigerante

Descripción del sector	Categoría a la que aplica	Alternativa de refrigerante	Inversión [UF/ton]	Operación y mantención [UF/ton]
Aire acondicionado comercial, emisiones almacenadas en el equipo	E, F y G	Hidrocarburo	967	-53
Aire acondicionado comercial, emisiones almacenadas en el equipo	E, F y G	CO ₂ transcrítico	3.127	82
Aire acondicionado comercial, emisiones almacenadas en el equipo	E, F y G	HFC-152a	3.834	-20
Aire acondicionado comercial, emisiones almacenadas en el equipo	E, F y G	HFO-1234yf	4.691	62
Aire acondicionado comercial, emisiones De equipos desguazados	E, F y G	Hidrocarburo	-	-
Aire acondicionado comercial, emisiones De equipos desguazados	E, F y G	CO ₂ transcrítico	-	-
Aire acondicionado comercial, emisiones De equipos desguazados	E, F y G	HFC-152a	-	462
Aire acondicionado comercial, emisiones De equipos desguazados	E, F y G	HFO-1234yf	-	462
Refrigeración comercial, emisiones Depositado en el equipo	C, D y H	Hidrocarburo	25.329	-25
Refrigeración comercial, emisiones Depositado en el equipo	C, D y H	HFC-152a	3.795	-354
Refrigeración comercial, emisiones Depositado en el equipo	C, D y H	CO ₂ transcrítico	6.404	-207
Refrigeración comercial, emisiones de equipos desguazados ¹⁸	C, D y H	Hidrocarburo	-	-
Refrigeración comercial, emisiones de equipos desguazados	C, D y H	HFC-152a	3.795	-354
Refrigeración comercial, emisiones de equipos desguazados	C, D y H	CO ₂ transcrítico	-	-
Refrigeración industrial (sector comida y agricultura), emisiones de banco en equipo	A y B	Hidrocarburo	25.329	-25
Refrigeración industrial (sector comida y agricultura), emisiones de banco en equipo	A y B	HFC-152a	3.795	-354
Refrigeración industrial (sector comida y agricultura), emisiones de banco en equipo	A y B	NH ₃	12.979	-1.332
Refrigeración industrial (sector comida y agricultura), emisiones de banco en equipo	A y B	CO ₂ transcrítico	-	-163
Refrigeración industrial (sector comida y agricultura), emisiones de equipo desgastado	A y B	Hidrocarburo	-	-
Refrigeración industrial (sector comida y agricultura), emisiones de equipo desgastado	A y B	HFC-152a	3.795	-354
Refrigeración industrial (sector comida y agricultura), emisiones de equipo desgastado	A y B	NH ₃	12.979	-

¹⁸ Costos negativos en Error! Reference source not found. representan ahorro.

Descripción del sector	Categoría a la que aplica	Alternativa de refrigerante	Inversión [UF/ton]	Operación y mantención [UF/ton]
Refrigeración industrial (sector comida y agricultura), emisiones de equipo desgastado	A y B	CO ₂ transcrito	-	-

Fuente: Elaboración propia

En el estudio de Purohit & Höglund-Isaksson (2017) también se encontraron los costos y eficiencias de captura asociados a las alternativas de reemplazo de HFC, los cuales, a diferencia de las buenas prácticas, fueron adaptados a las categorías propuestas en el presente informe estableciendo las relaciones de recambio entre los refrigerantes según las equivalencias

La eficiencia de captura de las opciones de recambio se calculó en base a los PCG reportados en el AR5 del IPCC considerando un horizonte temporal de 100 años. Estos valores proporcionan una métrica estandarizada para evaluar el impacto climático relativo de cada refrigerante.

La metodología consistió en utilizar la Ecuación 5-4:

Ecuación 5-4 Ecuación Cálculo del porcentaje de reducción del PCG

$$Reducción (\%) = \left(\frac{PCG \text{ original} - PCG \text{ nuevo}}{PCG \text{ original}} \right) \times 100$$

El PCG original corresponde al refrigerante actualmente en uso, y el PCG nuevo al refrigerante propuesto como reemplazo. Este enfoque permitió cuantificar, en términos porcentuales la reducción de emisiones equivalentes de CO₂ asociada a cada medida de recambio. Si bien la ecuación planteada se encuentra acompañada del supuesto de que 1 kg de refrigerante original es reemplazado por 1 kg del refrigerante alternativo, este corresponde al peor de los casos y busca proporcionar una referencia conservadora. En la práctica, debido a las diferencias en las propiedades termodinámicas de los refrigerantes, como el calor latente de vaporización y la densidad, la cantidad de refrigerante alternativo requerida suele ser menor. Por ejemplo, el R-152a, al tener un calor latente de vaporización un 57% mayor que el del R-134a, permite reducir el flujo másico necesario para lograr el mismo enfriamiento. Además, su menor densidad líquida y mayor eficiencia energética (un 13% superior, medida según el coeficiente de rendimiento, COP *coefficient of performance*) refuerzan que, en condiciones reales, se requiere menos cantidad de refrigerante alternativo para cumplir con el mismo rendimiento, minimizando el impacto ambiental y reduciendo las emisiones de CO₂. De este modo, la relación 1:1 representa una aproximación conservadora y no refleja completamente la optimización que puede lograrse al implementar el recambio en condiciones reales.

Los valores de PCG utilizados en este análisis fueron extraídos del AR5 del IPCC, asegurando el uso de información actualizada y de referencia científica. Estos datos se aplicaron de manera sistemática a todas las medidas de recambio propuestas para cada categoría de uso, permitiendo cuantificar la reducción en el impacto climático. Por ejemplo, la sustitución del R-410A (PCG

1,924) por el R-152a (PCG 138) resultó en una reducción del 92.83% en emisiones equivalentes de CO₂.

En la Tabla 5-14 se presentan los PCG de los refrigerantes considerados en el análisis, los cuales sustentan las medidas de recambio evaluadas:

Tabla 5-14 PCG de los refrigerantes considerados en el análisis

Refrigerante	PCG (tCO ₂ e/ton)
CO ₂ (R-744)	1
HFO-1234yf	1
NH ₃ (R-717)	0
HFC-134a	1.300
HFC-152a	138
Etano (R-170)	5
R-22	1.760
Propano (R-290)	3
HFC-32	677
R-407C	1.624
R-404A	3.943
R-410A	1.924
R-438A	2.265
R-507A	3.985
Isobutano (R-600a)	3
Hidrocarburos (promedio)	3,67

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del AR5 del IPCC

Para los cálculos de eficiencia de captura relacionados con el reemplazo de un refrigerante original por hidrocarburos, se utilizó un PCG promedio de 3,67, calculado a partir de los hidrocarburos más comunes en aplicaciones de refrigeración y climatización: R-170, R-290 y R-600A. Por otro lado, el PCG del R-717 (amoníaco) se consideró nulo, lo que implica que cualquier reemplazo por este refrigerante resulta en una eficiencia de captura del 100%, eliminando por completo las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al refrigerante original. Los resultados de la eficiencia de captura que se obtiene al recambiar todos los refrigerantes originales por refrigerantes alternativos con menor PCG se pueden observar en la Tabla 5-15.

Tabla 5-15 Eficiencia de captura de refrigerantes alternativos

Alternativa	Refrigerante original	Eficiencia de captura
HFC-152a	R-410A	92.83%
	R-407C	91.50%
	R-22	92.16%
	HFC-134A	89.38%
	R-404A	96.50%
	R-438A	93.91%
	R-507A	96.54%
HFC-32	R-410A	64.84%
	R-22	61.53%
HFO-1234yf	HFC-134A	99.92%
	R-22	99.94%
	R-407C	99.94%
	R-410A	99.95%
CO₂ transcrito	Todos	99.95% ¹
Hidrocarburos	HFC-134A	99.72%
	R-404A	99.91%
	R-410A	99.81%
	R-407C	99.77%
	R-22	99.79%
	R-507A	99.91%
R-717	Todos	100.00%

¹ Corresponde al promedio de la eficiencia de captura al reemplazar todos los refrigerantes originales por CO₂ transcrito. El rango de los datos es 99.92% a 99.97%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del AR5 del IPCC y Shindell et al. (2013).

En cuanto a los costos asociados al recambio de sustancias, estos se calcularon utilizando la misma metodología descrita previamente para los costos de buenas prácticas, así como las relaciones establecidas entre los sectores reportados por Purohit & Höglund-Isaksson (2017) y las categorías definidas en el presente informe. Se identifican dos tipos de costos: por un lado, el costo de inversión, que comprende los gastos necesarios para realizar el recambio de 1 tonelada de refrigerante original, incluyendo el costo del refrigerante y del equipo de refrigeración o climatización. Por otro lado, están los costos de operación y mantenimiento (O&M), que abarcan los gastos adicionales asociados al mantenimiento de los equipos. Estos no incluyen el consumo de energía, pero sí actividades como el **mantenimiento regular, el reemplazo de piezas, inspecciones y otras acciones necesarias para garantizar el funcionamiento eficiente de los sistemas**. La sistematización de estos datos se presenta en la Tabla 5-16.

Tabla 5-16 Costos por medida recambio de refrigerante e impacto en demanda energética

Alternativa	Refrigerante original	Categoría al que aplica	Costos OM (UF/ton/año)	Costos de Inversión (UF/ton)	Demanda energética (GWh/kton) (*)
HFC-152A	R-410A	A	-354	3.795	S.I.
		B	-354	3.795	S.I.
		E	-20	3.834	S.I.

Alternativa	Refrigerante original	Categoría al que aplica	Costos OM (UF/ton/año)	Costos de Inversión (UF/ton)	Demanda energética (GWh/kton) (*)
		F	-20	3.834	S.I.
		G	-20	3.795	S.I.
		H	-354	3.795	S.I.
	R-407C	A	-354	3.795	S.I.
		E	-20	3.834	S.I.
		F	-20	3.834	S.I.
		H	-354	3.795	S.I.
	R-22	A	-354	3.795	S.I.
		B	-354	3.795	S.I.
		C	-354	3.795	S.I.
		D	-354	3.795	S.I.
		E	-20	3.834	S.I.
		F	-20	3.834	S.I.
		H	-354	3.795	S.I.
	HFC-134a	A	-354	3.795	S.I.
		B	-354	3.795	S.I.
		C	-354	3.795	S.I.
		D	-354	3.795	S.I.
		E	-20	3.834	S.I.
		F	-20	3.834	S.I.
		G	-20	3.834	S.I.
		H	-354	3.795	S.I.
	R-404A	A	-354	3.795	S.I.
		B	-354	3.795	S.I.
		D	-354	3.795	S.I.
		H	-354	3.795	S.I.
	R-438A	A	-354	3.795	S.I.
	R-507A	A	-354	3.795	S.I.
		B	-354	3.795	S.I.
		C	-354	3.795	S.I.
		D	-354	3.795	S.I.
		H	-354	3.795	S.I.
HFC-32	R-410A	E	S.I.	S.I.	S.I.
		F	S.I.	S.I.	S.I.
		G	S.I.	S.I.	S.I.
	R-22	E	S.I.	S.I.	S.I.
		F	S.I.	S.I.	S.I.
HFO-1234YF	HFC-134a	E	62	4.691	S.I.
		F	62	4.691	S.I.
	R-22	E	62	4.691	S.I.
		F	62	4.691	S.I.
	R-407C	E	62	4.691	S.I.
		F	62	4.691	S.I.
	R-410A	E	62	4.691	S.I.
		F	62	4.691	S.I.
		G	62	4.691	S.I.
CO ₂ transcrito	Todos	A	-163	3.705	69
		B	-163	3.705	69
		C	-207	6.404	300
		D	-207	6.404	300
		E	82	3.834	200
		F	82	3.834	200

Alternativa	Refrigerante original	Categoría al que aplica	Costos OM (UF/ton/año)	Costos de Inversión (UF/ton)	Demanda energética (GWh/kton) (*)
		G	82	3.834	200
		H	-207	6.404	300
Hidrocarburos	HFC-134a	A	-25	25.329	0
		B	-25	25.329	-0,00025
		C	-25	25.329	-0,00025
		D	-25	25.329	-0,00025
		E	-53	967	S.I.
		F	-53	967	S.I.
		G	-53	967	S.I.
		H	-25	25.329	-0,00025
	R-404A	A	-25	25.329	S.I.
		B	-25	25.329	S.I.
		D	-25	25.329	-25
		H	-25	25.329	-25
	R-410A	A	-25	25.329	-25
		B	-25	25.329	-25
		E	-53	967	S.I.
		F	-53	967	S.I.
		G	-53	967	S.I.
		H	-25	25.329	-25
	R-407C	A	-25	25.329	0
		E	-53	967	S.I.
		F	-53	967	S.I.
		H	-25	25.329	0
	R-22	A	-25	25.329	0
		B	-25	25.329	0
		C	-25	25.329	0
		D	-25	25.329	0
		E	-53	967	S.I.
		F	-53	967	S.I.
		H	-25	25.329	0
	R-507A	A	-25	25.329	0
		B	-25	25.329	0
		C	-25	25.329	0
		D	-25	25.329	0
		H	-25	25.329	0
R-717	Todos	A	-1.332	12.979	-337,5
		B	-1.332	12.979	-337,5

S.I.: Sin Información

(*) Costos negativos representan ahorro en la operación y mantención. Mientras que valores negativos en la demanda energética representan que la medida genera una reducción en el consumo energético, la cual es adicional a las reducciones contabilizadas en el costo de operación y mantención.

Fuente: Elaboración propia en base a Purohit Pallav & Höglund - Isaksson Lena (2017)

5.3 Mecanismos de monitoreo, reporte, verificación y fiscalización

La fiscalización es un aspecto clave para asegurar que una norma se cumpla de manera efectiva, ya que permite verificar que las acciones previstas se implementen correctamente y tengan continuidad en el tiempo. Para ello, en el caso de una norma de sustancias HFC, es crucial que los mecanismos de control incluyan tanto medidas preventivas, como inspecciones y monitoreos

regulares, que identifiquen posibles incumplimientos antes de que generen daños, así como acciones necesarias para corregir infracciones cuando ya han ocurrido.

Es por lo anterior y en base a lo revisado en normativas internacionales, a lo consultado en las diversas entrevistas y a la experiencia del equipo consultor, es que se proponen una serie de mecanismos de monitoreo, reporte, verificación, fiscalización y prevención de emisiones, los que abarcan tanto acciones preventivas como correctivas.

1. **Certificación a personas técnicas:** actualmente el centro de Evaluación y Certificación de Competencias Laborales FríoCalor de la CChRyC, corresponde al único centro acreditado por Chile Valora que ofrece diversas certificaciones para los técnicos en mantención de sistemas en frío. A pesar de lo anterior, son muy pocas las personas que se encuentran certificadas, de hecho, en el informe realizado por Ministerio del Medio Ambiente (2023) para la preparación sobre la Primera Etapa del Plan de Implementación de Kigali (KIP-I), se menciona que a nivel nacional existen alrededor de 8.000 personas técnicas en refrigeración, de las que 2.000 han sido capacitadas en buenas prácticas de refrigeración y de las cuales 1.122 han sido certificadas al 23 de septiembre del 2024 donde 26 son mujeres y 1.096 son hombres. La Tabla 11-75 de los anexos muestra un resumen de los datos actualizados de la CChRyC.

En las normas internacionales revisadas en la Sección 5.1, de dicho informe se hace referencia a una persona acreditada como aquella que posee un certificado que le permite realizar labores de instalación, mantenimiento y recuperación de refrigerantes en sistemas de frío.

En este caso, se propone que las personas técnicas certificadas tengan la función de acreditar el correcto funcionamiento de los sistemas de frío dentro de un establecimiento, y que esto tenga como resultado la entrega de un documento que se genere periódicamente y que entregue insumos para las actividades de fiscalización de la SMA. A su vez, estas personas técnicas deberán formar parte de algún registro que permita verificar que cuentan con las competencias y herramientas necesarias y que están autorizadas para la elaboración de dichos documentos.

Adicionalmente, en base a la revisión de antecedentes y entrevistas, se ha detectado la entrevista de empresas que ofrecen servicios de instalación, mantención y reparación de sistemas de frío. Se propone que estas empresas también sean parte del registro de entes certificados para acreditar el correcto funcionamiento y hacer mantenciones, instalaciones y reparaciones en conformidad de la norma.

Por último, el sistema de certificaciones debería considerar la necesidad de actualizar el registro cada cierto tiempo, en función de cómo el conocimiento avance, de forma que incentive a las personas técnicas a renovar sus certificados.

2. **Sistemas de detección de fugas:** resulta recomendable que todos los sistemas de frío, principalmente Tipo II y III, cuenten un sistema de detección de fugas que permitan alertar al usuario de una fuga y así permita actuar a tiempo. Estos sistemas se mencionan explícitamente en la normativa europea, la que obliga su uso a los establecimientos más grandes, sobre 500 ton CO₂ eq permitiendo su monitoreo y reporte constante, y su vez a los establecimientos más pequeños entrega diversos incentivos reduciendo la frecuencia de monitoreos. En complemento, en la normativa canadiense, se indican períodos de detección de fugas de 24 horas, lo que indica que se consideran métodos de detección de fuga.

Estos sistemas cobran relevancia al considerar que, según las entrevistas realizadas en la primera etapa del estudio, cuando las personas técnicas llegan a reparar, puede que ya no quede refrigerante que recuperar¹⁹ (5, 8) o que no siempre es posible encontrar la fuga²⁰.

3. **Controles de fugas:** de forma complementaria al punto anterior, se propone realizar controles de fuga con visitas in situ, con especial énfasis en los equipos Tipo II y III, cada cierto periodo establecido, podría ayudar a disminuir las emisiones y fortalecer el compromiso por parte de los usuarios de estos sistemas.

Se propone que cada establecimiento al que aplica un límite de emisión cuente con un dispositivo de detección de fugas, cuyo funcionamiento y calibración sea verificado por una persona técnica independiente o perteneciente a una empresa. Durante esta visita también se deberá verificar la adecuada presión de los sistemas de frío y como resultado, si es que todo funcionara bien, se emitiría un certificado que asegure el buen funcionamiento del sistema y el cumplimiento de las exigencias. La frecuencia de esta certificación debería realizarse de forma semestral. En base a la normativa estadounidense se propone que, si se llegasen a encontrar fugas en estas revisiones, el propietario esté obligado a reparar la fuga y las próximas revisiones ocurran de manera trimestral para asegurar el cumplimiento y correcto funcionamiento del sistema, por lo menos por un año. Si es que se siguen encontrando fugas en las siguientes revisiones, se propone que el propietario tenga dos opciones: 1) dar de baja el sistema, recuperando el refrigerante o; 2) idear un plan de reparación, con un plazo de 30 días para la creación de este y 12 meses para la implementación desde la aprobación por la entidad correspondiente.

Cabe mencionar que actualmente no existen sistemas de detección continua, sino que solo equipos portátiles que toman mediciones discretas y según sean operados por una persona.

¹⁹ Ver entrevistas ID 5 y 8 – Anexos Digitales

²⁰ Ver entrevista Id 29 – Anexos Digitales

4. **Reporte anual de sistemas de frío y actividades asociadas:** el reporte anual sobre las actividades de sistemas de frío deberá incluir marca, modelo, cantidad y tipo de refrigerante, entre otras características del sistema. Este registro compete exclusivamente al usuario del sistema, en donde se deberá registrar además cualquier actividad realizada al sistema, tales como instalación, mantenimiento por falla o fuga, recarga de refrigerante, recuperación del refrigerante, cambio de dueño o desmantelamiento, empresa o persona técnica que realiza el mantenimiento o recuperación, entre otros.

Adicionalmente, cada vez que ocurra una fuga, se deberá informar a la SMA, en un plazo de 24 horas desde que se detecta la fuga, indicando motivo de fuga, cantidad y tipo de refrigerante. Este mecanismo se basa en lo revisado en la regulación canadiense, según el cual es obligatorio elaborar un informe detallado si ha ocurrido la liberación de un gas regulado. Entre los aspectos importantes se debiese establecer a partir del tipo de equipo (I, II o III) que se produjo la liberación, el gas refrigerante y los kilogramos liberados, el técnico o la empresa certificada que realizó la recuperación o la inyección de nuevo refrigerante, fecha y lugar de la liberación, causas de que se haya liberado el refrigerante a la atmósfera, y las acciones tanto preventivas como correctivas para poder asegurar dentro de lo posible, que no vuelva a ocurrir en un periodo cercano.

5. **Controles basados en enfoque de riesgo:** este mecanismo se basa en lo revisado en el Reglamento de la UE, que menciona controles basados en enfoque de riesgo, es decir, basados en el historial de los establecimientos y el riesgo de incumplimiento. También se fiscaliza si es que existe evidencia que sugiera incumplimiento de la normativa. En estos controles, es necesario, que los usuarios posean un detalle del registro de actividades para poder focalizar los esfuerzos en aquellos equipos que han tenido un mayor historial de fallas y/o fugas.

Si bien la función de fiscalizar, según lo establecido en la Ley N° 21.455/2022, corresponde a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), los mecanismos antes indicados servirían como apoyo a la labor fiscalizadora de este organismo. Por ejemplo, en lugar de que la SMA deba fiscalizar el funcionamiento correcto de los sistemas de frío, las personas técnicas capacitadas tendrán esa función y, por ende, la SMA deberá fiscalizar que los establecimientos usuarios cuenten con la documentación generada por estas personas.

De forma similar, los sistemas de detección de fugas tendrán como objetivo alertar al usuario de la pérdida de refrigerante en sus sistemas para que este pueda contactar a tiempo a las personas técnicas capacitadas para dar solución al problema. Esto, en conjunto con los informes en donde se reporten fugas, permitiría a la SMA diseñar un plan de visitas basadas en el riesgo de incumplimiento. Si bien estos informes serían autoreportados, en cada uno se deberá indicar a la persona técnica que atendió la fuga, por lo que la información sería verificable por una persona externa.

Por lo tanto, la SMA podría hacer dos tipos de fiscalización: 1) en base a los informes anuales emitidos por los distintos establecimientos, en consideración de los elementos relevantes y en base a las emisiones reportadas; 2) verificación en terreno en base a los reportes emitidos por las personas técnicas, basado en un enfoque de riesgo (ver Figura 5-2).

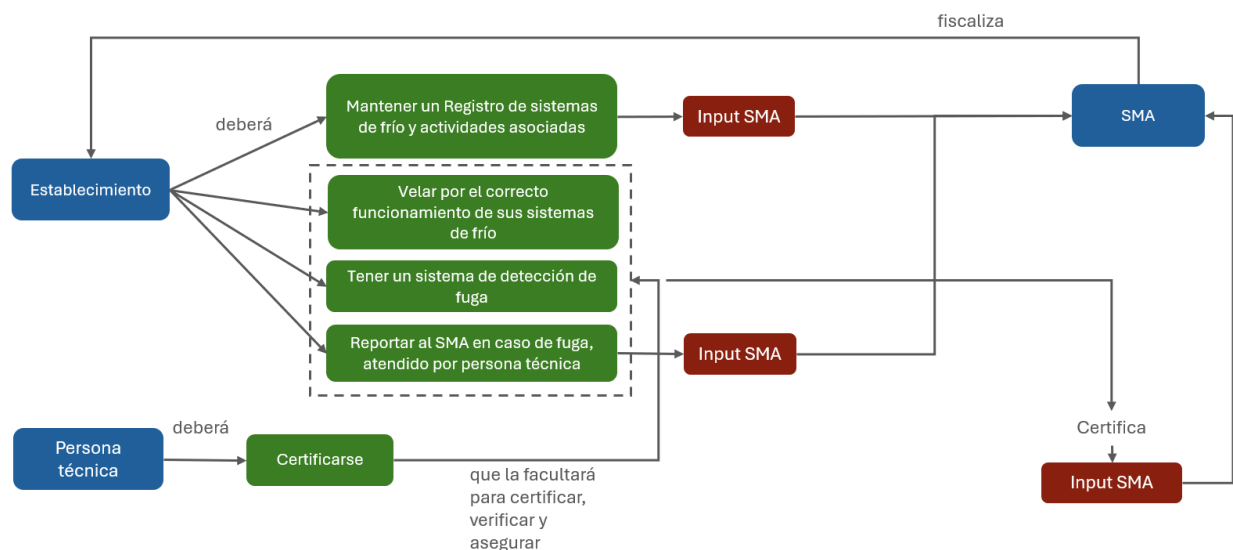


Figura 5-2 Diagrama conceptual interacción entre establecimientos, personas técnicas y SMA

Fuente: Elaboración propia

6. Propuesta de tres escenarios de norma de emisión de HFC para grandes usuarios de sistemas de frío

En las secciones a continuación se listan los instrumentos de gestión ambiental que pudiesen estar asociados al control de sustancias HFC en sistemas de frío (Sección 6.1) y luego se proponen escenarios de norma en función de lo revisado en las secciones anteriores (Sección 6.2).

6.1 Instrumentos de gestión ambiental relacionados al control de HFC en sistemas de refrigeración

Los instrumentos de gestión, los cuales están directamente vinculados a la ECLP, podrían estar relacionados al control de HFC y que por ende podrían presentar sinergias con la norma podrían ser: algunos cuerpos legales existentes, planes sectoriales de mitigación (PSM)²¹, acuerdos de producción limpia (APL) y planes de acción específicos. De estos, se revisaron los siguientes instrumentos:

1. Cuerpos legales existentes
 - a. Ley N° 20.096 que establece mecanismos de control aplicables a las sustancias agotadoras de la capa de ozono y otros cuerpos legales derivados
 - i. D.S. 3/2019 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (actualmente en proceso de modificación)
 - ii. Numeral 2 del Apéndice X del Capítulo III del Compendio de Normas Aduaneras
 - b. Ley 21.305 sobre eficiencia energética
2. Planes sectoriales de mitigación
 - a. Anteproyecto Plan Sectorial de Mitigación del Ministerio de Salud (Ministerio de Salud - Ministerio del Medio Ambiente, 2024)
 - b. Anteproyecto Plan Sectorial de Mitigación al Cambio Climático Sector Agricultura (Ministerio de Agricultura, 2024)
 - c. Anteproyecto Plan Sectorial de Cambio Climático del Sector Minería (Ministerio de Minería, n.d.)
 - d. Anteproyecto Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2024)
 - e. Plan de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero para el Sector Energía (Ministerio de Energía, 2017)
3. Acuerdos de producción limpia
 - a. Acuerdo de Producción Limpia Gestión Sustentable de Refrigerantes – Cero Fuga (Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático, Cámara Chilena de Refrigeración y Climatización A.G., et al., 2024)

²¹ PSM: Conjunto de acciones y medidas específicas para reducir gases de efecto invernadero (GEI), cumpliendo el presupuesto presentado en la ECLP.

- b. Segundo Acuerdo de Producción Limpia Sector Industria Láctea Procesadora Sustentable, Programa Chile Origen Consciente (Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático, Consorcio Lechero, et al., 2024)
 - c. Quinto Acuerdo de Producción Limpia Sector Industria de Alimentos Procesados Sustentable (Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático & ChileAlimentos, 2024)
 - d. Cuarto Acuerdo de Producción Limpia Sector Industria de Alimentos Procesos Sustentable (Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático, 2020)
 - e. Tercer Acuerdo de Producción Limpia Sector Industria de Alimentos Procesados (Consejo Nacional de Producción Limpia, 2016)
4. Planes de acción específicos
- a. Propuesta Plan Nacional de Frío (PROPUESTA DE PLAN NACIONAL DE FRÍO DE CHILE, 2020)
 - b. Plan de Implementación de Kigali, Etapa I (2024)
 - c. Plan de Gestión para la Eliminación de HCFC, Fase III (2022)
 - d. Proyecto promocional de la eficiencia energética en vitrinas refrigeradas y cámaras de frío (2022)

6.1.1 Cuerpos legales existentes

En primer lugar, se analizó la Ley N° 20.096, que establece mecanismos de control aplicables a las sustancias agotadoras de la capa de ozono, tiene por finalidad la adecuada implementación del Protocolo de Montreal, que inicialmente solo se ocupaba de las sustancias que agotan la capa de ozono, pero que luego, en enmiendas sucesivas comenzó a ocuparse también de las sustancias HFC. En específico, la Enmienda de Kigali fue promulgada en Chile mediante el decreto 32/2018 del Ministerio de Relaciones Exteriores.

A raíz de lo anterior, el Decreto 3/2019 del MINSEGPRES, reglamento que establece normas aplicables a las importaciones y exportaciones de las sustancias controladas por el Protocolo de Montreal y sus enmiendas, los volúmenes máximos de importación y los criterios para su distribución, incorpora acciones concretas para regular distintas sustancias, incluidos los HFC. Con respecto a este Decreto, cabe mencionar algunos puntos importantes con respecto a las sustancias HFC:

- obligación del Servicio Nacional de Aduanas de ejercer sus facultades fiscalizadoras para controlar el ingreso y salida de las sustancias controladas
- prohibición de producir todas las sustancias controladas
- se establecen volúmenes máximos de importación, aunque estos no incluyen sustancias HFC
- se indica que el Director Nacional de Aduanas deberá establecer un mecanismo para la distribución de los volúmenes máximos totales de importación, para cada grupo de sustancias controladas en volúmenes máximos de importación

- se indica que los fabricantes, importadores y exportadores de productos controlados deberán informar anualmente al MMA, a través del Registro de emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), las características del producto controlado, es decir, marca y modelo, cantidad, sustancia que contiene, entre otros.

Cabe notar que, de acuerdo con el Decreto antes mencionado, al Servicio Nacional de Aduanas le corresponde un rol clave al controlar el ingreso de diversas sustancias al país. Esto se hace efectivo en el Numeral 2 del Apéndice X del Capítulo III del Compendio de Normas Aduaneras, en donde se indica que:

- se crea el Registro de Importadores y Exportadores de Sustancias Controladas, que es administrado por el Servicio y que permite a importadores y exportadores inscritos ingresar o exportar estas sustancias al país;
- se establecen las condiciones para solicitar la inscripción al Registro;
- se establece cómo se distribuirán los volúmenes máximos que se determinen, entre importadores históricos y nuevos, y que la proporción que corresponda a los importadores históricos será igual a la suma de las importaciones históricas de cada uno dividida en la suma de todas las importaciones históricas, mientras que, en el caso de los nuevos, se dividirá el total del volumen correspondiente a estos, en el número de solicitantes.

Luego, D.S. 3/2019 del MINSEGPRES que actualmente se encuentra en proceso de modificación, indica además que los fabricantes, importadores y exportadores de productos controlados, que se refiere a todo equipo que contenga sustancias controladas, deberán informar al MMA a través del Sistema de Registro de Ozono, dentro de la ventanilla única del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, sobre la marca, modelo y cantidad de productos controlados comercializados, así como también la sustancia controlada que contiene, parte o aplicación que la contiene, cantidad, concentración y/o pureza de esta.

Además, establece un volumen máximo de importaciones para las sustancias controladas y cuenta con un calendario de importaciones específico para aquellas contenidas en el Anexo F, Grupos I y II, es decir, sustancias HFC (ver Tabla 6-1). Cabe notar que los porcentajes de reducción se alinean con el calendario determinado en la Enmienda de Kigali para Chile.

Tabla 6-1 Calendario de reducción de volúmenes máximos de importación de sustancias HFC

Período	Volumen máximo de importación (ton CO _{2eq})	Porcentaje de la línea base (%)
Línea base de consumo	6.698.107	-
2024-2028	6.698.107	100%
2029-2034	6.028.296	90%
2035-2039	4.688.675	70%
2040-2044	3.349.054	50%
Desde 2045	1.339.621	20%

Fuente: Elaboración propia en base a artículo 5° de la modificación al DS3/2019.

En segundo lugar, se revisó la Ley N° 21.305 sobre eficiencia energética, que establece la obligación para ciertas empresas de reportar el consumo de energía al Ministerio de Energía. Estas empresas son catalogadas como “Consumidores con Capacidad de Gestión de Energía” (CCGE), y se catalogan como tal si es que su consumo de energía final supera las 50 tera-calorías anuales en el año calendario anterior informado. Los CCGE deberán contar “Sistemas de Gestión de Energía” (SGE), que deberá contar con política energética interna, objetivos, metas entre otros, a través del cual podrán acceder a una calificación energética.

Cabe mencionar que los CCGE son empresas de alto consumo energético que, en muchas ocasiones coinciden con establecimientos que son grandes usuarios de sustancias HFC, como, por ejemplo, empresas agroalimentarias, mineras, pesqueras y acuícolas, tal y como se puede apreciar en el listado de los CCGE en la RE 29/2024 de Ministerio de Energía. Al respecto, cabe mencionar que una de las medidas de control de emisión de sustancias HFC es implementar buenas prácticas operacionales, que tienen como consecuencia mejor desempeño de los equipos en términos de eficiencia energética, por lo que este tipo de medidas podrían ser incluidas dentro de las políticas energéticas internas de las empresas.

6.1.2 Planes sectoriales de mitigación

Los planes sectoriales de mitigación surgen como un instrumento de gestión del cambio climático, instaurados en el artículo 8° de la Ley Marco de Cambio Climático, que indica que se *“establecerán el conjunto de acciones y medidas para reducir o absorber gases de efecto invernadero, de manera de no sobrepasar el presupuesto sectorial de emisiones asignado a cada autoridad sectorial en la Estrategia Climática de Largo Plazo”* (Ministerio de Salud - Ministerio del Medio Ambiente, 2024).

6.1.2.1 Anteproyecto del Plan Sectorial de Mitigación del Ministerio de Salud

En el Plan Sectorial de Mitigación de Salud se establecen cinco medidas de mitigación, para hacerse responsable del presupuesto de emisiones de gases de efecto invernadero. Las medidas son: valorización de residuos orgánicos (compostaje domiciliario, compostaje en establecimientos educacionales, compostaje a gran escala), captura y valorización/quema de biogás en rellenos sanitarios existentes y nuevos, reciclaje de papel y cartón, reducción del desperdicio de alimentos, huella de carbono y programa de eficiencia energética en hospitales. Es decir, las medidas contempladas en este PSM presentan sinergias con una posible norma de emisiones de HFC, en cuanto contempla programas de eficiencia energética y de reducción de huella de carbono.

6.1.2.2 Anteproyecto del Plan Sectorial de Mitigación al Cambio Climático Sector Agricultura

El siguiente plan, tiene el objetivo de cumplir con el presupuesto de emisiones total del país al 2030. El Ministerio de Agricultura presenta objetivos en los siguientes sectores:

1. Sector agricultura
2. Sector energía:
 - 1.1. Procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco
 - 1.2. Agricultura/silvicultura/pesca/piscifactorías
 - 1.3. Porcentaje de emisiones asociado a consumo de electricidad

Si bien en este PSM no hay antecedentes relevantes en relación con sistemas de frío, es importante mencionar que, dada la magnitud del banco del sector hortofrutícola, el cumplimiento de la norma podría contribuir al cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones presentados para el sector agrícola.

6.1.2.3 Anteproyecto del Plan Sectorial de Cambio Climático del Sector Minería

El siguiente plan consta de elaborar un Plan de Mitigación y un Plan de Adaptación al Cambio Climático para el año 2024. Estos tienen el objetivo de cumplir con el presupuesto sectorial de emisiones y avance hacia la resiliencia del sector. En cuanto a las medidas de mitigación, se abordan temas tales como hidrógeno verde, electrificación, eficiencia energética, PPA, proveedores, pequeña minería.

El Plan se encuentra actualmente en proceso, sin embargo, al considerar medidas de eficiencia energética, presentaría sinergias con una posible norma de emisión de sustancias HFC, por los mismos motivos explicados previamente.

6.1.2.4 Plan de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero para el Sector Energía, 2017

El Plan de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero para el Sector Energía de Chile tiene como objetivo principal reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector energético. El plan busca avanzar hacia una matriz energética más baja en carbono y fomentar la eficiencia energética, el uso de energías renovables y la electrificación de sectores como el transporte y la calefacción.

Entre sus objetivos están:

- Reducir un 30% las emisiones de CO₂ eq por unidad de PIB para el año 2030 en comparación con 2007.
- Posible aumento de la reducción a un 45% si se cuenta con financiamiento internacional
- Se enfoca en varios subsectores: generación eléctrica, transporte, industria, minería, y sectores comerciales, públicos y residenciales

El plan promueve la mejora de la eficiencia energética en diversos sectores, destacando regulaciones y estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS) para equipos eléctricos tanto domésticos como industriales. Estas medidas buscan reducir el consumo de energía y mejorar el desempeño energético de aparatos como aire acondicionado, refrigeradores, calefactores eléctricos, por lo que presenta una relación importante con la posible norma de emisiones de HFC.

6.1.2.5 Anteproyecto Plan Sectorial de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático del Sector Energía

El Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático del Sector Energía (PSMyA Energía) es un plan vinculante que establece el conjunto de acciones y medidas para lograr adaptar al cambio climático y aumentar la resiliencia climático del sector, a la vez que se reducen o absorben GEI. Cabe mencionar que el sector energía está compuesto por dos subsectores: eléctrico y combustibles, en donde el primero sería relevante de considerar para efectos de este estudio.

El PSMyA Energía se basa en cuatro pilares: reconversión productiva, infraestructura resiliente y habilitante, combustibles de transición y financiamiento para la descarbonización. La reconversión productiva, referida a la transición energética como uno de los pilares hacia un desarrollo sostenible con énfasis en la promoción de industria no contaminante, se alinearía con la búsqueda de refrigerantes con menor o nulo PCG.

Cabe mencionar que, en este caso, al igual que en el anterior, las emisiones de este sector se asocian al Ministerio de Energía y no contiene medidas al respecto de las sustancias HFC.

6.1.3 Acuerdos de producción limpia

Los Acuerdos de Producción Limpia (APL) son convenios voluntarios de colaboración entre el sector empresarial y organismos del Estado (carácter público-privado), con el objetivo de promover el desarrollo sostenible de las empresas mediante la definición de metas y acciones concretas que van más allá de las obligaciones legales vigentes.

Estas metas están orientadas a hacer los procesos empresariales más sostenibles, implementando medidas como la eficiencia energética, el uso responsable del agua y la valorización de residuos, entre otras prácticas ambiental.

6.1.3.1 Acuerdo de Producción Limpia Gestión Sustentable de Refrigerantes – Cero Fuga

El APL Cero Fuga tiene por objetivo implementar una gestión sustentable de refrigerantes, a través de un programa integral para eliminar el uso de HCFC y reducir los HFC, mejorando la eficiencia energética y disminuyendo la generación de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la mitigación establecida en la Contribución Nacionalmente Determinada, al Plan de Gestión para la Eliminación de HCFC y al Programa Cero Fuga de Refrigerantes.

Las medidas para cumplir los objetivos planteados son las siguientes:

- Formación de personal: impartir cursos y talleres sobre buenas prácticas en refrigeración, gestión de energía y sostenibilidad.

- Difusión del acuerdo: informar a los colaboradores sobre los beneficios y compromisos del acuerdo.
- Procedimientos de mantenimiento: se desarrollarán guías para realizar un mantenimiento eficiente y seguro de los equipos de refrigeración.
- Tecnologías limpias: se promoverá el uso de tecnologías más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.
- Planes de gestión: cada empresa elaborará un plan detallado para reducir el uso de refrigerantes y mejorar su eficiencia energética.
- Seguimiento y evaluación: se realizará un seguimiento continuo del cumplimiento de los planes y se evaluarán los resultados.
- Cálculo de la huella de carbono: se elaborará un instructivo para la Medición, Reporte y Verificación (MRV) de la Huella de Carbono Organizacional.
- Programa HuellaChile: se realizará una capacitación a las empresas respecto al Programa HuellaChile, cálculo de Huella de Carbono y uso de la herramienta HuellaChile.

La Cámara Chilena de Refrigeración y climatización con apoyo técnico del MMA, a través de la Unidad de Ozono y Programa Huella Chile y del Ministerio de Energía elaborará un formato de diagnóstico de gestión y línea de base de uso de refrigerantes para ser entregado y difundido a las empresas adheridas:

- Diagnóstico: Cada empresa realizará una evaluación detallada de su uso actual de refrigerantes.
- Indicadores de sustentabilidad: se definirán indicadores para medir el desempeño ambiental de las empresas.
- Reporte sectorial: se recopilarán los datos de todas las empresas para obtener un panorama general del sector.

6.1.3.2 Segundo Acuerdo de Producción Limpia Sector Industria Láctea Procesadora Sustentable, Programa Chile Origen Consciente

El Segundo APL del Sector Lácteo, tiene por objetivo dar continuidad al estándar de sustentabilidad, implementar medidas de acción climática, para establecer una gestión de carbono sostenible y contribuir a la mitigación de gases efecto invernadero, aumentando así, la resiliencia del sector, en línea con las políticas e instrumentos públicos, involucrando a los actores de la cadena de suministros en materia de gestión de la energía, el agua, los residuos, y refrigerantes.

En cuanto a los sistemas de climatización y refrigerantes el APL incluye medidas específicas que buscan reducir el impacto ambiental en lo que respecta al uso de refrigerantes y emisiones de gases de efecto invernadero como:

- Creación de línea base en donde se evalúe el uso actual de refrigerantes, identificando el tipo, cantidad, posibles mejoras, información sobre hábitos, capacitaciones, entre otras.

- Autoevaluación empresarial en donde cada empresa realiza un análisis de su situación actual, usando un formato entregado o propio.
- Desarrollo de un plan de gestión en donde se creará una guía para que las empresas elaboren planes detallados para reducir el uso de refrigerantes dañinos y mejorar la eficiencia energética en donde se incluye medidas como: definición de metas de reducción de uso de HCFC, HFC, y de recambio por tecnologías sin HCFC, HFC; programa de incorporación de oportunidades de mejora identificadas en el diagnóstico; registro de seguimiento y control; informe de evaluación de avance y final del Plan.
- Implementación de planes: las empresas adaptarán los planes a sus propias instalaciones y los pondrán en práctica.

6.1.3.3 Quinto Acuerdo de Producción Limpia Sector Industria de Alimentos Procesados Sustentable

El siguiente APL tiene por objetivo continuar al estándar de sustentabilidad del Sector de Industria de Alimentos Procesados, establecer una gestión de carbono sostenible, contribuir a la mitigación de los GEI, y aumentar la resiliencia del sector, en línea con las políticas e instrumentos públicos e involucrando a los actores de la cadena de suministros, en materia de gestión de la energía, agua, residuos, carbono, refrigerantes, entre otros.

Como medidas relacionadas con los sistemas de refrigeración y climatización se tienen las siguientes:

- Encargados(as) del APL por cada área temática considerada en el Acuerdo: (i) gestión del recurso hídrico, (ii) gestión de gases de efecto invernadero, (iii) gestión integral de residuos y refrigerantes, (iv) gestión de la energía, (v) gestión de debida diligencia, derechos humanos e igualdad de género y (vi) gestión de riesgos frente al cambio climático. Con su respectivo suplente.
- Programa de capacitación en materias de sustentabilidad y cambio climático, considerando la temática “Reporte y Gestión de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero: Oportunidad de mitigación y avances a carbono neutralidad, que considere a los refrigerantes, con el apoyo técnico del Ministerio de Energía y Ministerio del Medio Ambiente, a través del programa HuellaChile y UnidadOzono”.
- Programas de contenidos del curso de sustentabilidad que aborda las temáticas del APL, en donde se realizarían capacitaciones con temáticas de sustentabilidad, residuos, energía, agua, gases de efecto invernadero, refrigerantes.
- Se identificarán y evaluarán proyectos de reducción de Gases de efecto Invernadero, los proyectos relacionados con los sistemas de refrigeración son: Reemplazo de refrigerantes con alto potencial de calentamiento global; Disminución de fugas de refrigerantes; Disposición final de refrigerantes (reciclaje de refrigerantes y/o regeneración).
- Estrategia de circularidad y cero residuos a relleno sanitario promoviendo la prevención y valorización de residuos y refrigerantes: Instructivo para la elaboración, por parte de las empresas, de un plan de gestión integral de residuos y refrigerantes cuyos contenidos

mínimos deberán ser: Responsable; Objetivos; layout de la gestión de residuos con sus puntos de generación y acopio, registro de identificación de tipo de refrigerante, entre otros.

- Evaluar las oportunidades de proyectos de mejora identificadas en la implementación del plan de gestión integral de residuos y refrigerantes.

6.1.3.4 Cuarto Acuerdo de Producción Limpia Sector Industria de Alimentos Procesados

El Acuerdo de Producción Limpia (APL) del Sector Industria de Alimentos Procesados Sustentable tiene como objetivos principales fortalecer la sostenibilidad de las empresas del sector y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), a través de acciones estratégicas como la eficiencia energética y la gestión hídrica. Entre sus metas destacan la reducción de un 5% en el consumo energético y un 5% en las emisiones de GEI por tonelada de producto terminado.

En cuanto a los sistemas de climatización y refrigerantes, el APL aborda la eficiencia en sistemas de refrigeración. Algunas de estas medidas son:

- ChileAlimentos con apoyo técnico de la unidad Ozono del MMA y del Minenergía desarrollará un informe para identificar oportunidades de mejora en los sistemas de refrigeración.
- Que las empresas cuenten con técnicos en refrigeración y requieran la contratación del servicio de instalación de sistemas de refrigeración o mantención de los sistemas de refrigeración.
- Capacitar a técnicos en buenas prácticas de refrigeración (BPR) con la Unidad Ozono del Ministerio del Medio Ambiente
- Registrar y reportar mensualmente el uso de refrigerantes.

6.1.3.5 Tercer Acuerdo de Producción Limpia Sector Industria de Alimentos Procesados

El Tercer Acuerdo de Producción Limpia (APL) de la Industria de Alimentos Procesados tiene como objetivo principal profundizar la estrategia de producción limpia en el sector para aumentar la competitividad de las empresas, mejorando la sostenibilidad de sus procesos. Los objetivos específicos son:

1. Incorporar prácticas de sustentabilidad.
2. Reducir el indicador de desempeño energético en un 10%.
3. Avanzar en la implementación de energía solar fotovoltaica.
4. Fomentar el cálculo de huella hídrica y reducir las emisiones de carbono.
5. Eliminar refrigerantes con alto potencial de calentamiento global y agotamiento de la capa de ozono
6. Disminuir el consumo de plaguicidas
7. Mejorar las competencias laborales en materia de producción limpia

8. Posibilitar la modificación del reglamento para el manejo de lodos provenientes de plantas de tratamiento de efluentes de la industria procesadora de frutas y hortalizas.
9. Valorizar los residuos sólidos orgánicos

En cuanto a los sistemas de climatización y refrigerantes el APL incluye específicamente medidas como:

- eliminación de gases refrigerantes que tienen un alto PCG y que contribuyen PAO.
- caracterización de sistemas de refrigeración en las empresas
- levantamiento de información respecto al personal técnico de servicio (interno y externo), uso (mantención y/o instalación nueva), almacenamiento y carga instalada de refrigerantes en los distintos equipos y sistemas de cada instalación
- capacitación de técnicos en buenas prácticas de refrigeración, y la introducción de refrigerantes con nulo o bajo PCG y PAO
- diseñar y evaluar técnica y económicamente ex-ante un proyecto piloto para introducir refrigerantes con nulo PAO y nulo o bajo PCG dependiendo de los resultados de las medidas anteriores.

6.1.4 Planes de acción específicos

6.1.4.1 Propuesta del Plan Nacional de Frío

La Propuesta de Plan Nacional de Frío (PPNF) de Chile es una estrategia desarrollada para mejorar la eficiencia energética y ambiental del sector de refrigeración y aire acondicionado (RAA). Tiene como objetivo principal avanzar hacia alternativas de enfriamiento que sean más eficientes energéticamente y que utilicen refrigerantes de bajo o nulo PCG. También busca generar sinergias entre las medidas de eficiencia energética (EE) y las de mitigación del cambio climático (CC) implementadas a nivel nacional.

El documento propone una serie de medidas y estrategias para enfrentar los desafíos del sector de refrigeración y aire acondicionado (RAA) en Chile, tales como la reducción del consumo de refrigerantes con altos PCG y la mejora de la eficiencia energética en los equipos de refrigeración. A través de la implementación de estas medidas, se pretende reducir las emisiones de GEI asociadas tanto al consumo de energía eléctrica, como también al uso de refrigerantes en este sector.

Para esto, la PPNF discute la existencia de diversos programas implementados por la Agencia de Sostenibilidad Energética (ASE):

- Programa de Eficiencia Energética en Edificios Públicos (PEEEP): cambio de tecnología u optimización de procesos, mejorando el desempeño energético de sistemas de refrigeración y climatización de edificios públicos.
- Programa Giro Limpio: apunta a certificar y reconocer los esfuerzos realizados por las empresas de transporte de carga en el ámbito de la sustentabilidad y la EE.

- Programa Gestiona Energía MiPyMEs: mejorar la eficiencia energética de las pequeñas y medianas empresas, entregando además información sobre alternativas de financiamiento para implementarlas.
- Programa Ponle Energía a tu Pyme: programa de siete iniciativas distintas relacionadas a la gestión de la energía en las empresas.
- Sello de Excelencia Energética: reconocimiento entregado por el Ministerio de Energía a empresas líderes en la gestión de su energía

Paralelamente, el PPNF promueve la adopción de estándares mínimos de eficiencia energética en equipos de refrigeración, lo que fuerza una mejora progresiva en la tecnología disponible en el mercado. Estos estándares ayudan a reducir el consumo energético y, por ende, las emisiones de CO₂, contribuyendo tanto a la eficiencia como a la mitigación del cambio climático. Aumenta la eficiencia y se disminuye la generación de los HFC

6.2 Escenarios de norma de HFC

6.2.1 Identificación los gases de efecto invernadero y forzantes climáticos a normar y descripción de fuentes emisoras

Los GEI que se normarán corresponden a los incluidos en el Anexo F, Grupos I y II, del Decreto 3, Reglamento que establece normas aplicables a las importaciones y exportaciones de las sustancias controladas por el Protocolo de Montreal y sus enmiendas, los volúmenes máximos de importación y los criterios para su distribución. Estos gases se muestran en la Tabla 6-2. Es relevante señalar que para 2022, las emisiones de HFC han llegado a 5,5 MtCO₂ eq, lo que representa un incremento de tres veces en comparación con las de 2012, que fueron de 1,8 MtCO₂ eq. Las principales fuentes de estas emisiones son la refrigeración industrial (49%), el aire acondicionado móvil (15%), la refrigeración comercial (14%) y el aire acondicionado fijo (14%).

Tabla 6-2 Gases a normar

Nombre	Nombre químico	Fórmula	PCG
HFC-134a	1,1,1,2-tetrafluoro etano	CH ₂ FCF ₃	1.430
HFC-245fa	1,1,1,3,3-pentafluoro propano	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	1.030
HFC-365mfc	1,1,1,3,3-pentafluoro butano	CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃	794
HFC-227ea	1,1,1,2,2,3-heptafluoro propano	CF ₃ CHF ₂ CF ₃	3.220
HFC-236fa	1,1,1,3,3,3-hexafluoro propano	CF ₃ CH ₂ CF ₃	9.810
HFC-43-10mee	1,1,1,2,2,3,4,5,5,5-decafluoro pentano	CF ₃ CHFCH ₂ CF ₂ CF ₃	1.640
HFC-32	difluoro metano	CH ₂ F ₂	675
HFC-125	1,1,1,2,2-pentafluoro etano	CHF ₂ CF ₃	3.500
HFC-143a	1,1,1-trifluoro etano	CH ₃ CF ₃	4.470
HFC-152a	1,1-difluoro etano	CH ₃ CHF ₂	124
HFC-23	trifluorometano	CHF ₃	14.800

Fuente: Elaboración propia a partir del Decreto 3, Anexo F.

6.2.2 Descripción de las fuentes emisoras

Los sistemas de refrigeración y climatización son una de las principales fuentes de emisiones debido al mal uso de refrigerantes, muchos de los cuales son GEI con un alto PCG. Las fugas de refrigerante, que pueden ocurrir por fallas en los equipos o durante su manipulación, representan una fuente significativa de emisiones no controladas. Resulta fundamental destacar que, con un uso adecuado del refrigerante e instalaciones, incluyendo las mantenciones preventivas y buenas prácticas asociadas, las emisiones deberían ser mínimas o inexistentes. A pesar de lo anterior, cuando ocurre un mantenimiento preventivo inadecuado o insuficiente de estos sistemas, se aumenta la probabilidad de fugas reduciendo la eficiencia energética, lo que incrementa el consumo de energía y, por ende, las emisiones indirectas derivadas de la generación eléctrica.

En la Sección 3.2.1 se discutieron los principales sistemas de frío que emplean refrigerantes, los cuales son esenciales para el funcionamiento de diversos procesos industriales en diferentes sectores económicos, mientras que en la Sección 4.1 se profundizó en las características de las categorías propuestas para desagregar fuentes de emisión. La Tabla 6-3 presenta los sistemas más utilizados en las categorías definidas para la desagregación de grandes usuarios. Un antecedente importante a considerar son las tasas de emisiones máximas permitidas por diferentes equipos en base a la normativa EEUU, donde ya se mencionó que para el caso de equipos de refrigeración comercial se permite una tasa de fuga aplicable del 20%, para aparatos de refrigeración industrial la tasa de fuga es del 30% y para climatización para confort, transporte refrigerado o cualquier equipo con 6,8 kg o más la tasa de fuga es de un 10%.

En base a los antecedentes recopilados en las etapas previas del estudio, se propone limitar las emisiones de aquellos establecimientos usuarios de HFC que alojen un banco igual o superior a 650 ton CO₂eq. Este valor resulta de multiplicar 500 kg de refrigerante HFC-134a por su respectivo PCG100. La definición de este valor se basa en tres observaciones:

- La NCh3241 determina que un gran usuario es aquel que en la sumatoria de sus sistemas aloja una cantidad mayor a 500 kg de refrigerante, cualquiera sea su tipo.
- El refrigerante de menor PCG100 detectado en los sectores incluidos es el HFC-134a con, un PCG igual a 1.300.
- En las categorías que mayor aporte realizan al banco (A y H) en términos de CO₂eq, se observa que hay usuarios con menos de 500 kg en sus bancos que presentan tasas de mantención significativas, por lo que sería igualmente importante que reduzcan sus emisiones.

Por lo anterior, definir un valor en término de tonCO₂eq en lugar de kg asegura que se incluyan aquellos establecimientos que tienen un mayor impacto, independiente de si sobrepasan los 500 kg de refrigerante alojado en sus bancos. En otras palabras, esto tiene como consecuencia que se limiten las emisiones de establecimientos con menos de 500 kg, pero que usan sustancias con

alto PCG y que presentan potencialmente altas tasas de mantención. En la Tabla 6-4 se muestra la conversión de la cantidad de los diferentes HFC requeridos para cumplir con las 650 ton CO₂ eq.

Es relevante señalar que hay categorías en las que los sistemas se superponen, como ocurre en las Categorías C y D. Esta coincidencia se debe a que ambas categorías incluyen centros de distribución, siendo la principal diferencia entre los sistemas de estas categorías el tamaño, la capacidad de refrigeración requerida y la carga de refrigerante, entre otros factores.

Tabla 6-3 Grandes usuarios y los principales sistemas y/o procesos que utilizan refrigerantes

Categoría	Usos de refrigerante en sistemas de frío
Categoría A	El almacenamiento y enfriamiento en la Categoría A incluye cámaras de prefrío, antecámaras, cámaras de mantenimiento y de materia prima congelada, junto con sistemas de congelación rápida individualizada (IQF) y unidades de frío. Los estanques enfriadores pueden ser cerrados, horizontales, abiertos, móviles o verticales, y se complementan con pre-enfriadores tubulares y de placas. Los sistemas de frío instantáneo se utilizan en cámaras de refrigeración y congelación, mientras que los túneles pueden ser estáticos o continuos. Otros equipos importantes incluyen frigoríficos, mezcladores, tanques de mezclado, homogeneizadores, intercambiadores de placas, tinas de maduración con agitadores y freezers. También se utilizan envasadoras rotatorias y sistemas de enfriamiento para reefers. Adicionalmente, se emplean cámaras frigoríficas, congeladores domésticos, bodegas de almacenamiento, plantas de agua enfriada (chillers) y aire acondicionado. Estanques de acero inoxidable con camisas refrigerantes, serpentines, bombas de calor y sistemas de climatización para naves de crianza y maduración también forman parte del equipo, así como enfriadores de agua y equipos para oficinas y laboratorios.
Categoría B	Unidades de frío, estanques enfriadores (estanques cerrados u horizontales, estanques abiertos, estanques móviles y estanques verticales), pre-enfriadores (pre-enfriador tubular, pre-enfriador de placas), sistemas de frío instantáneo, cámaras de frío como cámaras de refrigeración, cámaras de congelación, túneles de congelación y abatidores de temperatura.
Categoría C	Sistemas centralizados, sistemas modulares o racks, sistemas independientes.
Categoría D	Sistemas centralizados, sistemas modulares o racks, sistemas independientes.
Categoría E	Equipos compactos tipo rooftop, sistemas divididos de volumen de refrigerante variable (VRV), enfriadores de agua tipo chillers, Split individuales y múltiples.
Categoría F	Equipos compactos tipo rooftop, sistemas divididos de volumen de refrigerante variable (VRV), enfriadores de agua tipo chillers, Split individuales y múltiples.
Categoría G	Equipos compactos tipo rooftop, sistemas divididos de volumen de refrigerante variable (VRV), enfriadores de agua tipo chillers, Split individuales y múltiples.
Categoría H	Sistemas centralizados, sistemas modulares o racks, sistemas independientes, climatización y refrigeración en sala de ventas incluyendo vitrinas refrigeradas, enfriadores, congeladores y todo aquel sistema que incluya el uso de refrigerante HFC.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-4 Conversión de las 650 ton CO2 eq para cada refrigerante

Nombre	PCG100 AR5	Cantidad de HFC (kg)	Cantidad de HFC redondeada a la cincuenta (kg)
HFC-134a	1.300	500	500
HFC-32	677	960	950
R-410A	1.924	338	350
R-407C	1.624	400	400
R-507A	3.985	163	150
R-404A	3.943	165	150
R-438A	2.059	316	300

Fuente: Elaboración propia

Para efectos de la norma, se considerarán grupos de fuentes dentro de un establecimiento, debido a que cada sistema puede comportarse como una fuente individual incluso dentro de un mismo recinto.

A continuación, en la Tabla 6-5 se muestran las categorías y el banco en ton de CO2 eq por establecimiento para si aplican los límites de emisiones.

Tabla 6-5 Banco en ton CO2 eq por establecimiento de cada categoría

Categoría	Subsector	Banco promedio [ton CO2 eq por establecimiento]	¿Aplica algún límite de emisión?
Categoría A	Acuícola, Hortofrutícola, Alimentos congelados	3.147	Sí
Categoría B	Productores primarios lecheros Estrato 1	225	No
	Productores primarios lecheros Estrato 1	75	No
	Productores primarios lecheros Estrato 1	27	No
Categoría C	Centro de distribución Tramo 3	2.018	Sí
	Centro de distribución Tramo 4	796	Sí
Categoría D	Centro de distribución Tramo 2	1.420	Sí
	Centro de distribución Tramo 1	1.155	Sí
Categoría E	Recintos de Salud hospitalarios	982	Sí*
	Malls	1.074	Sí*
	Aeropuertos	769	Sí*
Categoría F	Recintos de salud de atención primaria	20	No
	Hoteles	49	No
Categoría G	Espacios habitables minería	S.I.	No
Categoría H	Supermercados	2.573	Sí

(*En base a los antecedentes un establecimiento promedio debería tener límites de emisión, pero no se cuenta con información para proponerlos)

Fuente: Elaboración propia

Resulta importante mencionar que para estimar el banco promedio de las categorías A y H se trabajó con las bases de datos disponibles de estudios anteriores, por lo que el banco y número de establecimientos corresponden a la muestra. En cambio, para las categorías desde la B hasta la G, al no contar con las bases de datos ya que muchos de estos inventarios se realizaron a partir

del cálculo de superficie, se utilizaron los datos del universo, es decir, se trabajó con los números ya extrapolados. Respecto a la categoría G que se menciona como S.I., se explica dado la incertidumbre que se tiene por la cantidad de espacios habitables en minería debido a su condición efímera.

Con esto se puede establecer las categorías a las que se les aplicarían los límites de emisión establecidos en la norma. Sin embargo, esto hay que mirarlo con cuidado ya que la toma de decisiones debe considerar la incertidumbre de los datos presentados a lo largo del informe, aplicando un principio precautorio. Además, resulta fundamental incentivar la mejora continua en la calidad de la información base, promoviendo esfuerzos para recolectar y actualizar los datos de manera rigurosa.

6.2.3 Límites de emisión

Las emisiones de sustancias HFC se definen como indica la Ecuación 6-1, Ecuación 6-2 y Ecuación 6-3.

Ecuación 6-1 Emisiones de HFC durante la operación [ton CO₂eq/año] a partir del banco alojado por establecimiento y la tasa de mantención respectiva

$$Emisiones_{t,i} \left[\frac{tonCO_2eq}{año} \right] = \sum_j^J Banco_{i,j} \cdot Tasa\ de\ mantención_i \cdot \frac{PCG_{100,j}}{1000}$$

Donde,

$Emisiones_{t,i}$:	Emisiones anuales de HFC emitidas por el establecimiento i en el año t [ton CO ₂ eq/año].
$Banco_{i,j}$:	Banco alojado de sustancia j en establecimiento i [kg].
$Tasa\ de\ mantención_i$:	Tasa de mantención del establecimiento i [%].
$PCG_{100,j}$:	Potencial de calentamiento global de 100 años de la sustancia controlada j.

Ecuación 6-2 Emisiones HFC [ton CO₂eq/año] durante operación a partir de la recarga utilizada por establecimiento

$$Emisiones_{t,i} \left[\frac{tonCO_2eq}{año} \right] = \sum_j^J Recarga_{t,i,j} \left[\frac{tonCO_2eq}{año} \right]$$

Donde,

$Recarga_{t,i,j}$:	Recarga de la sustancia controlada j, en el establecimiento i, en el año t [kg].
---------------------	--

Ecuación 6-3 Emisiones HFC [ton CO₂eq/año] durante operación a partir de la cantidad de sustancias utilizadas por establecimiento

$$Emisiones_{t,i} \left[\frac{tonCO_2eq}{año} \right] = \frac{\sum_j (HFC_{T,j}[kg] - HFC_{r,j}[kg]) \cdot PCG_{100j}}{1000}$$

Donde,

$HFC_{T,j}$: Cantidad de sustancia controlada j (HFC) total adquirida para el sistema de frío [kg].

$HFC_{r,j}$: Cantidad de sustancia controlada j (HFC) adquirida para el sistema de frío que proviene de sustancias recuperadas o recicladas [kg].

De acuerdo con la Ecuación 6-1, las emisiones se pueden estimar a partir del banco alojado por cada establecimiento y la tasa de mantención propia de cada uno. La Ecuación 6-2 permite estimar las emisiones a partir de las recargas hechas a los sistemas de frío, lo que sería equivalente a lo indicado en la Ecuación 6-3, en donde esta recarga se expresa en términos de la cantidad total adquirida de sustancias controladas, a la cual se le descuenta la cantidad de sustancia que provenga de procesos de regeneración o reciclaje.

Se propone que, para efectos de la norma, las emisiones permitidas por establecimiento deban ser calculadas a partir de las tasas de mantención características de cada categoría y el banco individual alojado por cada establecimiento, es decir, a partir de la Ecuación 6-1 y según se indica en la Figura 6-1. Mientras que, para efectos del cumplimiento de la norma, las emisiones sean estimadas a partir de la Ecuación 6-3.

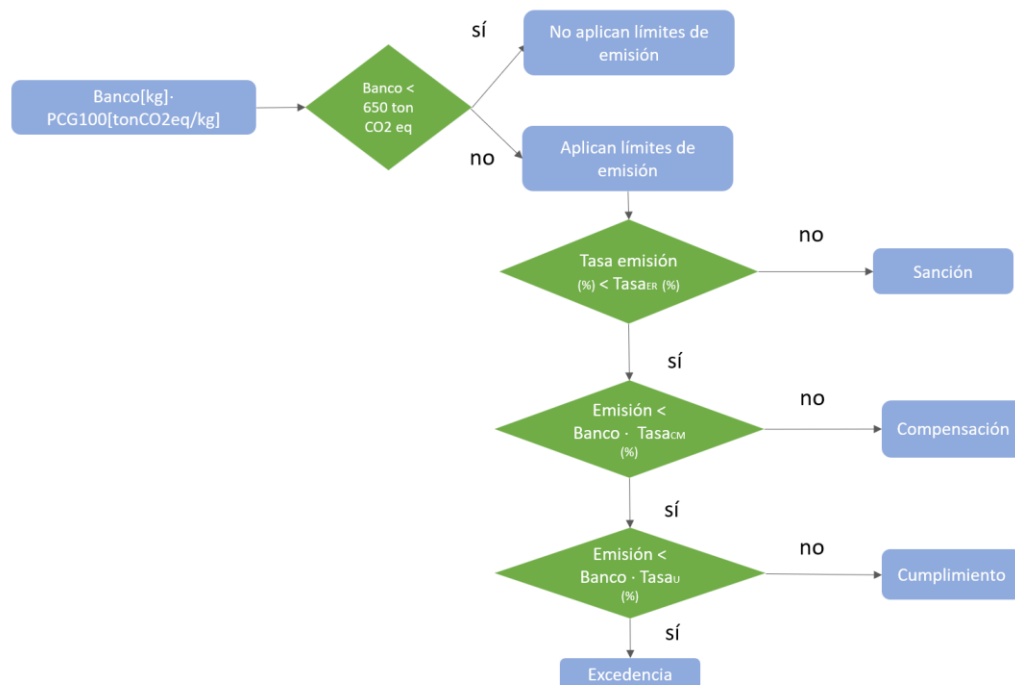


Figura 6-1 Árbol de decisiones para límites de emisión.

Tasa_{ER}: tasa de mantención para estándar de emisiones de referencia; Tasa_{CM}: tasa de mantención para cantidad máxima; Tasa_U: tasa de mantención para umbral.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al primer punto, la determinación de las emisiones permitidas por establecimiento, para que pueda determinarse de forma individual para cada uno, se deberá contar con un periodo de adecuación en la norma, es decir, un periodo entre que esta sea publicada en el Diario Oficial y la entrada en vigor de los límites, en el que, entre otras cosas, los establecimientos deberán declarar las características de sus sistemas de frío, incluyendo carga instalada, tipo de refrigerante y recargas con refrigerante virgen y/o recuperado. Se propone que para este fin se utilice el sistema de registro indicado en la Sección 5.3, que sea similar al Sistema de Registro de Ozono (SIRO), en donde los usuarios de sustancias controladas deberán reportar los equipos en uso, la carga que contienen, sustancias utilizadas, recargas, etc. Si es que no se pudiera utilizar el registro mencionado, se propone que la SMA tenga uno propio para poder declarar las características de los sistemas de frío.

Es importante mencionar que quienes deban declarar en este sistema serán los usuarios finales, es decir, quienes hagan uso de sustancias controladas en sistemas de frío con fines productivos o comerciales, o en otras palabras, el último comprador de una sustancia regulada antes de que se utilice para su propósito previsto.²² Además, se propone que, independiente del tamaño del banco de un establecimiento, si es que este pertenece a alguna de las categorías mencionadas en la Sección 4.1, este deba registrar las características y tamaño de sus sistemas de frío.

²² Definición tomada de la Ley AIM de la USEPA

El fin de este registro será generar una línea base por establecimiento y calcular la emisión máxima permitida por establecimiento, expresado en ton CO₂eq por año, no acumulables. Esta emisión como se expresa en la ecuación asociada será calculada a partir de un porcentaje máximo, determinado por cada categoría, según si se trata del estándar de emisiones de referencia, la cantidad máxima o el umbral y para tres escenarios de diferente exigencia.

En el caso de la categoría A, se proponen los límites de emisión indicados en la Tabla 6-6. Estos están basados en distintos estadísticos descriptivos de las tasas de mantención de la muestra obtenida en el inventario sectorial correspondiente (ver Sección 4.1). Es decir, por ejemplo, el estándar de emisiones de referencia del escenario más laxo está basado en el percentil 70 redondeado a la decena. La cantidad máxima, estimada a partir del estándar de emisiones de referencia, supone la implementación de control de fugas, lo que según Purohit & Höglund-Isaksson (2017) tiene una eficiencia de reducción de entre el 30% y 42%, dependiendo de la aplicación.

Tabla 6-6 Escenarios para el primer año de entrada en vigor de límites de emisión para Categoría A y los estadísticos en que se basan

Escenario	Menos exigente		Intermedio		Más exigente	
	Tasa	Estadístico en el que se basa	Tasa	Estadístico en el que se basa	Tasa	Estadístico en el que se basa
Estándar de emisiones de referencia	60%	Percentil 70 redondeado a la decena	50%	Promedio redondeado a la decena	30%	Percentil 50 redondeado a la decena
Cantidad máxima	35%	Implementación de control de fugas**	30%	Implementación de control de fugas** (redondeado a la decena)	20%	Implementación de control de fugas** (redondeado a la decena)
Umbral	15%	Percentil 30	10%	Percentil 10 redondeado	10%	Percentil 10 redondeado

Fuente: Elaboración propia. **eficiencia de reducción de 42% en base a (Purohit & Höglund-Isaksson, 2017).

De forma similar, para la Categoría H que comprende supermercados, se proponen límites de consumo basados en estadísticos descriptivos de las tasas de mantención de la muestra obtenida en el inventario sectorial correspondiente. Estos límites se observan en la Tabla 6-7. Se observa que, en el escenario menos exigente, como máximo los establecimientos podrían emitir hasta un 40% de su banco sin compensar.

Tabla 6-7 Escenarios para el primer año de entrada en vigor de límites de emisión para Categoría H y los estadísticos en que se basan

Escenarios	Menos exigente		Intermedio		Más exigente	
	Tasa	Estadístico en que se basa*	Tasa	Estadístico en que se basa*	Tasa	Estadístico en que se basa*
Estándar de emisiones de referencia	60%	Percentil 70 redondeado a la decena	50%	Promedio redondeado a la decena	40%	Percentil 50 redondeado a la decena
Cantidad máxima	40%	Implementación de control de fugas** (redondeado a la decena)	35%	Implementación de control de fugas** (redondeado a la decena)	30%	Implementación de control de fugas** (redondeado a la decena)
Umbral	20%	Percentil 40 redondeado a la decena	10%	Percentil 25 redondeado a la decena	10%	Percentil 25 redondeado a la decena

*Estadísticos obtenidos a partir del promedio de tasas obtenidas por ATS (2020) y GreenLab Dictuc (2017); **eficiencia de reducción de 30% en base a (Purohit & Höglund-Isaksson, 2017).

Fuente: Elaboración propia

El motivo para definir los estándares de emisiones de referencia a partir de estadísticos descriptivos de cada muestra tiene que ver con la imposibilidad de modelar escenarios que tomen en consideración las mejores técnicas disponibles, debido a la falta de información por sector. Por lo anterior, esta propuesta se basa en el supuesto de que, para los respectivos escenarios, el percentil 70, el promedio y el percentil 50, representa a aquellos establecimientos que, en consideración de los incentivos de mercado (la recarga representa un costo), ya operan con las mejores técnicas disponibles. Adicionalmente, los escenarios propuestos son una base para el análisis exploratorio que se hará en las etapas posteriores del estudio y podrían variar según los resultados que se obtengan.

Para el resto de las categorías, es importante mencionar que no se cuenta con información desagregada de las muestras, por lo que las conclusiones que se pueden extraer de los inventarios sectoriales podrían no representar la realidad. Lo anterior, refuerza la necesidad de que exista un registro de sistemas de frío que agrupe a todas las categorías.

En el caso de las categorías C y D, correspondientes a centros de distribución de distintos tamaños cuyos bancos podrían superar las 650 tonCO₂eq, se propone que los límites de emisión sean equivalentes a aquellos propuestos para la categoría H. El motivo de esto es que, en base a los antecedentes recopilados, existe una complementariedad entre las actividades de supermercados y centros de distribución y además, las actividades y equipos utilizados suelen ser similares. Los límites para los tres escenarios propuestos se muestran en la Tabla 6-9 y Tabla 6-10. Además, a modo de comparación, en la Tabla 6-8 se muestra el rango de tasas entregado por el IPCC. Es posible observar que, en el escenario intermedio, la cantidad máxima coincide con el límite superior de este rango.

Tabla 6-8 Rango de tasas de mantención sugeridas para Categorías de la C, D y E en base a IPCC (2006)

Tasas de mantención sugeridas en base a IPCC	Categoría C	Categoría D	Categoría E
Lím. Superior	35%	35%	10%
Lím. inferior	10%	10%	1%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-9 Escenarios para el primer año de entrada en vigor de límites de emisión para Categoría C

Escenario	Menos exigente	Intermedio	Más exigente
Límites de emisión	Tasa	Tasa	Tasa
Estándar de emisiones de referencia del IPCC	60%	50%	40%
Cantidad máxima	40%	35%	30%
Umbral	20%	10%	10%

Fuente: Elaboración propia a partir del IPCC.

Tabla 6-10 Escenarios para el primer año de entrada en vigor de límites de emisión para Categoría D

Escenario	Menos exigente	Intermedio	Más exigente
Límites de emisión	Tasa	Tasa	Tasa
Estándar de emisiones de referencia del IPCC	60%	50%	40%
Cantidad máxima	40%	35%	30%
Umbral	20%	10%	10%

Fuente: Elaboración propia a partir del IPCC.

En el caso de la categoría E, correspondiente a malls, hospitales y aeropuertos, si bien el análisis de los inventarios sectoriales arrojó que un establecimiento promedio podría tener un banco superior a 650 tonCO₂eq (ver Tabla 6-5), por lo que corresponde limitar sus emisiones, también son establecimientos que presentan tasas de mantención bajas en relación con otras categorías (ver Tabla 6-8). Por lo anterior, sumado a la falta de información, se propone que esta categoría, al igual que el resto, deba registrar su actividad en el sistema que se disponga para tal fin, y que una vez que se cuente con información sobre el comportamiento y operación de los establecimientos que la componen, se diseñe un límite de emisión adecuado.

En cuanto a la progresividad de la norma, los límites de consumo por categoría deberán disminuir conforme avance el tiempo hasta alcanzar un porcentaje de 5%. Como ya se introdujo en la fórmula respectiva, se propone no considerar dentro de la emisión aquellas sustancias recicladas o regeneradas, de forma que se incentive el consumo de estas por sobre las sustancias nuevas. Esta estrategia además contribuiría al desarrollo de las empresas dedicadas a la regeneración y

reciclaje de HFCs. En la Tabla 6-11, se muestra un calendario de reducción por categoría para las cantidades máximas por periodo.

Tabla 6-11 Calendario propuesto de reducción de consumo por categoría para cantidades máximas en escenario intermedio

Periodo	Categoría A	Categoría C	Categoría D	Categoría H
<2029	30%	35%	35%	35%
2029-2034	20%	25%	25%	25%
2035-2039	15%	15%	15%	15%
2040-2044	10%	10%	10%	10%
>2044	5%	5%	5%	5%

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al cumplimiento de la norma, como se dijo anteriormente, las emisiones deberían ser estimadas a partir de la recarga que declara el establecimiento y se propone no considerar dentro de la recarga aquellas sustancias provenientes de procesos de reciclaje o regeneración. El objetivo de esto sería asegurar que las sustancias regeneradas o recicladas sean preferidas por sobre las sustancias vírgenes y por ende asegurar su demanda.

La estrategia de limitar las emisiones por establecimiento supone el incentivo de dos comportamientos por parte de los responsables de los sistemas de frío: 1) tomar acciones preventivas para evitar que sea necesaria la recarga, como por ejemplo mantenciones preventivas o sistemas de detección; 2) recambio de sistemas, por aquellos que utilicen sustancias con bajo o nulo PCG y que permitan emitir por debajo del máximo permitido, en caso de que sea necesaria la mantención; 3) fomentar la recuperación, reciclaje y regeneración así como la economía circular y; 4) fortalecer el sistema de profesionales certificados siguiendo la idea propuesta en la subsección 5.3.

En el caso de que un establecimiento deseara cambiar todos sus sistemas de frío por otros que utilicen sustancias refrigerantes de bajo PCG, y esto tuviese como resultado la renovación de todo el banco de refrigerante alojado en el sistema y a su vez, esto significara un consumo superior al porcentaje asignado para el primer año, se tienen dos alternativas: 1) ejecutar el recambio de sistemas durante el periodo de adecuación de la norma, es decir, cuando aún no apliquen los límites de consumo, o 2) que, si se hiciera el recambio cuando ya han entrado en vigor los límites, se consideren la posibilidad de obtener el permiso de consumir a través de los excedentes de otro establecimiento. Este mismo mecanismo sería considerado en el caso de que, por otros motivos, un establecimiento deba emitir por sobre la cantidad máxima permitida.

Adicionalmente, en el caso de que un establecimiento incurra en el recambio total de su banco producto del recambio de sistemas, como ya se abordó en las buenas prácticas asociadas a las medidas de reducción de emisiones, existe una eficiencia de reducción tanto para el banco asociado a controles de fugas y a las emisiones al término de la vida útil. Es en este último punto se requiere que las emisiones sean mínimas, por lo que se recomienda, en base a lo revisado en

la normativa internacional, que sea una persona certificada la que realice el retiro de estos equipos y que aquella recupere todo el refrigerante contenido, y que además deje registro de la actividad recién mencionada.

Además, en el caso de que un establecimiento decidiera aumentar el tamaño de sus operaciones y eso tuviese como consecuencia el incremento del banco de refrigerante, este deberá registrarlo en el sistema de registro, de forma que se ajuste la línea base del establecimiento.

Al respecto de la relación entre la emisión permitida por establecimiento y los volúmenes de importación indicados en la normativa chilena (Sección 6.1.1), es importante señalar que, por un lado, la Modificación del D.S.3/2019 actúa modificando la oferta de sustancias HFC en el mercado chileno, mientras que, por otro lado, esta posible norma de emisiones actuaría sobre la demanda de estas sustancias.

Cabe notar que, si bien la norma reduciría la demanda por debajo del volumen máximo permitido, sobre todo después del 2045, en donde se permitirían consumos equivalentes al 5% del banco de los establecimientos a normar, esta oferta podría abastecer la demanda asociada a aquellas aplicaciones no contempladas en esta norma, como, por ejemplo, transporte refrigerado, aire acondicionado doméstico, aire acondicionado móvil, entre otros. Lo anterior es un escenario, ya que el MMA se encuentra obligado a revisar la norma cada 5 años, según las necesidades a nivel país y del mercado, existiendo la posibilidad de adelantar el calendario de aplicación de la norma.

6.2.4 Otros aspectos sobre el contenido mínimo de la norma

En cuanto al ámbito territorial y periodo en que aplicará la norma de emisión, esta será aplicada para todo el territorio nacional. Lo anterior obedece a que los establecimientos usuarios de sustancias HFC se ubican a lo largo de todo el país. En cuanto al periodo, se sugiere que sean coincidentes con aquellos indicados en el informe de la Primera Etapa del Plan de Implementación de Kigali (Gobierno de la República de Chile, 2023), que indica que el calendario de reducción del consumo para el país debe ser al 1 de enero de cada año:

2024: Congelamiento del consumo al nivel de la línea base

2029: reducción del 10% de la línea base

2035: reducción del 30% de la línea base

2040: reducción del 50% de la línea base

2045: reducción del 80% de la línea base

De forma similar, la progresividad de la aplicación de la norma debería estar alineada con el calendario de Kigali. En cuanto a la contribución de la norma al cumplimiento de los objetivos y metas con los otros instrumentos indicados en la Ley N° 21.455, se deberán tener en consideración las metas sectoriales establecidas en la Estrategia Climática de Largo Plazo, que incluye definiciones sobre los presupuestos sectoriales de emisiones de GEI. En estos casos, es

importante mencionar que incluso con todas las medidas de control implementadas, existe un porcentaje de fuga menor asociada a la operación y recarga de sistemas de frío, por lo que la disminución total de las emisiones provenientes de sustancias HFC solo sería posible si es que hubiese un recambio total por sustancias refrigerantes por PCG nulo.

En cuanto al plazo de la SMA para establecer los protocolos, procedimientos, métodos de medición y análisis para determinar el cumplimiento de la norma, esto deberá hacerse antes de la entrada en vigor de los límites y en concordancia con el calendario de Kigali, es decir, antes del año 2029.

Sobre las certificaciones a las personas técnicas, además de exigir la actualización del conocimiento de forma periódica, se deberá exigir contar con las herramientas necesarias para llevar a cabo la labor, es decir, se deberá contar con una recuperadora, bombonas reutilizables y cualquier otra herramienta que se estime conveniente. Al respecto, es importante mencionar que, si bien esto podría resultar costoso para una persona técnica independiente, se considera la posibilidad de que una empresa se certifique y que se espera que el costo sea traspasado a los establecimientos.

Por último, el umbral de 650 ton CO₂ eq, además de limitar el banco de establecimientos, se presenta como un mecanismo clave de fiscalización para los sistemas de refrigeración industrial y comercial, alineándose con las normativas de Estados Unidos y Europa. En este contexto, los equipos que alcancen o superen las 650 ton CO₂ eq, o que contengan 150 kg o más de refrigerante (el valor mínimo indicado en la Tabla 6-4), deben someterse a controles regulares de fugas. Específicamente, los equipos sin sistemas de detección de fugas requieren inspecciones trimestrales, mientras que aquellos que sí cuenten con dichos sistemas pueden realizar controles semestrales. Además, si un equipo supera la cantidad máxima durante más de tres años consecutivos, será necesario realizar inspecciones semestrales de manera continua, hasta que las emisiones se mantengan por debajo de la cantidad máxima durante al menos un año.

7. Análisis técnico y económico de los escenarios de norma de emisión de HFC de grandes usuarios

En las siguientes secciones se realiza un análisis del comportamiento de la norma para las categorías A, C, D y H, abordando el potencial de reducción de emisiones por cada escenario propuesto e incluyendo sus respectivos costos y beneficios.

7.1 Potencial de reducción de emisiones por escenario

7.1.1 Simulación de establecimientos

Para estimar el potencial de reducción, y estimar los costos de cada escenario propuesto, es fundamental comprender o tener una noción del comportamiento de los distintos establecimientos a nivel nacional en las categorías A, C, D y H. Como ya se mencionó en las secciones anteriores, solo se dispone de una muestra detallada por establecimiento para las categorías A y H, obtenida a partir de encuestas, la cual incluye información sobre bancos y tasas de mantención de diversos establecimientos. A partir de estas muestras, se busca simular diversos establecimientos hasta alcanzar la cantidad total de establecimientos a nivel nacional, asegurando que sigan un comportamiento similar al observado en la muestra.

En la Sección 4.1 se explicó que tanto el banco como la tasa de mantención de las categorías A y H siguen una distribución log-normal. Basándose en este supuesto, se desarrolló un código en *Python* diseñado para simular establecimientos adicionales y completar el universo total estimado de cada categoría. La Tabla 7-1 detalla los parámetros iniciales necesarios para ejecutar el código junto con los datos de las muestras disponibles. Para las categorías C y D, que carecen de datos, se asumió que la categoría C tiene un comportamiento similar al de la categoría H, utilizando los mismos rangos de banco y tasas de mantención. En el caso de la categoría D, al tratarse de establecimientos más pequeños, sus parámetros se definieron como un 38,6% de los de la categoría C, basado en la proporción de sus superficies totales (254.468 m² para la categoría D frente a 659.468 m² de la categoría C) que se pueden ver en la Sección 11.2.2 de los Anexos. La muestra propuesta utilizada en la Tabla 7-1 para las categorías C y D coincide con la utilizada para la categoría H. Sin embargo, al realizar la simulación, se considera el universo completo: en las categorías A y H, se simula únicamente la parte del universo que no está incluida en la muestra (N-m), mientras que, para las categorías C y D, se simula el universo completo (N), utilizando la misma distribución probabilística que se empleó para la categoría H. Este enfoque busca que los rangos y parámetros de simulación sean consistentes y representativos. El funcionamiento del código se detalla a continuación:

- Input inicial:
El programa recibe como entrada una base de datos con los siguientes parámetros por cada establecimiento:
 - Un identificador único (ID).

- El banco en tCO₂eq.
- El logaritmo natural del banco. Este parámetro es especialmente útil porque busca asegurar que la muestra cumpla con una distribución log-normal: al aplicar el logaritmo natural al banco, los valores deberían distribuirse de forma normal.
- La tasa de mantención asociada a cada establecimiento.
- Simulación de establecimientos:
 - El programa utiliza los datos de la muestra para calcular la media y la covarianza de las variables banco y tasa de mantención.
 - Basado en estos parámetros, simula el comportamiento de nuevos establecimientos hasta completar el tamaño total del universo estimado (N), definidos en la Tabla 7-1. Estos se estimaron de dos maneras, los de la categoría A, corresponde a la suma de todos los establecimientos recopilados en inventario sectoriales, y para la categoría H corresponde a la cantidad total de supermercados reportados por el INE a octubre del 2024.
 - Para generar estos nuevos datos, se considera que el banco y la tasa de mantención deben mantenerse dentro del rango observado en la muestra.
- Iteraciones para ajuste de parámetros:
 - El código ajusta iterativamente los valores simulados hasta que los promedios y las desviaciones estándar de las variables simuladas sean lo más similares posible a los valores de la muestra. Con este proceso se busca que los establecimientos simulados reflejen el comportamiento estadístico real de la muestra.
- Resultados:
 - El código genera una base de datos final que incluye:
 - Los ID de los establecimientos de la muestra.
 - Los ID de los establecimientos simulados.
 - Los valores de banco y tasas de mantención, tanto para la muestra original como para los simulados.

Este procedimiento permite ampliar los datos obtenidos a partir de la muestra, simulando establecimientos adicionales hasta alcanzar el número estimado de establecimientos a nivel nacional. Así se busca que se refleje el comportamiento estadístico observado en la muestra y que se obtenga una base de datos ampliada que permita los análisis posteriores a nivel nacional.

Tabla 7-1 Parámetros utilizados para la simulación

Parámetro	A	C	D	H
Muestra (m)	78	- (*)	- (*)	86
Universo (N)	1.865	59	146	1.360
Banco mínimo (tCO ₂ eq)	12	331	128	331
Banco máximo (tCO ₂ eq)	55.790	4.579	1768	4.579
Tasa de emisión mínima (%)	0,001	0,046	0,046	0,046
Tasa de emisión máxima (%)	2,167	1,818	1,818	1,818

(*): Para las categorías C y D no existe una muestra, por lo que se utiliza la distribución de la categoría H para simular los establecimientos totales.

Fuente: Elaboración propia

7.1.1.1 Simulación establecimientos categoría A

Para la categoría A, se realizaron 1.000 iteraciones para que los establecimientos simulados se asemejaran lo más posible a la media y desviación estándar de la muestra. En este proceso, se generaron establecimientos simulados equivalentes a N-m.

La Figura 7-1 muestra el logaritmo natural del banco, evidenciando que tanto la muestra como el universo simulado presentan una distribución normal. Por otro lado, la Figura 7-2 ilustra la tasa de mantención para la muestra y el universo. En este caso, cuando se aplicó el logaritmo natural para seguir el mismo procedimiento, las tasas no seguían una distribución normal, esto puede atribuirse a la presencia de valores extremos, como tasas de mantención cercanas a cero. Además, se excluyeron aquellos casos con tasa de mantención igual a cero, ya que estos tienden a distorsionar la distribución y complican su normalización al aplicar el logaritmo natural. Por este motivo, se optó por conservar las tasas de mantención en su escala original, lo que permitió analizar su comportamiento de forma más realista y garantizar que los datos representen con mayor fidelidad las características del universo simulado.

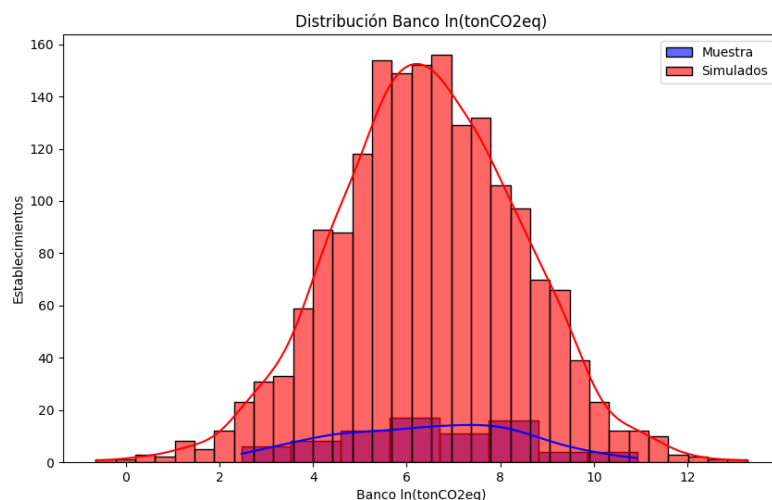


Figura 7-1 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría A

Fuente: Elaboración propia

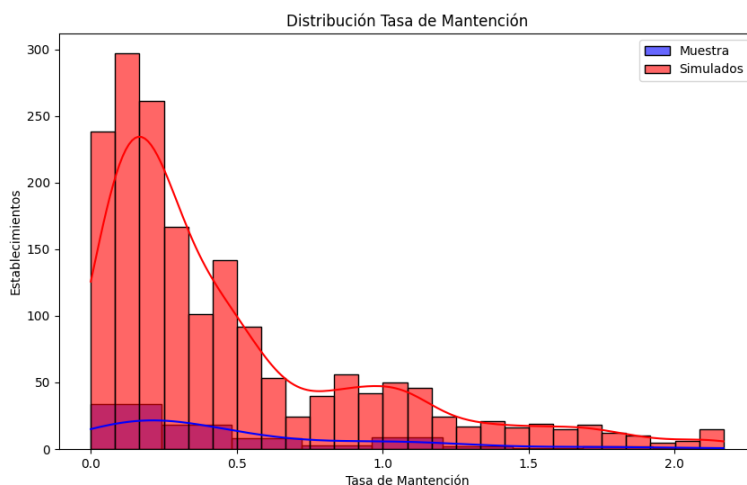


Figura 7-2 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantención, Categoría A

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la Tabla 7-2 compara los principales estadísticos de la muestra con los del universo simulado. Aunque los valores son similares, no son idénticos, ya que cada ejecución del programa genera nuevos valores aleatorios dentro del rango establecido, logrando aproximarse a las características de la muestra.

Tabla 7-2 Estadísticos de la muestra y establecimientos simulados, categoría A

Estadístico	Banco (tCO ₂ eq)		Tasa de mantención (%)	
	Muestra	Universo	Muestra	Universo
Media	3.142	3.188	0,48	0,48
Desviación estándar	7.488	7.119	0,48	0,47
Percentil 25	123	120	0,29	0,28
Percentil 50	651	666	0,15	0,15
Percentil 75	3.097	3.106	0,66	0,67

Fuente: Elaboración propia

7.1.1.2 Simulación establecimientos categoría C

Para la categoría C, se asumió que su comportamiento es similar al de la categoría H, siguiendo los supuestos establecidos previamente. Con base en este enfoque, se simuló el universo completo de la categoría, generando un total de 59 establecimientos simulados.

Se empleó un procedimiento similar al utilizado para la categoría A, trabajando con el logaritmo natural del banco para verificar la distribución log-normal. En cuanto a la tasa de mantención, se conservaron los valores originales sin transformaciones, evitando posibles errores asociados con

tasas iguales a cero. Esto permite reflejar fielmente el comportamiento de los datos originales. Los resultados obtenidos pueden observarse en las Figura 7-3 y Figura 7-4, donde se comparan las distribuciones del banco y la tasa de mantención entre la muestra y el universo simulado.

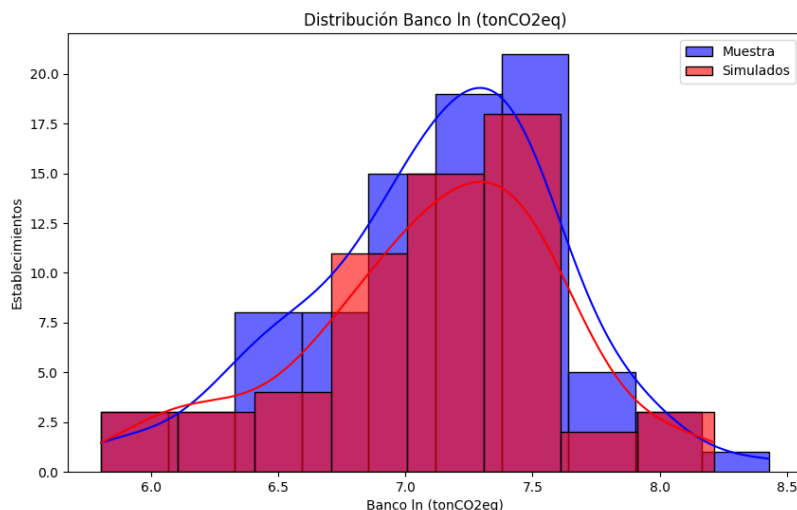


Figura 7-3 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría C

Fuente: Elaboración propia

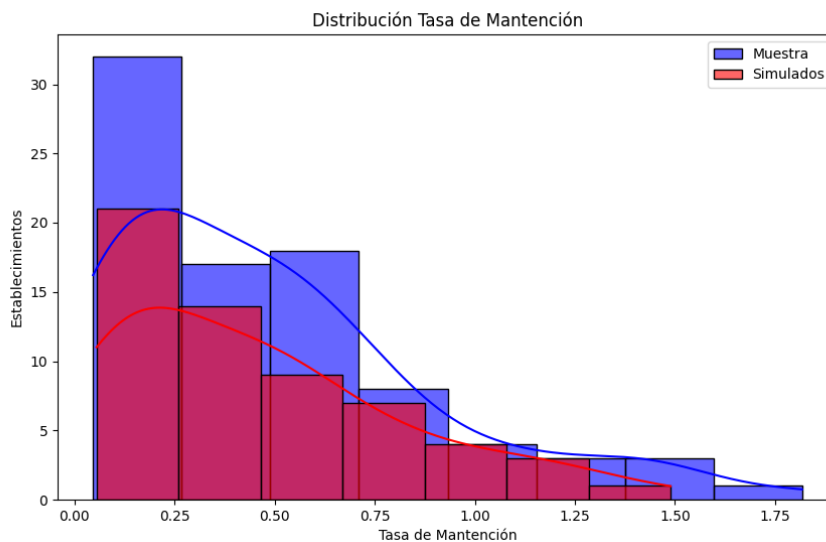


Figura 7-4 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantención, Categoría C

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Tabla 7-3 se presentan los estadísticos correspondientes a esta categoría, donde se observa que los resultados se aproximan aún más a los de la muestra en comparación

con la categoría A. Esto puede explicarse por la menor cantidad de establecimientos a simular en esta categoría, lo que reduce la variabilidad y permite un margen de error menos significativo.

Tabla 7-3 Estadísticos de la muestra y establecimientos simulados, categoría C

Estadístico	Banco (tCO ₂ eq)		Tasa de mantención (%)	
	Muestra	Universo	Muestra	Universo
Media	1.381	1.375	0,48	0,46
Desviación estándar	673	660	0,40	0,36
Percentil 25	937	935	0,14	0,14
Percentil 50	1.314	1.301	0,40	0,36
Percentil 75	1.734	1.755	0,65	0,64

Fuente: Elaboración propia

7.1.1.3 Simulación establecimientos categoría D

La categoría D presenta una distribución similar a las categorías C y H, con la diferencia de que se compone de establecimientos más pequeños. Por este motivo, los rangos del banco se definieron proporcionalmente a la superficie total de la categoría C, tal como se explicó al inicio de esta sección. Siguiendo el mismo procedimiento empleado para la categoría C, se simuló el comportamiento de 146 establecimientos. En las Figura 7-5 y Figura 7-6 se ilustra el comportamiento tanto del banco como de la tasa de mantención de los establecimientos simulados, reflejando la coherencia con el enfoque adoptado.

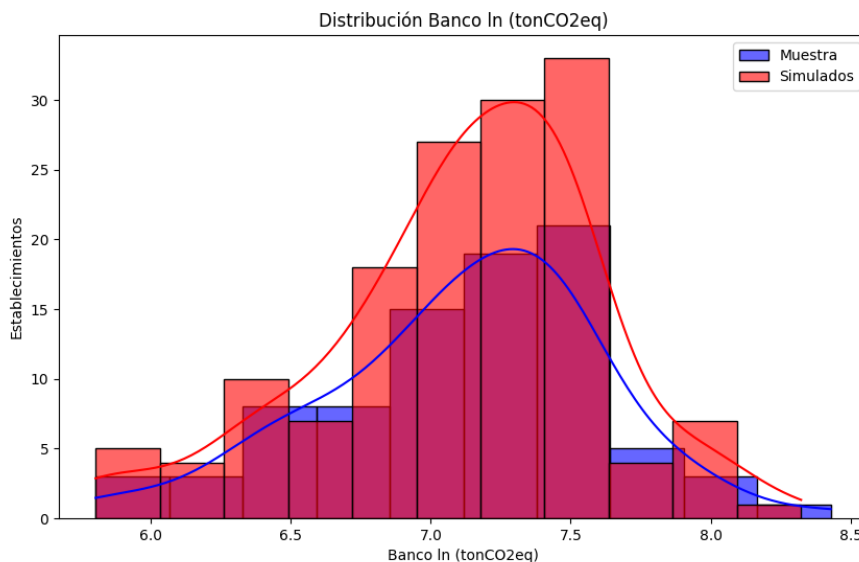


Figura 7-5 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría D

Fuente: Elaboración propia

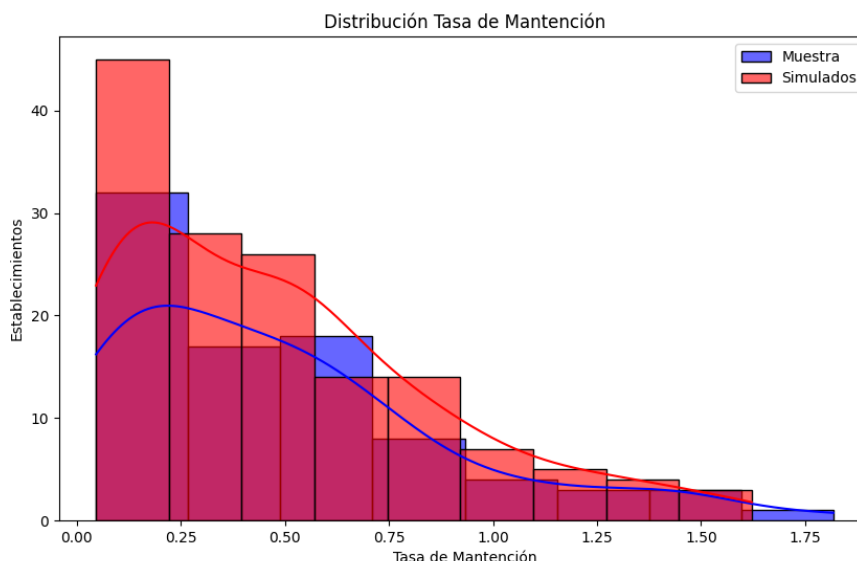


Figura 7-6 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantenimiento, Categoría D

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7-4 se presentan los estadísticos que comparan el comportamiento del universo simulado con el de la muestra. Similar a lo observado en la categoría C, la menor cantidad de establecimientos simulados en esta categoría reduce el margen de error asociado, lo que resulta en estadísticos que muestran una mayor similitud entre la simulación y la muestra original.

Tabla 7-4 Estadísticos de la muestra y establecimientos simulados, categoría D

Estadístico	Banco (tCO2eq)		Tasa de mantención (%)	
	Muestra	Universo	Muestra	Universo
Media	1.381	1.379	0,48	0,48
Desviación estándar	673	640	0,40	0,38
Percentil 25	937	937	0,14	0,14
Percentil 50	1.315	1.315	0,40	0,41
Percentil 75	1.734	1.746	0,65	0,69

Fuente: Elaboración propia

7.1.1.4 Simulación establecimientos categoría H

La simulación de la última categoría, sigue un enfoque similar al aplicado en la categoría A, ya que ambas cuentan con datos de muestra. Inicialmente, la metodología utilizada consistió en generar N-m establecimientos simulados, completando así el universo y asegurando que los datos simulados reflejaran de manera precisa las características observadas.

Sin embargo, a pesar de este enfoque, tanto los valores de banco como las emisiones correspondientes a esta categoría presentaron discrepancias significativas en comparación con lo reportado en los inventarios sectoriales. Para abordar esta situación, se realizó una revisión detallada de la muestra, identificándose que esta incluye exclusivamente establecimientos de cinco regiones del país: Metropolitana, de Valparaíso, de La Araucanía, de Los Lagos y de Los Ríos. Además, se detectó la presencia de datos asociados a R-22, lo que actualmente no debería considerar

Un análisis más detallado de la muestra y del universo reveló que las regiones Metropolitana y de Valparaíso están sobrerrepresentadas en la muestra, con un 82,6% de representación, mientras que a nivel nacional estas dos regiones abarcan solo el 45,2%, como se puede notar en la Tabla 7-5. En contraste, la región de Los Ríos cuenta únicamente con una observación, evidenciando un problema de representatividad.

Para corregir este desequilibrio, se decidió implementar una metodología basada en la ponderación de la muestra. Se asignaron pesos específicos a las observaciones en función de su nivel de representatividad en la muestra y en el universo, calculando estos pesos a partir de la comparación entre las proporciones de representación de cada región.

$$\text{Redistribución} = \frac{\% \text{ Universo de la región}}{\% \text{ Total representado en el universo}} * \% \text{ Total no representado en el universo}$$

Donde,

- % Total representado en el universo = 62,1%
- % Total no representado en el universo = 37,9%

Entonces para cada región de la muestra se tiene que lo siguiente:

1. Metropolitana: Redistribución = 19,4%
2. Valparaíso: Redistribución = 7,3%
3. La Araucanía: Redistribución = 5,8%
4. Los Lagos: Redistribución = 3,1%
5. Los Ríos: Redistribución = 2,8%

Tabla 7-5 Regiones representadas en la muestra

Región	Universo	Muestra	Universo %	Muestra %
Metropolitana	450	38	33,1%	44,2%
Valparaíso	165	33	12,1%	38,4%
La Araucanía	109	8	8,0%	19,3%
Los Lagos	75	6	5,5%	7,0%
Los Ríos	46	1	3,4%	1,2%
Arica y Parinacota	8	0	0,6%	0%
Tarapacá	14	0	1,0%	0%
Antofagasta	34	0	2,5%	0%
Atacama	26	0	1,9%	0%
Coquimbo	65	0	4,8%	0%
O'Higgins	84	0	6,2%	0%
Maula	80	0	5,9%	0%
Ñuble	32	0	2,4%	0%
Biobío	152	0	11,2%	0%
Aysén	10	0	0,7%	0%
Magallanes	10	0	0,7%	0%
Total	1.360	86		

Fuente: Elaboración propia

Ahora con la redistribución para cada región, se suman los porcentajes iniciales de representación en el universo más la redistribución como se observa en la Tabla 7-6.

Tabla 7-6 Universo redistribuido

Región	Porcentaje universo original	Porcentaje redistribución	Porcentaje universo redistribuido
Metropolitana	33,1%	19,4%	51,7%
Valparaíso	12,1%	7,3%	19,4%
La Araucanía	8,0%	5,8%	15,4%
Los Lagos	5,5%	3,1%	8,1%
Los Ríos	3,4%	2,8%	7,4%

Fuente: Elaboración propia

Con lo anterior, se les puede asignar los pesos correspondientes a cada región con la siguiente ecuación. Estos se muestran en la Tabla 7-7.

Ecuación 4 Asignación peso por región

$$\text{Peso ajustado} = \frac{\% \text{ Muestra}}{\% \text{ Universo}}$$

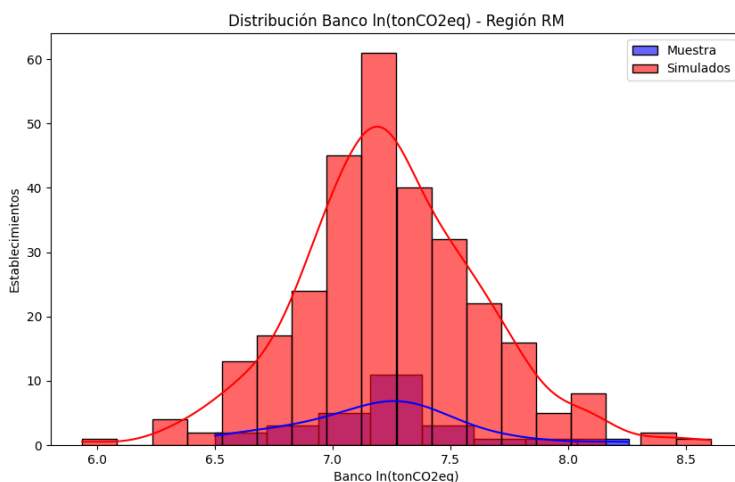
Tabla 7-7 Peso ajustado por región para simulación Categoría H

Región	% Universo original	%Muestra	Peso ajustado
Metropolitana	33,1%	44,2%	0,84
Valparaíso	12,1%	38,4%	1,92
La Araucanía	8,0%	1,9,3%	0,73
Los Lagos	5,5%	7,0%	0,80
Los Ríos	3,4%	1,2%	0,22

Fuente: Elaboración propia

El peso ajustado, se multiplicó por cada banco de cada región correspondiente, y dado que estas regiones que no están presente en la muestra, pero si tienen un nivel de representación en estos pesos ajustados, el universo total, correspondería a aquellos establecimientos de las cinco regiones que no poseen R-22, es decir, 631 establecimientos. Una vez realizado estos ajustes, se procedió a realizar las simulaciones por cada región.

Desde las Figura 7-7 hasta la Figura 7-16, se ilustra el comportamiento del logaritmo natural del banco, el cual presenta una distribución normal que respalda el supuesto de log-normalidad de los datos originales y las tasas de mantención para todas las regiones presentes en la muestra.


Figura 7-7 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría H, región Metropolitana

Fuente: Elaboración propia

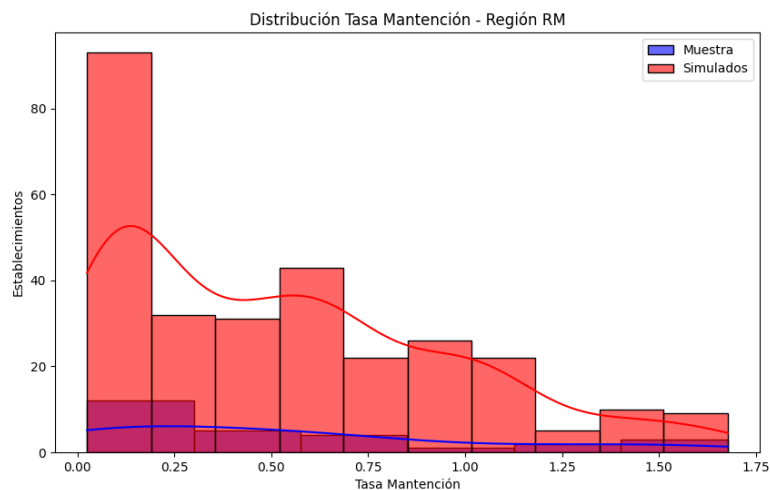


Figura 7-8 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantenimiento, Categoría H, región Metropolitana

Fuente: Elaboración propia

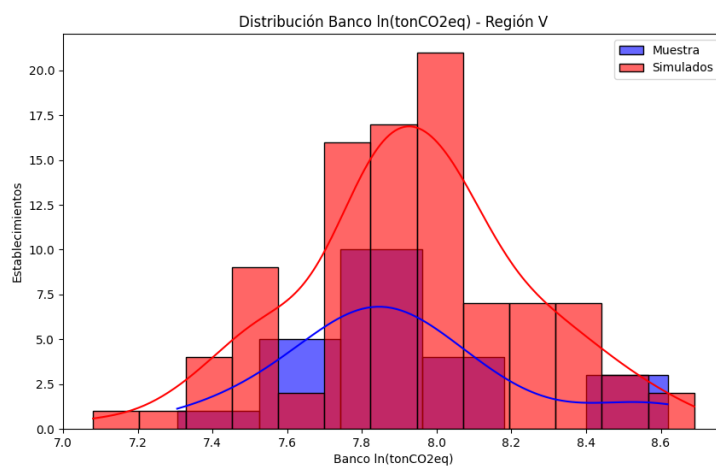


Figura 7-9 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría H, región de Valparaíso

Fuente: Elaboración propia

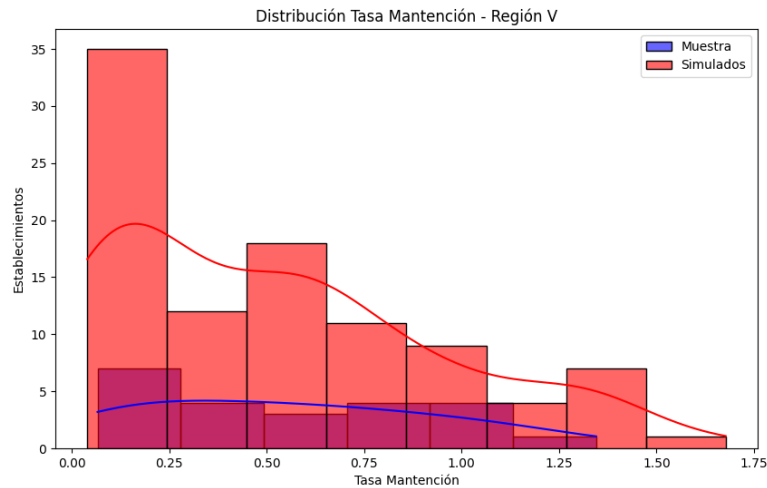


Figura 7-10 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantenimiento, Categoría H, región de Valparaíso

Fuente: Elaboración propia

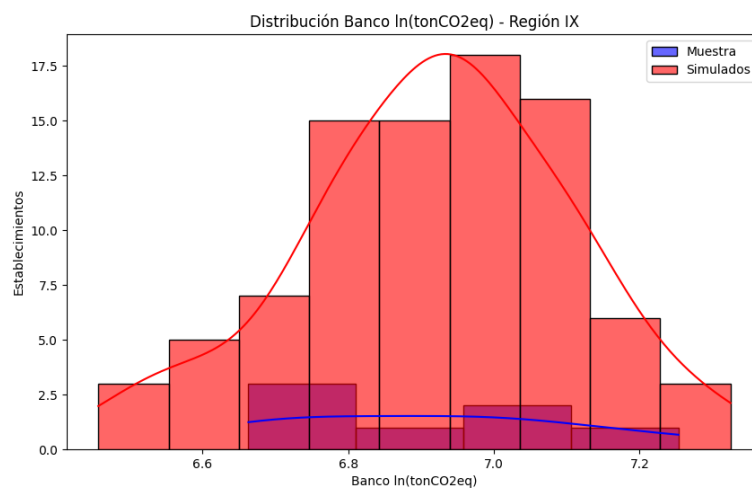


Figura 7-11 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría H, región de La Araucanía

Fuente: Elaboración propia

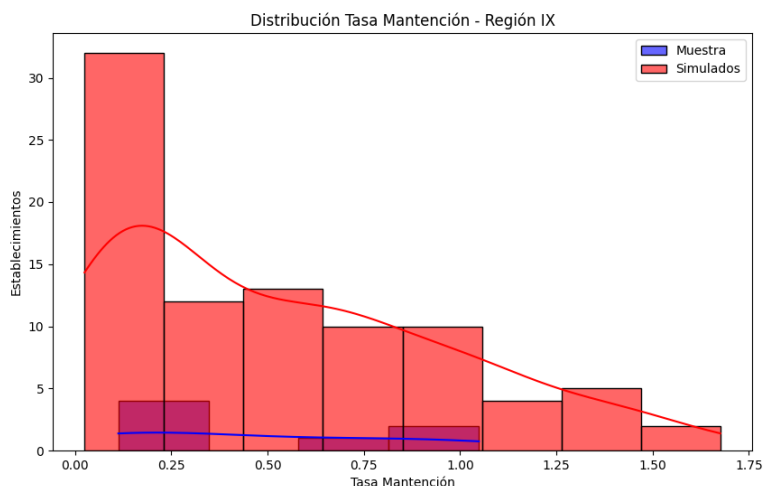


Figura 7-12 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantenimiento, Categoría H, región de La Araucanía
Fuente: Elaboración propia

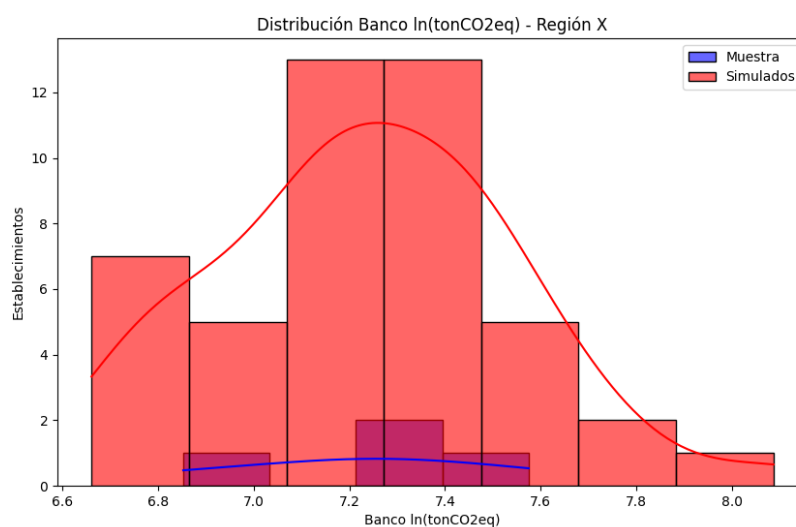


Figura 7-13 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría H, región de Los Lagos
Fuente: Elaboración propia

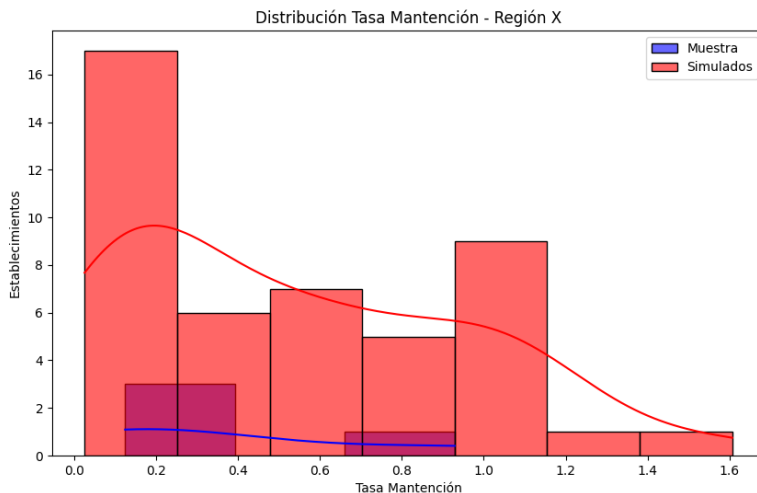


Figura 7-14 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantenimiento, Categoría H, región de Los Lagos

Fuente: Elaboración propia

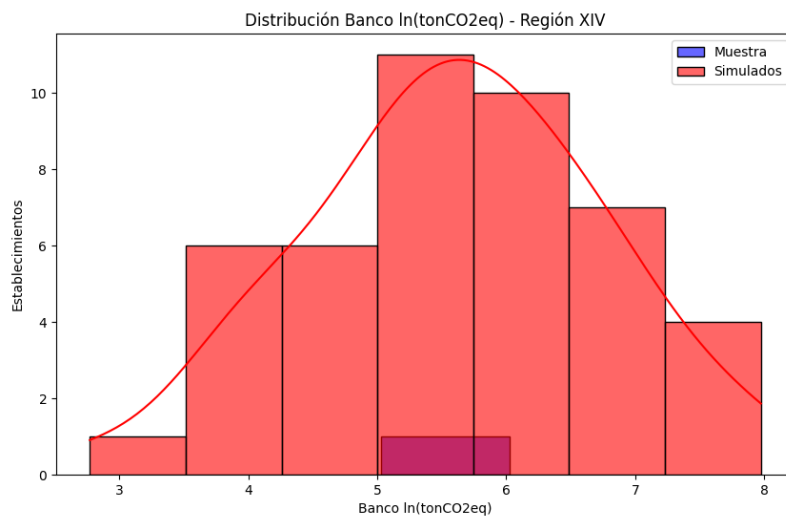


Figura 7-15 Distribución normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir del logaritmo natural del banco, Categoría H, región de Los Ríos

Fuente: Elaboración propia

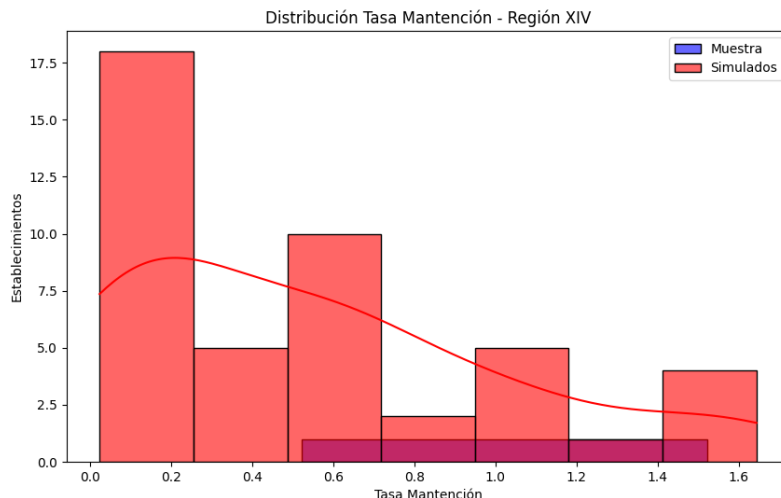


Figura 7-16 Distribución log normal de la muestra y los establecimientos simulados a partir de la tasa de mantenimiento, Categoría H, región de Los Ríos

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7-8 se presentan los estadísticos descriptivos, evidenciando una notable similitud en el comportamiento del banco entre los datos de la muestra y el universo simulado. Este resultado sugiere que la metodología implementada logra replicar adecuadamente las características generales de la muestra en el universo simulado. Sin embargo, es importante destacar que el nivel de error varía significativamente según la representatividad de cada región en la muestra.

Un caso particular se observa en la región de Los Ríos, donde únicamente se dispone de un dato en la muestra. Este escenario plantea un desafío importante, ya que, a pesar de ajustar su proporción para que represente mejor el comportamiento esperado en el universo, la limitación de contar con un solo dato impide calcular estadísticas clave, como la desviación estándar o la media.

Dado este contexto, las simulaciones para esta región se diseñan para comportarse de manera similar a las distribuciones observadas en las otras regiones con mayor representatividad. Este enfoque busca mitigar las limitaciones inherentes a la falta de datos en la muestra original de la región de Los Ríos, aunque es inevitable que esta situación introduzca cierto grado de incertidumbre en los resultados. En este sentido, el método aplicado no solo permite generar un universo simulado más completo, sino que proporciona también una herramienta valiosa para abordar problemas de subrepresentación en la muestra, siempre con la cautela necesaria respecto a las limitaciones y posibles sesgos derivados.

Tabla 7-8 Estadísticos de la muestra y establecimientos simulados, Categoría H

Región	Estadístico	Banco (tCO ₂ eq)		Tasa de mantención (%)	
		Muestra	Universo	Muestra	Muestra
Metropolitana	Media	1.457	1.510	0,54	0,53
	Desviación estándar	632	649	0,51	0,43
Valparaíso	Media	2.878	2.928	0,56	0,52
	Desviación estándar	1.039	902	0,38	0,42
La Araucanía	Media	1.020	1.027	0,46	0,53
	Desviación estándar	222	187	0,37	0,43
Los Lagos	Media	1.419	1.453	0,36	0,53
	Desviación estándar	410	474	0,38	0,42
Los Ríos	Media	251	482	1,02	0,54
	Desviación estándar	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

7.1.2 Clasificación de establecimientos según límites de emisión

A partir de la simulación presentada en la Sección 7.1.1 se obtiene establecimientos para representar la realidad nacional en cuanto a banco y tasa de mantención para las categorías A, C, D y H. Luego, se debe identificar para cada uno de ellos:

1. Si les aplican los límites de emisión definidos en la norma
2. Qué límite les aplica

En primer lugar, para determinar qué límite les aplica a cada establecimiento, se define como caso base lo propuesto en la Sección 6.2.2, donde se plantea que aplique un límite de emisión si su banco es mayor o igual a 650 tonCO₂eq. Con esto, se obtiene que en total serían 1.720 establecimientos afectados a los límites de emisión, como se muestra en la Tabla 7-9. Cabe mencionar que este límite de banco para el cual aplican los límites de emisión fue testeado con un análisis de sensibilidad, el cual se detalla en la Sección 7.5.

Tabla 7-9 Establecimientos a los que les aplican los límites de emisión

Categoría	Número de establecimientos a los que les aplican los límites de emisión
A	954
B	N/A
C	51
D	127
E	N/A
F	N/A
G	N/A
H	588
Total	1.720

N/A: No aplica.

Fuente: Elaboración propia

Una vez identificados los establecimientos afectados a los límites de emisión, se identifica en qué espacio de la norma se encuentra cada establecimiento como punto de partida, identificándose las alternativas que se muestran en la siguiente figura.

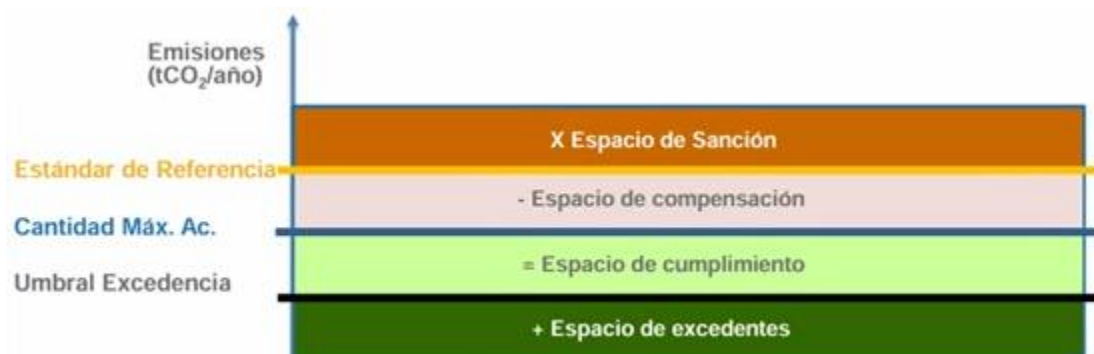


Figura 7-17 Espacios definidos según los límites de emisión propuestos

Fuente: Enviado por la contraparte técnica, a partir de LMCC

Para definir este punto de partida para cada establecimiento, se utilizan los valores de los límites de emisión se definen en la Tabla 6-6, Tabla 6-7, Tabla 6-9 y la Tabla 6-10. En particular, para el estándar de referencia se utiliza directamente el límite de la tasa de mantención —o de emisión—. Mientras que para comparar las emisiones de cada establecimiento con la cantidad máxima acumulada y el umbral de excedencia se utilizan como límite los valores de emisión estimados como cada tasa de emisión propuesta para la norma, respectivamente, multiplicada por el banco de cada establecimiento. De este modo, se identifica que la distribución de establecimientos obtenidos de la simulación, para cada escenario, es la presentada en la Tabla 7-10 y en complemento a en la Tabla 7-11 se presentan las emisiones en ktCO₂eq por categoría.

Tabla 7-10 Clasificación inicial de los establecimientos según los límites de emisión propuestos en cada escenario

Espacio	Escenario		
	Menos exigente	Intermedio	Más exigente
Sanción	437	559	756
Compensación	290	222	229
Cumplimiento	397	612	408
Excedentes	596	327	327
Total	1.720	1.720	1.720

Fuente: Elaboración propia

A partir de esta clasificación, se determina cuántas emisiones debe reducir cada establecimiento. Luego, para estimar el potencial de reducción de emisiones, se debe determinar cuánto debe reducir las emisiones cada establecimiento e identificar qué medidas de mitigación se pueden implementar para lograr dichas reducciones. Los antecedentes de eficiencia de reducción de cada medida de mitigación utilizados corresponden a los reportados en la Sección 5.2, donde también se identifica para cuáles refrigerantes instalados se puede aplicar cada medida. Con esta

información, se identifican todas las medidas que permitirían lograr la reducción requerida. Luego, se elige entre las alternativas posibles cuál es la más costo- efectiva, en cada caso. En la siguiente subsección se detalle el procedimiento seguido para seleccionar las medidas a ser aplicadas en cada establecimiento.

Tabla 7-11 Emisiones de los establecimientos según los límites de emisión propuestos en cada escenario

Categoría	Emisiones (ktCO ₂ eq)
A	1.710
C	37
D	99
H	497
Total	2.342

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que lo descrito en esta subsección, así como el análisis de costo por escenario, la estimación de beneficios, los análisis comparativos y análisis de sensibilidad se realizaron por medio de un modelo desarrollado en el *software* Analytica, el cual se entrega como anexo digital en el archivo “2024-NEHFC.ana”, junto con los archivos de entrada que este utiliza.

7.2 Análisis de costo por escenario

Para el análisis de costos, se utilizaron los resultados reportados por Purohit & Höglund-Isaksson, (2017) abordados en profundidad en la Sección 5.2, considerando únicamente los sectores de climatización comercial, refrigeración industrial y refrigeración comercial. Aunque las categorías descritas en dicho estudio no coinciden directamente con las establecidas en el presente informe, se identificaron equivalencias relevantes. En este contexto, el sector de climatización comercial se asocia a las categorías E, F y G; el sector de refrigeración industrial corresponde a las categorías A y B; y, por último, el sector de refrigeración comercial equivale a las categorías C, D y H.

De manera adicional a las medidas presentadas en la Sección 5.2, se evalúa como medida la **compra de bonos de HFC**. Estos se conceptualizan de manera similar a los bonos de carbono, como créditos de emisiones obtenidos en un establecimiento que puede ser vendido a otro establecimiento que quiera compensar sus emisiones, con la diferencia de que solo se pueden generar por medio de reducciones en la emisión de HFC —y no de otros GEI—. De este modo, la eficiencia de esta medida es 100%, dado que quien la utiliza puede comprar el 100% de las emisiones que debe reducir, mientras que su costo fue modelado con el valor de 10 USD/tCO₂eq. Dada la incertidumbre de este valor, asociado a una medida que actualmente no se encuentra operativa, este formó parte de los análisis de sensibilidad realizados, que se presentan en la Sección 7.5.

Otro aspecto relevante es la labor de fiscalización llevada a cabo principalmente por la SMA. En la Tabla 11-77 de los Anexos, se detallan estos costos, los cuales abarcan el registro de sistemas de refrigeración y las actividades relacionadas, como la conformación y mantenimiento de dichos registros. Además, se incluye la gestión de reportes en caso de fugas, donde la SMA recibe y revisa estos informes. Otra tarea fundamental es la verificación en terreno de los informes emitidos, lo que implica realizar un seguimiento directo a los establecimientos. Finalmente, se debe supervisar el cumplimiento de las medidas de compensación de emisiones con una frecuencia anual. Para las actividades de fiscalización de la SMA se tomó el supuesto de que se fiscalice el 5% de los establecimientos.

En la siguientes subsecciones se detalla el mecanismo de selección de medidas y los resultados de la estimación de costos por escenario.

7.2.1 Selección de medidas

Para seleccionar las medidas de abatimiento aplicadas en cada establecimiento, como se menciona en la Sección 7.1, se realiza una selección por costo eficiencia entre las medidas cuyas reducciones fuesen suficientes para el cumplimiento de los límites. Como se presentó en la Figura 7-17, para esta norma de emisión se definen tres límites de emisión que generan cuatro “espacios” para los establecimientos en base a esos límites, los que se describen en la Tabla 7-12.

Tabla 7-12 Descripción de los espacios asignados a los establecimientos a partir de los límites de emisión de la norma de emisión propuesta

Espacio asignado al establecimiento	Descripción	Acciones que debe tomar el establecimiento
Espacio de sanción	Establecimientos que superan el estándar de referencia definido por la norma de emisión.	Debe implementar medidas de reducción de emisiones, hasta alcanzar el estándar de emisiones de referencia.
Espacio de compensación	Establecimientos cuyas emisiones, en toneladas de dióxido de carbono equivalente, superan la cantidad máxima acumulada definida por la norma de emisión, sin superar el estándar de referencia.	Debe reducir sus emisiones, ya sea por medio de implementar medidas de reducción de emisiones, o por medio de la compensación de emisiones mediante la compra de bonos de HFC.
Espacio de cumplimiento	Establecimientos cuyas emisiones, en toneladas de dióxido de carbono equivalente, superan el umbral de excedencia, sin superar la cantidad máxima acumulada.	Se encuentra en cumplimiento de los límites de la norma. Puede no realizar acciones. También puede optar a reducir sus emisiones hasta encontrarse en el espacio de excedentes, para poder vender bonos de HFC.
Espacio de excedentes	Establecimientos cuyas emisiones, en toneladas de dióxido de carbono equivalente, son menores que el umbral de excedencia.	Se encuentra en cumplimiento de los límites de la norma. Puede vender bonos de HFC por la diferencia entre el umbral de excedencia y sus emisiones, dado que se generan excedentes en el cumplimiento de la norma de emisión.

Fuente: Elaboración propia

Dada las acciones que debe tomar cada establecimiento según el espacio que se le asigna, descrita en la tabla previa, se define un diagrama de flujo para la selección de medidas de cada establecimiento, el cual se presenta en la Figura 7-18. Los pasos a seguir para la selección de medidas son los siguientes:

1. Identificar el espacio inicial asignado a cada establecimiento.
2. Para los establecimientos en espacio de sanción, se identifican las medidas suficientes para la reducción requerida, ya sea de buenas prácticas o de recambio de refrigerantes, y se selecciona la de menor costo. No puede elegir compensar sus emisiones en este espacio. Según la eficiencia de la medida y las emisiones del establecimiento, este puede que se cambie al espacio de compensación, de cumplimiento o de excedentes.
3. Para los establecimientos en espacio de compensación, ya sea desde un inicio o luego de aplicar medidas en el espacio de sanción, se identifican las medidas cuya eficiencia permite la reducción de emisiones requerida, y se selecciona la medida más costo eficiente. La medida puede ser buenas prácticas, recambio de refrigerante o compra de bonos de HFC. Según la eficiencia de la medida y las emisiones del establecimiento, este puede que se cambie al espacio de cumplimiento o de excedentes.
4. Si un establecimiento, desde un comienzo o luego de aplicar medidas de reducción de emisiones, se encuentra en espacio de cumplimiento o de excedentes, no tiene la obligación de hacer medidas, pero tiene la oportunidad de hacerlo para vender bonos de HFC. Para esta decisión se evalúa si el costo de las medidas que puede aplicar es menor que el precio de la venta de bonos de HFC. En caso de que sí, se selecciona la medida que le genere mayores ingresos. Las medidas pueden ser buenas prácticas o recambio de refrigerantes, dado que deben generar una reducción en las emisiones de HFC. En el caso de los establecimientos en espacio de cumplimiento, la medida debe ser suficiente para que cambien al espacio de excedentes para que puedan vender bonos de HFC.
5. Finalmente, cabe destacar que los establecimientos que ya se encuentren en el espacio de excedentes pueden vender bonos de HFC sin necesidad de implementar medidas adicionales.

A partir del mecanismo descrito, se seleccionan las medidas a ser implementadas por cada establecimiento en cada escenario, de modo que se obtienen los costos de cada escenario y sus respectivas reducciones de emisiones. Esto se detalla en la siguiente subsección.

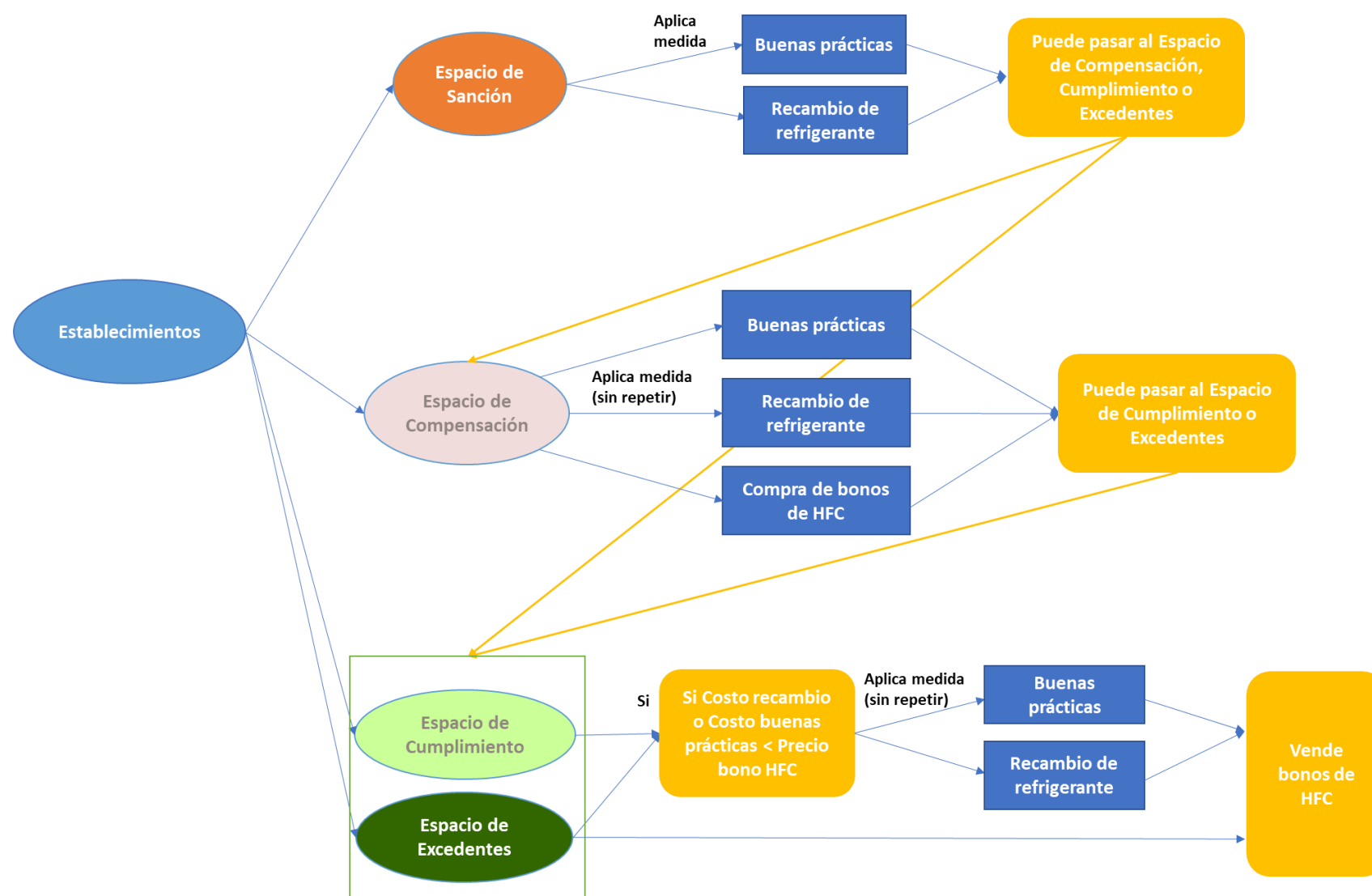


Figura 7-18 Diagrama de flujo de selección de medidas

Fuente: Elaboración propia

7.2.2 Resultados de costos por escenario

A continuación se detallan los resultados del modelo para la estimación de costos de cada escenario. Los resultados se presentan para un caso central, con el valor del banco para el cual aplican los límites de emisión mayor o igual a 650 ton CO₂ eq. y un precio de bono de carbono de 10 USD/tCO₂eq. Posteriormente, en la Sección 7.5, se realizan análisis de sensibilidad respecto de estos valores.

En las Tabla 7-13, Tabla 7-14 y Tabla 7-15 se presenta la evolución de establecimientos según los espacios definidos por los límites de los diferentes escenarios regulatorios propuestos en la Sección 6.2. Como se describió en la Sección 7.2.1, hay cuatro espacios de límites en los cuales puede ser clasificado un establecimiento: sanción, compensación cumplimiento y excedentes. En estas tablas se presenta el escenario inicial, sin medidas; luego cómo se redistribuyen entre los otros espacios al implementar medidas para salir del espacio de sanción; luego se presenta si hubo cambios por implementación de medidas en espacio de compensación y en el espacio de cumplimiento o de excedentes. Estas tablas consideran la cantidad de establecimientos en todas las categorías A, C, D y H. Cabe mencionar que si un establecimiento en espacio de compensación compra los bonos de HFC que requiere, no se considera que cambie de espacio, dado que no reduce sus emisiones si no que es otro establecimiento el que tiene bonos, de modo que no se ve modificado el espacio de compensación al que fue asignado.

En el escenario menos exigente, presentado en la Tabla 7-13, sin la implementación de medidas adicionales, 437 establecimientos caen dentro del espacio de sanción y 290 en el espacio de compensación. Al incorporar medidas de compensación o cumplimiento, los establecimientos en el espacio de sanción cambian y se distribuyen en los otros tres espacios disponibles, mayormente al espacio de excedentes. Luego se observa que no hay cambios por la implementación de medidas en el espacio de compensación, lo que muestra que los establecimientos en dicho espacio seleccionarían la compra de bonos de HFC y no medidas de reducción de emisiones, razón por la que no cambian de espacio. En cuando al impacto de las medidas en el espacio de cumplimiento o de excedentes, se observa que, una vez aplicadas las medidas, los establecimientos por espacio se mantienen, lo que implica que, a pesar de que se apliquen medidas, no les alcanza para cambiar de espacio de cumplimiento a excedentes. En este caso lo que ocurre es que los establecimientos que toman medidas ya se encontraban en el espacio de excedentes desde un comienzo. No hay establecimientos que cambien del espacio de cumplimiento al de excedentes por tomar medidas adicionales. Asimismo, el espacio de excedentes destaca como el más representativo en este escenario, alcanzando 899 establecimientos, un 52%, luego de la incorporación de medidas como buenas prácticas y recambio de refrigerante, reflejando una amplia capacidad de cumplimiento más allá de las exigencias mínimas.

Tabla 7-13 Evolución establecimientos por espacio, escenario menos exigente

Espacio de límites	Escenario menos exigente			
	Sin medidas	Con medidas espacio sanción	Con medidas espacio compensación	Con medidas espacio cumplimiento o excedentes
Sanción	437	0	0	0
Compensación	290	388	388	388
Cumplimiento	397	433	433	433
Excedentes	596	899	899	899
Total	1.720	1.720	1.720	1.720

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7-14 presenta el escenario intermedio en donde es posible apreciar que el espacio de sanción comienza con 559 establecimientos antes de la aplicación de medidas, comparado con los 437 del escenario menos exigente. Este aumento implica que más establecimientos enfrentan la obligación de implementar medidas de reducción de emisiones. Sin embargo, como en el escenario anterior, la implementación de medidas permite redistribuir los establecimientos hacia los otros espacios. A su vez, se observa una menor proporción de establecimientos en espacio de excedentes desde un inicio. Al igual que en el caso del escenario de menor exigencia, no se observan cambios en los espacios por implementación de medidas en espacio de compensación, cumplimientos o excedentes.

Tabla 7-14 Evolución establecimientos por espacio, escenario intermedio

Espacio de límites	Escenario intermedio			
	Sin medidas	Con medidas espacio sanción	Con medidas espacio compensación	Con medidas espacio cumplimiento o excedentes
Sanción	559	0	0	0
Compensación	222	322	322	322
Cumplimiento	612	692	692	692
Excedentes	327	706	706	706
Total	1.720	1.720	1.720	1.720

Fuente: Elaboración propia

Por último, el escenario más exigente que se muestra en la Tabla 7-15, presenta un desafío mayor, con 756 establecimientos inicialmente en el espacio de sanción, el número más alto entre los tres escenarios, lo que es coherente que, al aumentar el nivel de exigencia, más establecimientos entran en sanción. Tras la aplicación de medidas, el espacio de sanción nuevamente se reduce a cero, mientras que los espacios de compensación y cumplimiento aumentan a 381 y 514 establecimientos, respectivamente, y es el espacio de excedentes el que muestra el mayor crecimiento, alcanzando 825 establecimientos. Este comportamiento sugiere que, aunque el escenario es más restrictivo, las medidas adoptadas por los establecimientos resultan efectivas para lograr el cumplimiento e incluso reducir aún más las emisiones.

Tabla 7-15 Evolución establecimientos por espacio, escenario más exigente

Espacio de límites	Escenario más exigente			
	Sin medidas	Con medidas espacio sanción	Con medidas espacio compensación	Con medidas espacio cumplimiento o excedentes
Sanción	756	0	0	0
Compensación	229	381	381	381
Cumplimiento	408	514	514	514
Excedentes	327	825	825	825
Total	1.720	1.720	1.720	1.720

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 7-16, Tabla 7-17 y Tabla 7-18 se detalla la cantidad de establecimientos que optan por cada medida de reducción, agrupadas según se si son medidas por estar sobre el estándar de referencia de emisiones, sobre la cantidad máxima acumulada o si son para vender bonos de HFC bajo el umbral de excedentes. Lo anterior permite evaluar las elecciones de medidas seleccionadas por los establecimientos bajo los tres escenarios propuestos.

La Tabla 7-16 muestra el escenario menos exigente, en donde 437 establecimientos seleccionan medidas por estar sobre el estándar de referencia, destacando el uso de HFC-152a por parte de 349 establecimientos, el 80% del total. Esto indica una preferencia por esta alternativa debido a que puede reemplazar con una alta eficiencia de reducción a refrigerantes utilizados en las cuatro categorías como el R-507A y el R-404A. Por otro lado, 88 establecimientos optan por implementar la medida de buenas prácticas, alternativa menos disruptiva que logra por un menor costo, reducciones que pueden ser suficientes para salir del espacio de sanción. La compra de bonos es la única medida seleccionada sobre la cantidad máxima, con 388 establecimientos seleccionando esta opción en el espacio de compensación. Son 307 los establecimientos que seleccionan medidas para poder vender las reducciones como excedentes.

Tabla 7-16 Cantidad de establecimiento que seleccionan medidas, escenario menos exigente

Medida	Escenario menos exigente		
	Estándar de referencia de emisiones	Cantidad máxima acumulada	Umbral de excedentes
HFC-152a	349	0	0
HFC-32	0	0	0
HFO-1234yf	0	0	0
CO₂ transcrito	0	0	0
Hidrocarburo	0	0	0
R-717	0	0	0
Buenas prácticas	88	0	307
Compra bono	0	388	0
Total	437	388	307

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 7-17, que refleja el comportamiento de los establecimientos en el escenario intermedio, en el espacio sobre el estándar de referencia la medida predominante

continúa siendo el uso de HFC-152a, seleccionado por 459 establecimientos, lo que equivale al 82,1% del total. Esto reafirma la costo-eficiencia de esta sustancia como alternativa principal para el cumplimiento, siendo la segunda alternativa seleccionada la de buenas prácticas. En el espacio sobre la cantidad máxima acumulada, 322 establecimientos eligen la compra de bonos, es decir, al igual que en el espacio menos exigente, el 100% en este espacio. Por último, 107 establecimientos seleccionan medidas de buenas prácticas en el espacio relativo al umbral de excedentes, como medida adicional para poder vender bonos de HFC.

Tabla 7-17 Cantidad de establecimiento que seleccionan medidas, escenario intermedio

Medida	Escenario intermedio		
	Estándar de referencia de emisiones	Cantidad máxima acumulada	Umbral de excedentes
HFC-152a	459	0	0
HFC-32	0	0	0
HFO-1234yf	0	0	0
CO ₂ transcrito	0	0	0
Hidrocarburo	2	0	0
R-717	0	0	0
Buenas prácticas	99	0	107
Compra bono	0	322	0
Total	559	322	107

Fuente: Elaboración propia

El escenario más exigente reflejado en la Tabla 7-18, con 756 establecimientos sobre el estándar de referencia, presenta 584 establecimientos seleccionando el recambio por HFC-152a, es decir, un 77,2%. Este resultado subraya la relevancia de este refrigerante para el cumplimiento, incluso bajo los escenarios más estrictos. Además, aparece por primera vez el uso de hidrocarburos como medida de recambio, seleccionado para 10 establecimientos, aunque sigue siendo una opción minoritaria, y se mantiene la selección de buenas prácticas, para 162 establecimientos. La compra de bonos, elegida por 381 establecimientos, sigue siendo una medida clave, nuevamente la única seleccionada en el espacio sobre la cantidad máxima. Finalmente, 107 establecimientos optan por buenas prácticas, para vender bonos de HFC bajo el umbral de excedentes.

Tabla 7-18 Cantidad de establecimiento que seleccionan medidas, escenario más exigente

Medida	Escenario intermedio		
	Estándar de referencia de emisiones	Cantidad máxima acumulada	Umbral de excedentes
HFC-152a	584	0	0
HFC-32	0	0	0
HFO-1234yf	0	0	0
CO ₂ transcrito	0	0	0
Hidrocarburo	10	0	0
R-717	0	0	0
Buenas prácticas	162	0	107
Compra bono	0	381	0
Total	756	381	107

Fuente: Elaboración propia

Las Tabla 7-19, Tabla 7-20 y Tabla 7-21 muestran las emisiones en ktCO₂ eq. en distintos escenarios de exigencia, diferenciados por cada categoría y por los espacios de medidas implementadas: sanción, compensación, y cumplimiento o excedentes. Es decir, se muestra la evolución en la reducción de las emisiones debido a la selección de medidas de reducción en cada espacio.

La Tabla 7-19 refleja las emisiones y reducciones para el escenario menos exigente. Es posible apreciar que estas se reducen de 2.342 ktCO₂ eq. —sin medidas— a 1.374 ktCO₂ eq. al aplicar las medidas en el espacio de sanción y en el espacio de cumplimiento o excedentes. Esto representa una disminución total del 41% respecto al escenario sin medidas. La categoría A es la que más contribuye a las emisiones, iniciando con 1.710 ktCO₂ eq., lo que equivale al 73% del total. Sin embargo, con las medidas implementadas, esta categoría logra reducir sus emisiones en un 35%, alcanzando 1.112 ktCO₂ eq. Por su parte, las categorías C y D tienen aportes menores al total (37 y 99 ktCO₂ eq. respectivamente) y presentan reducciones de entre el 35% y 39%, mostrando un impacto más limitado pero constante. Finalmente, la categoría H, que comienza con 497 ktCO₂ eq., logra una reducción significativa del 64%, alcanzando 177 ktCO₂ eq. Este dato destaca la efectividad de las medidas en esta categoría. En complemento, es posible apreciar que las reducciones se producen solamente en el espacio de sanción y cumplimiento o excedentes, sumando un total 892 ktCO₂eq y 76 ktCO₂eq respectivamente.

Tabla 7-19 Emisiones y reducciones en ktCO₂ eq., escenario menos exigente

Escenario menos exigente								
Categoría	Emisiones				Reducciones			
	Sin medidas	Con medidas espacio sanción	Con medidas espacio compensación	Con medidas espacio cumplimiento o excedentes	Sin medidas	Con medidas espacio sanción	Con medidas espacio compensación	Con medidas espacio cumplimiento o excedentes
A	1.710	1.188	1.188	1.112	-	-522	-	-76
C	37	24	24	24	-	-13	-	-
D	99	61	61	61	-	-38	-	-
H	497	177	177	177	-	-320	-	-
Total	2.342	1.450	1.450	1.374	-	-892	-	-76

Fuente: Elaboración propia

El escenario intermedio presentado en la Tabla 7-20, muestra una mayor reducción de emisiones, alcanzando un total de 1.269 ktCO₂ eq., lo que representa una disminución del 46% en comparación con el escenario sin medidas. Nuevamente, la categoría A sigue siendo la mayor contribuyente, con una reducción más pronunciada que en el escenario anterior. Las emisiones pasan de 1.710 ktCO₂ eq. a 1.069 ktCO₂ eq., logrando un descenso del 37%. En las categorías C y D, las reducciones son similares, alcanzando 21 ktCO₂ eq. y 50 ktCO₂ eq., respectivamente. Esto equivale a disminuciones del 43% en la categoría C y del 49% en la categoría D. En el caso de la categoría H, las emisiones se reducen en un 74%, pasando de 497 ktCO₂ eq. a 129 ktCO₂ eq. Este patrón refuerza lo observado en el escenario menos exigente, donde las medidas tienen un impacto muy significativo en esta categoría. También es posible notar en la misma tabla ya

mencionada, que al igual que el escenario menos exigente las reducciones se producen solamente en el espacio de sanción y cumplimiento o excedentes, sumando un total 1.072 ktCO₂eq y 14 ktCO₂eq respectivamente

Tabla 7-20 Emisiones y reducciones en ktCO₂ eq., escenario intermedio

Categoría	Escenario intermedio							
	Emisiones				Reducciones			
	Sin medidas	Con medidas espacio sanción	Con medidas espacio compensación	Con medidas espacio cumplimiento o excedentes	Sin medidas	Con medidas espacio sanción	Con medidas espacio compensación	Con medidas espacio cumplimiento o excedentes
A	1.710	1.069	1.069	1.056	-	-640	-	-14
C	37	21	21	21	-	-16	-	-
D	99	50	50	50	-	-49	-	-
H	497	129	129	129	-	-367	-	-
Total	2.342	1.269	1.269	1.256	-	-1.072	-	-14

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Tabla 7-21, que muestra el escenario más exigente, se alcanzan las reducciones más significativas, con emisiones totales de 1.020 ktCO₂ eq., lo que representa una disminución del 56% respecto al escenario sin medidas. La categoría A reduce sus emisiones en un 50%, alcanzando 853 ktCO₂ eq. desde los 1.710 ktCO₂ eq. iniciales. Las categorías C y D experimentan disminuciones del 54% y 57%, alcanzando niveles muy bajos de emisiones finales con 17 ktCO₂ eq. y 43 ktCO₂ eq. respectivamente. La categoría H logra reducir sus emisiones en un 79% y alcanzando un mínimo de 106 ktCO₂ eq. Este escenario subraya la efectividad de medidas más exigentes para lograr reducciones significativas y consistentes en todas las categorías, especialmente en aquellas de mayor contribución. Respecto a las reducciones, se aprecia que para medidas con espacio sanción, se produce una reducción de 1.322 ktCO₂eq y para espacio cumplimiento o excedentes se replica lo misma reducción del escenario intermedio, es decir, 14 ktCO₂eq.

Tabla 7-21 Emisiones y reducciones en ktCO₂ eq., escenario más exigente

Categoría	Emisiones				Reducciones			
	Sin medidas	Con medidas espacio sanción	Con medidas espacio compensación	Con medidas espacio cumplimiento o excedentes	Sin medidas	Con medidas espacio sanción	Con medidas espacio compensación	Con medidas espacio cumplimiento o excedentes
A	1.710	853	853	840	-	-856	-	-14
C	37	17	17	17	-	-19	-	-
D	99	43	43	43	-	-56	-	-
H	497	106	106	106	-	-391	-	-
Total	2.342	1.020	1.020	1.006	-	-1.322	-	-14

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la Tabla 7-22, se aprecian las reducciones anuales por categoría también reflejan diferencias importantes entre los escenarios. La categoría A es la que concentra la mayor

proporción de reducciones pasando de 598 ktCO₂eq/año en el escenario menos exigente a 870 ktCO₂eq/año en el más exigente. Este incremento en las reducciones indica que las medidas asociadas a esta categoría son particularmente sensibles a los cambios en las exigencias normativas. Por su parte, las categorías D y H también registran aumentos importantes en las reducciones, aunque en menor magnitud que la categoría A. La categoría C, en cambio, presenta las reducciones más bajas, oscilando entre 13 ktCO₂eq/año y 19 ktCO₂eq/año, lo que sugiere una menor necesidad de inversión para cumplir con las normativas, independientemente del nivel de exigencia.

En términos de reducciones totales por categoría, el escenario menos exigente presenta un valor de 968 ktCO₂eq/año, el intermedio asciende a 1.086 ktCO₂eq/año y el más exigente alcanza los 1.335 ktCO₂eq/año. Este incremento progresivo se debe principalmente a las mayores inversiones requeridas por las categorías A y H, que juntas representan una proporción significativa del total.

Tabla 7-22 Reducciones anuales de emisiones en ktonCO₂eq/año, según categorías

Categoría	Escenario menos exigente	Escenario intermedio	Escenario más exigente
A	598	654	870
C	13	16	19
D	38	49	56
H	320	367	391
Total	968	1.086	1.335

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7-23 presenta un análisis de la oferta y la demanda de créditos de carbono en ktCO₂ eq. bajo los tres escenarios de exigencia para las categorías A, C, D y H. En ella se muestra el balance resultante entre la oferta de créditos generados y la demanda requerida en cada caso. Esta tabla presenta toda la oferta de créditos, de los establecimientos en el espacio de excedentes. De modo que los valores de oferta son mayores a la reducción por medidas en el espacio de cumplimiento o excedentes debido a que incluye los créditos de establecimientos que no necesariamente hicieron medidas adicionales.

Respecto al escenario menos exigente, la oferta total de créditos alcanza 405 ktCO₂ eq., mientras que la demanda total es de 146 ktCO₂ eq., resultando en un excedente neto de 259 ktCO₂ eq. La categoría A es la principal contribuyente tanto a la demanda como a la oferta de créditos, con una demanda de 122 ktCO₂ eq. y una oferta de 304 ktCO₂ eq., generando un superávit de 182 ktCO₂ eq. Este resultado resalta la capacidad de esta categoría para compensar ampliamente su propia demanda e incluso proporcionar créditos excedentarios al mercado.

En la categoría H, se observa un balance positivo significativo, con una oferta de 93 ktCO₂ eq. frente a una demanda de 17 ktCO₂ eq., dejando un excedente de 76 ktCO₂ eq. Esto indica que esta categoría tiene un papel clave como proveedor neto de créditos. Por el contrario, las categorías C y D tienen balances totales mucho menores, con excedentes de 1 ktCO₂ eq. y 0

ktCO₂ eq., respectivamente. Esto refleja su menor participación en la generación y el uso de créditos en este escenario.

En el escenario intermedio, la oferta de créditos disminuye a 148 ktCO₂ eq., mientras que la demanda también se reduce a 104 ktCO₂ eq., resultando en un excedente neto más reducido de 45 ktCO₂ eq. La categoría A sigue siendo la principal participante, pero con un superávit mucho menor de 22 ktCO₂ eq. debido a una oferta de créditos significativamente más baja en comparación con el escenario menos exigente. En la categoría H, el balance también se reduce respecto al escenario menos exigente, con un excedente neto de 26 ktCO₂ eq., derivado de una oferta de 32 ktCO₂ eq. y una demanda de 6 ktCO₂ eq. Por último, las categorías C y D presentan balances negativos, con déficits de 1 ktCO₂ eq. y 2 ktCO₂ eq., respectivamente.

Finalmente, el escenario más exigente, se traduce en una oferta total de créditos de 173 ktCO₂ eq. frente a una demanda total de 81 ktCO₂ eq., generando un excedente neto de 91 ktCO₂ eq. La categoría A sigue liderando el balance total, con un superávit de 61 ktCO₂ eq., aunque su oferta de créditos es considerablemente menor que en los escenarios previos. La categoría H, a pesar de la mayor exigencia, logra mantener un balance positivo de 33 ktCO₂ eq., indicando su resiliencia como proveedor neto de créditos. Al igual que el escenario intermedio, las categorías C y D muestran déficits marginales, en este caso de 1 ktCO₂ eq., reflejando su limitada capacidad para generar créditos bajo mayores exigencias.

En esta Tabla 7-23 se observa que la oferta logra satisfacer la demanda de créditos. Esto se podría ver más ajustado si se eleva el límite de banco de los establecimientos a los que aplican los límites de emisión.

Tabla 7-23 Oferta y demanda de créditos en ktCO₂ eq., por categoría y escenario

Categoría	Escenario menos exigente			Escenario intermedio			Escenario más exigente		
	Demanda	Oferta créditos	Total	Demanda	Oferta créditos	Total	Demanda	Oferta créditos	Total
A	-122	304	182	-93	115	22	-75	136	61
C	-2	3	1	-1	0	-1	-1	0	-0*
D	-6	6	-0	-3	1	-2	-2	1	-1
H	-17	93	77	-6	32	26	-4	36	33
Total	-146	405	259	-104	148	45	-81	173	93

*En la tabla no se reflejan los decimales.

Fuente: Elaboración propia

En las Tabla 7-24, Tabla 7-25 y Tabla 7-26 se presentan los costos asociados a las medidas implementadas bajo los tres escenarios. Los costos se desglosan en CAPEX (costos de inversión) y OPEX (costos de operación/mantenimiento) y se agrupan según el tipo de medida aplicada.

En el escenario menos exigente mostrado en la Tabla 7-24, los costos totales ascienden a 690 mil UF, desglosados en un CAPEX de 946 mil UF y un OPEX de -256 mil UF, lo que significa que las

medidas operativas generan ahorros netos importantes. El CAPEX está asociado únicamente al estándar de emisiones de referencia, representando una inversión considerable pero esencial para implementar las medidas para salir del espacio de sanción. El OPEX incluye un ahorro importante de 630 mil UF bajo el estándar de emisiones de referencia, que es parcialmente contrarrestado por costos operativos asociados a la cantidad máxima con 38 mil UF y el umbral con 336 mil UF. Estos costos operativos reflejan un impacto menor comparado con el ahorro total.

Tabla 7-24 Costos por medidas implementadas, escenario menos exigente en miles de UF

Tipo de costo	Escenario menos exigente			
	Estándar de emisiones de referencia	Cantidad máxima	Umbral	Total
CAPEX	946	-	-	946
OPEX	-630	38	336	-256
Total	316	38	336	690

Fuente: Elaboración propia

En el escenario intermedio, presentado en la Tabla 7-25, los costos totales se reducen ligeramente a 589 mil UF, con un CAPEX de 1.286 miles de UF y un OPEX neto de -696 mil UF. El CAPEX aumenta respecto al escenario menos exigente, reflejando mayores inversiones en infraestructura y tecnología necesarias para cumplir con las regulaciones más estrictas. El OPEX muestra un ahorro neto aún más pronunciado de -856 mil UF bajo el estándar de emisiones de referencia, aunque los costos operativos asociados a la cantidad máxima (27 mil UF) y el umbral (133 mil UF) son menores que en el escenario anterior.

Tabla 7-25 Costos por medidas implementadas, escenario intermedio en miles de UF

Tipo de costo	Escenario intermedio			
	Estándar de emisiones de referencia	Cantidad máxima	Umbral	Total
CAPEX	1.286	-	-	1.286
OPEX	-856	27	133	-696
Total	430	27	133	589

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7-26 muestra el escenario más exigente, en el que se observa un aumento en los costos totales, alcanzando 808 mil UF, con un CAPEX de 1.838 mil UF y un OPEX neto de -1.031 mil UF. El CAPEX es el más alto entre los tres escenarios, reflejando el esfuerzo de inversión requerido para cumplir con los estándares regulatorios más estrictos. El OPEX genera ahorros significativos -1.184 mil UF bajo el estándar de referencia, mientras que los costos operativos asociados a la cantidad máxima son 21.000 UF y el umbral de 133.000 UF. Los que se mantienen constantes en comparación con el escenario intermedio.

Tabla 7-26 Costos por medidas implementadas, escenario más exigente en miles de UF

Tipo de costo	Escenario más exigente			
	Estándar de emisiones de referencia	Cantidad máxima	Umbral	Total
CAPEX	1.839	-	-	1.838
OPEX	-1.184	21	133	-1.031
Total	654	21	133	808

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7-27 muestra los costos asociados a la implementación de la norma en miles de UF, desglosados por tipo de costo: CAPEX, OPEX, monitoreo y verificación, en tres escenarios de exigencia.

En términos generales, los costos de inversión en capital aumentan progresivamente con el nivel de exigencia del escenario, pasando de 946 mil UF en el escenario menos exigente a 1.839 miles de UF en el más exigente. Este incremento refleja la necesidad de mayores inversiones en infraestructura y tecnología para cumplir con normativas más estrictas. En contraste, los costos operativos generan ahorros cada vez mayores en escenarios más exigentes, con un ahorro máximo de -1.031 mil UF en el escenario más estricto. Este comportamiento sugiere que las medidas implementadas no solo buscan la reducción de emisiones, sino también optimizar la eficiencia operativa a largo plazo.

Los costos asociados al monitoreo y la verificación, constantes en todos los escenarios con valores de 683 mil UF y 117 mil UF respectivamente, representan una inversión clave para garantizar la supervisión y el cumplimiento de las medidas adoptadas. Aunque estos valores no varían según el nivel de exigencia, dado que o son fijos o dependen de la cantidad de establecimientos afectos a la norma, su impacto en el costo total es significativo, especialmente en el escenario menos exigente, donde representan una mayor proporción relativa.

El costo total de la norma sigue una varía dependiendo del escenario. En el escenario menos exigente, el costo asciende a 1.490 mil UF, mientras que en el escenario intermedio disminuye a 1.389 mil UF, destacándose como el más costo-efectivo. Esto se debe a que se logra un ahorro en operación mayor al aumento en costos de inversión que se requiere en este escenario. En el escenario más exigente, el costo total aumenta nuevamente a 1.607 mil UF debido al incremento significativo en CAPEX, que supera los ahorros generados por OPEX.

Tabla 7-27 Costos norma en miles de UF, según tipo de costo

Tipo de costo	Escenario menos exigente	Escenario intermedio	Escenario más exigente
CAPEX	946	1.286	1.839
OPEX	-256	-696	-1.031
Monitoreo	683	683	683
Verificación	117	117	117
Total	1.490	1.389	1.607

Fuente: Elaboración propia

7.3 Identificación y cuantificación de beneficios

La implementación de la norma propuesta generará beneficios significativos tanto para la población como para los sectores regulados. Entre estos beneficios se incluye la mitigación de los efectos adversos del cambio climático y la contribución al cumplimiento de los compromisos internacionales de reducción de emisiones de GEI. Además, se identifican co-beneficios directos para los titulares de las fuentes reguladas, como el acceso a tecnologías más eficientes, la reducción de costos operativos a largo plazo, el fortalecimiento de su reputación ambiental y desincentiva nuevas inversiones con tecnologías que utilicen solo refrigerantes con un alto PCG. Adicionalmente, se identifica la reducción en el consumo energético derivado del recambio de refrigerante en ciertas combinaciones²³.

La Tabla 7-28 presenta un análisis detallado de los costos y beneficios escenarios planteados para la implementación de medidas de mitigación de emisiones, abordando los costos totales, los beneficios derivados del precio social del carbono y las razones costo-beneficio.

El escenario menos exigente tiene un costo total de 1.490 mil UF, que disminuye ligeramente en el escenario intermedio a 1.389 mil UF, para luego incrementarse a 1.607 mil UF en el escenario más exigente. Este comportamiento refleja que el escenario intermedio optimiza los costos sin sacrificar significativamente los beneficios asociados.

Los beneficios directos calculados a partir del precio social del carbono aumentan progresivamente con el nivel de exigencia. En el escenario menos exigente, los beneficios ascienden a 10.778 miles de UF, incrementándose a 12.094 miles de UF en el escenario intermedio y alcanzando su máximo en el escenario más exigente con 14.870 miles de UF. Este crecimiento está vinculado a la mayor cantidad de emisiones mitigadas en los escenarios más estrictos.

La diferencia entre beneficios y costos también sigue una tendencia positiva. En el escenario menos exigente, la diferencia es de 9.288 miles de UF, en el intermedio aumenta a 10.704 miles de UF y en el más exigente alcanza 13.263 miles de UF. Este comportamiento indica que los escenarios más estrictos no solo son más efectivos en términos de reducción de emisiones, sino también más rentables en términos netos, pese a sus mayores costos totales.

Finalmente, la razón beneficio-costos destaca la eficiencia económica de las medidas en cada escenario. El escenario menos exigente presenta una relación de 7,2, lo que significa que por cada unidad monetaria invertida se obtienen 7,2 unidades de beneficio. Esta relación mejora en el escenario intermedio con un valor de 8,7 y alcanza su máximo en el escenario más exigente

²³ Si bien se estimó este co-beneficio, el valor es tan pequeño en comparación a los otros montos, que se decidió no incorporarlo al informe. Sí se encuentra estimado en el modelo entregado como anexo digital.

con 9,3. Este indicador refleja que las medidas son progresivamente más eficientes en escenarios más estrictos, justificando el aumento en costos a la luz de los beneficios obtenidos.

Tabla 7-28 Costos beneficios en miles UF

Escenarios	Escenario menos exigente	Escenario intermedio	Escenario más exigente
Costo total	1.490	1.389	1.607
Beneficio directo por precio social del carbono	10.778	12.094	14.870
Diferencia beneficio - costo	9.288	10.704	13.263
Razón beneficio - costo	7,2	8,7	9,3

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7-29 muestra la efectividad de los costos en función de las emisiones reducidas, medida en USD/tonCO₂eq. En esta tabla se observa que el costo efectividad disminuye ligeramente en los escenarios más exigentes. En el escenario menos exigente, el costo por tonelada mitigada es de 13,0 USD, mientras que en los escenarios intermedio y más exigente este costo baja a 12,5 USD por tonelada. Este resultado indica que, aunque el escenario más exigente requiere mayores inversiones totales, es capaz de mitigar una mayor cantidad de emisiones, de manera que se obtiene una costo efectividad muy pareja entre escenarios.

Tabla 7-29 Costos efectividad USD/tCO₂eq

Escenarios	Escenario menos exigente	Escenario intermedio	Escenario más exigente
Costo efectividad (USD/ton CO₂eq)	13,0	12,5	12,5

Fuente: Elaboración propia

7.4 Análisis comparativo

El análisis de los tres escenarios permite observar cómo varían los costos, beneficios y la eficiencia económica en función de la rigurosidad de las medidas implementadas. Este ejercicio facilita identificar cuál de los enfoques ofrece un mejor balance entre inversión y resultados ambientales.

Respecto a los costos totales, estos muestran un comportamiento no lineal entre los escenarios. En el escenario menos exigente, el costo total asciende a 1.490 mil UF. En el intermedio, este valor desciende ligeramente a 1.389 mil UF, lo que lo posiciona como el escenario más económico. Sin embargo, en el escenario más exigente, el costo aumenta a 1.607 mil UF. Este patrón sugiere que, aunque los costos se incrementan en los escenarios más ambiciosos, el escenario intermedio logra optimizar la inversión al ofrecer una reducción de emisiones significativa con un gasto moderado, gracias a los ahorros en costos de operación y mantención.

Al abordar los beneficios derivados del precio social del carbono, existe una progresión clara a medida que aumenta el nivel de exigencia. El escenario menos exigente genera beneficios de 10.778 mil UF, mientras que el intermedio alcanza 12.094 mil UF y el más exigente, 14.870 mil UF. Este aumento está directamente relacionado con la cantidad de emisiones mitigadas, lo que refuerza el impacto positivo de implementar regulaciones más estrictas. A medida que las exigencias aumentan, los beneficios superan ampliamente los costos, consolidando estos escenarios como ambientalmente efectivos y económicamente rentables.

La diferencia entre beneficios y costos totales resalta el impacto neto de cada escenario. En el escenario menos exigente, esta diferencia es de 9.288 mil UF. En el escenario intermedio, aumenta a 10.704 miles de UF, y en el más exigente, llega a 13.263 miles de UF. Este comportamiento demuestra que los escenarios más rigurosos no solo generan mayores beneficios, sino que también incrementan de manera significativa la rentabilidad neta. Aunque el escenario más exigente implica un mayor costo, su impacto positivo es proporcionalmente superior, lo que lo convierte en la opción más ventajosa desde una perspectiva económica total.

La relación beneficio-costos es otro indicador clave en la comparación. En el escenario menos exigente, esta relación es de 7,2; es decir, por cada unidad monetaria invertida se obtienen 7,2 unidades de beneficio. En el escenario intermedio, esta cifra aumenta a 8,7, y en el más exigente llega a 9,3. Este crecimiento continuo evidencia que los escenarios más ambiciosos no solo son ambientalmente más efectivos, sino también más eficientes desde un punto de vista económico. La mejora en esta relación respalda la implementación de medidas más estrictas como una estrategia óptima para maximizar el retorno sobre la inversión.

En complemento, el análisis del costo-efectividad, medido en USD/tonCO₂eq, refleja una optimización en los escenarios más estrictos. En el escenario menos exigente, el costo por tonelada es de 13 USD, mientras que en los escenarios intermedio y más exigente disminuye a 12,5 USD por tonelada. Esto demuestra que, aunque los costos absolutos aumenten, la capacidad de mitigar una mayor cantidad de emisiones en los escenarios más estrictos permite reducir el costo relativo por unidad de carbono reducido.

Por último, la reducción de emisiones es un aspecto central en la comparación. En el escenario menos exigente, las emisiones totales se reducen a 1.374 ktCO₂eq, mientras que en el intermedio disminuyen a 1.269 ktCO₂eq. En el escenario más exigente, las emisiones alcanzan su mínimo con 1.020 ktCO₂eq. Estos resultados confirman que las medidas más rigurosas generan un mayor impacto en términos de mitigación climática, contribuyendo de manera más significativa al cumplimiento de los objetivos ambientales.

7.5 Análisis de sensibilidad

Realizar un análisis de sensibilidad resulta fundamental en la evaluación de proyectos y políticas, ya que permite entender cómo las variaciones en los parámetros clave pueden afectar los

resultados de un modelo o escenario. En el contexto de los bonos de carbono, como los de HFC, este tipo de análisis resulta crucial para evaluar la robustez de los beneficios económicos y ambientales bajo diferentes condiciones. Dado que los precios de los bonos y el tamaño del banco de emisiones pueden variar considerablemente, un análisis de sensibilidad permite identificar los factores que tienen el mayor impacto en el rendimiento del proyecto y ayuda a tomar decisiones informadas sobre las estrategias de mitigación del cambio climático. Además, facilita la gestión de riesgos al anticipar cómo los cambios en estos factores pueden influir en la viabilidad financiera y la efectividad de las políticas de reducción de emisiones.

En la Tabla 7-30 se presentan los resultados para un precio fijo de 10 USD por tonelada de CO₂eq, considerando tres diferentes niveles aplicación de límites de emisión a partir del banco, encontrándose el caso base con mayor o igual a 650 ton CO₂ eq, el caso con un banco mayor o igual a 2.000 ton CO₂ eq y un banco mayor o igual a 3.000 ton CO₂ eq.

Para el caso base, el costo total es de 1.389 miles de UF y el beneficio directo asociado con el precio social del carbono es de 12.094 mil UF. La diferencia entre el beneficio y el costo es de 10.704 mil UF, lo que da lugar a una razón beneficio-costos de 8,7.

Para el segundo caso, con un banco mayor o igual a 2.000 ton CO₂ eq, se puede apreciar que a medida que el banco crece a 2.000 ton CO₂eq, el costo total disminuye a 822 mil UF. Sin embargo, el beneficio directo se reduce a 8.137 mil UF, lo que genera una diferencia beneficio-costos de 7.315 mil UF. La razón beneficio-costos mejora a 9,9.

Por último, en el caso con un banco mayor o igual a 3.000 ton CO₂ eq, el costo total se reduce aún más a 621 mil UF, mientras que el beneficio directo baja a 6.122 mil UF. La diferencia beneficio-costos disminuye significativamente a 5.000 mil UF, con una razón beneficio-costos de 9,9, igualada al caso del banco mayor o igual a 2.000 ton CO₂eq.

Tabla 7-30 Análisis de sensibilidad de tres niveles para banco de aplicación de límites de emisión, con precio de 10 USD/tonCO₂eq del bono de HFC para escenario intermedio

Límites de banco aplicado a los establecimientos	Caso base (Banco mayor o igual a 650 ton CO ₂ eq)	Banco mayor o igual a 2.000 ton CO ₂ eq	Banco mayor o igual a 3.000 ton CO ₂ eq
Costo total (miles UF)	1.389	822	621
Beneficio directo precio social del carbono (miles UF)	12.094	8.137	6.122
Diferencia beneficio – costo (miles UF)	10.704	7.315	5.500
Razón beneficio - costo	8,7	9,9	9,9

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 7-31 presenta los resultados para un banco fijo de 650 ton CO₂eq, pero con diferentes precios del bono de HFC, de 5 USD/tonCO₂eq, 10 USD/tonCO₂eq —el caso base— y 20 USD/tonCO₂eq.

Para el caso base se puede apreciar que el costo total para este precio es de 1.243 mil UF. El beneficio directo asociado con el precio social del carbono es de 11.942 mil UF. La diferencia entre beneficio y costo es de 10.689 mil UF, lo que da una razón beneficio-costo de 9,6.

Para el segundo caso, el costo total aumenta a 1.389 mil UF, y el beneficio directo se incrementa ligeramente a 12.094 mil UF. La diferencia entre beneficio y costo es de 10.704 mil UF, lo que genera una razón beneficio-costo de 8,7.

Finalmente, en el último caso para un precio de bono de 20 USD/tonCO₂eq, el costo total es de 1.577 mil UF y el beneficio directo sube a 12.594 mil UF. La diferencia beneficio-costo crece a 11.017 mil UF, pero la razón beneficio-costo disminuye a 8,0.

Tabla 7-31 Análisis de sensibilidad de tres niveles para precio de bono de HFC, para banco de 650 ton CO₂ eq. para escenario intermedio

Precio de bono de HFC	5 USD/tonCO ₂ eq	10 USD/tonCO ₂ eq	20 USD/tonCO ₂ eq
Costo total (miles UF)	1.243	1.389	1.577
Beneficio directo precio social del carbono (miles UF)	11.942	12.094	12.594
Diferencia beneficio – costo (miles UF)	10.689	10.704	11.017
Razón beneficio - costo	9,6	8,7	8,0

Fuente: Elaboración propia

A partir de los observado en las tablas ya mencionadas, se observa que a medida que el tamaño del banco utilizado para definir el alcance de la norma crece, pasando de 650 ton CO₂eq a 2.000 y 3.000 ton CO₂eq, se tiene una disminución en el costo total. El beneficio directo también disminuye conforme aumenta el tamaño del banco, sin embargo, se observa que la razón beneficio-costo entre el caso de banco límite 2.000 ton CO₂eq. es igual al caso de 3.000 ton CO₂eq., mayor al caso de 650 ton CO₂eq., lo que sugiere que una menor cantidad de establecimientos afectos lograría mayores beneficios por cada UF gastado, superando todos los escenarios de norma propuestos en el caso base (ver Sección 7.2.2).

Por otro lado, el análisis muestra que a precios más bajos del bono de HFC como 5 USD/ton CO₂eq, la relación beneficio-costo es más alta, aproximadamente de 9,6, lo que indica que los beneficios derivados del bono son mayores en comparación con el costo. En cambio, a precios más altos como 20 USD/ton CO₂eq, la razón beneficio-costo disminuye a 8,0, lo que podría implicar que los beneficios adicionales de un precio más alto no son proporcionales al aumento en los costos.

8. Consideraciones adicionales

En esta subsección se presentan aspectos adicionales a tener en consideración.

En primer lugar, se presentan aspectos a tener en cuenta, identificados por medio de una entrevista realizada a la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA). La SMA es el organismo encargado de la fiscalización y aplicación de las normativas ambientales en Chile, desempeñando un papel crucial en la implementación de políticas que aseguren el cumplimiento de estándares ambientales. En el contexto de la propuesta de norma de emisión para HFC, la SMA es una entidad clave para la supervisión de su ejecución, garantizar la trazabilidad de las emisiones y coordinar esfuerzos con otras instituciones. Dado su rol en la fiscalización, se consideró relevante conocer su perspectiva respecto de la viabilidad técnica y administrativa de la normativa propuesta. Debido a lo expuesto, se llevó a cabo una entrevista con miembros del equipo de la SMA, donde se discutieron aspectos clave relacionados con la posible implementación de esta propuesta de norma de emisión para HFC. A continuación, se presentan las principales recomendaciones y limitaciones identificadas.

- Recomendaciones:
 - Estructura normativa y definiciones clave: Es fundamental establecer una norma de emisión que contemple una estructura normativa clara y funcional. Esto incluye la definición precisa del objeto regulado, los límites de emisión, las unidades de medida y los mecanismos de evaluación del cumplimiento.
 - Fiscalización operativa y capacidades institucionales: Se recomienda delegar ciertas funciones de fiscalización a entidades certificadoras técnicas, con el fin de garantizar una cobertura más amplia y efectiva. Asimismo, resulta clave implementar un sistema de registro sistemático para monitorear la comercialización y uso de HFC, permitiendo identificar sujetos regulados y optimizar los recursos disponibles. También se destaca que las SEREMI de Salud, también en su rol de fiscalización, podrían tener mecanismos ya establecidos que se podrían aprovechar, en cuanto a la certificación de salubridad para la operación de establecimientos de diversos rubros, por ejemplo, en el procesamiento de alimentos.
 - Control de variables operacionales: Opción utilizar datos sobre variables operacionales claves para estimar o comprobar una eventual emisión.
 - Incentivos económicos y mecanismos de mitigación: La introducción de impuestos variables sobre los refrigerantes podría fomentar la reducción de emisiones. Estos incentivos podrían escalar según la cantidad utilizada, promoviendo la adopción de alternativas más sostenibles y la mejora de las prácticas operativas.
 - Escenarios alternativos de propuestas y costos: Debido a la escasa capacidad de carga de la SMA se recomienda elaborar escenarios alternativos para la aplicación de la norma, incluyendo un análisis detallado de costos y recursos requeridos.

- Análisis impacto regulatorio: Es necesario un análisis preliminar que evalúe el impacto regulatorio de la norma propuesta, incluyendo un análisis detallado de posibles conflictos con normativas sanitarias existentes.
- Limitaciones identificadas:
 - Capacidad institucional insuficiente: Las capacidades técnicas y logísticas actuales de la SMA representan un desafío para la implementación y monitoreo de la normativa propuesta. La falta de recursos humanos y tecnológicos adecuados podría retrasar o complicar la fiscalización efectiva.
 - Complejidad en la integración de mecanismos económicos: Aunque se plantearon incentivos como el *trade*, su implementación enfrenta desafíos relacionados con la definición de criterios claros para su cálculo y posibles resistencias por parte de los sectores regulados.
 - Dependencia de actores privados para la implementación: La ejecución de ciertas medidas depende en gran parte de la colaboración de actores privados, como empresas de refrigeración, climatización y distribuidores de HFC. La falta de incentivos claros o resistencias por parte de estos actores podría ralentizar la implementación efectiva de la norma.

En segundo lugar, otra limitación relevante a tener en cuenta es la restricción en el tamaño de la muestra utilizada y en otros casos la falta de información, lo cual impacta directamente en la disponibilidad y precisión de los datos para ciertas categorías, específicamente B, E, F y G. La escasez de información detallada en estos segmentos dificulta la generación de proyecciones robustas y limita la capacidad de realizar análisis e interpretaciones precisas. Esta falta de datos podría llevar a resultados menos representativos y, por ende, a conclusiones que no reflejen completamente la realidad de estos grupos, lo que subraya la necesidad de contar con una recopilación de información más exhaustiva y específica para futuras evaluaciones.

Finalmente, no obstante los beneficios identificados para cada escenario, es importante notar que las personas entrevistadas no identifican beneficios asociados a la implementación de la norma. Más bien explican y justifican el tipo de refrigerantes que utiliza su sector. Al considerar posibles cambios, se enfatizan los obstáculos que habría para implementarlos y sus costos, predominando una visión cortoplacista y conservadora. Los beneficios que identifican corresponden a los ahorros en costos de refrigerante y, en algunos casos, por eficiencia energética. En los usuarios de grandes sistemas de frío el foco está en la eficiencia del sistema actual y sus ventajas por sobre otras alternativas en términos de refrigeración, sin considerar el impacto ambiental. Asimismo, no se menciona como beneficio la posibilidad de lograr buenos indicadores ESG (*Environment-Social-Government*) para sus empresas o, desde una mirada social y no solo sectorial, lograr mitigar los efectos adversos del cambio climático. En el caso de los técnicos, gran parte de los entrevistados conocían los beneficios de dejar de usar de usar sustancias agotadoras de ozono, pero muy pocos mencionaron la necesidad de reducir las emisiones de HFC por su impacto ambiental, identificándose una brecha de conocimiento en este aspecto.

9. Conclusiones

La primera etapa del estudio tuvo por objetivo ofrecer una primera definición de grandes usuarios de sistemas de frío, proponer criterios de desagregación estos e identificar bancos y tasas de emisión. En base a la revisión de los antecedentes entregado por la contraparte en conjunto con las entrevistas realizadas por el equipo consultor y la investigación propia, se logró caracterizar diferentes sectores que dan uso a este tipo de refrigerantes en distintas sub-aplicaciones.

En cuanto a los grandes usuarios identificados, es importante mencionar que al momento de evaluar qué grandes usuarios incluir en la norma, no será factible incluir a todos. La priorización de cuáles incluir, además de la distribución de la carga, debería considerar el tamaño del banco, la tasa de mantención o de recarga y el potencial de calentamiento global asociado. En otras palabras, se propone considerar tres factores para priorizar la inclusión de un gran usuario en la norma: i) tamaño del banco, en kilogramos y expresado en toneladas de dióxido de carbono equivalente, debido a la potencial emisión a la atmósfera que significa; ii) tasa de fuga, debido a que habla de la frecuencia con la que se emite a la atmósfera; y iii) tipo de equipos predominantes en los establecimientos, debido a que la posibilidad de fiscalizar es mayor cuando la carga está distribuida en menos equipos.

Los criterios de desagregación propuestos ayudan a identificar tipos de equipo, no solo en términos de tecnologías y sistemas, sino que en la carga que contienen (Tipo I, II y III), por lo que son criterios importantes de considerar si lo que se busca es reconocer grandes usuarios que se presentan en gran número, pero distribuidos en múltiples sistemas, de grandes usuarios que, aunque se presenten en baja cantidad, cuenten con una carga significativa distribuida en un menor número de sistemas. En base a lo anterior, los sectores fueron clasificados en ocho categorías de interés, denominadas de la A a la H.

La categoría A, referida a usuarios de refrigeración industrial fija con predominancia de equipos Tipo III, resultó ser aquella con el banco más significativo. Lo anterior se explica ampliamente debido a que dentro de esta categoría se considera el sector hortofrutícola y otros sectores industriales importantes. En esta categoría, a pesar de que existen establecimientos con bancos menores a 500 kg, el análisis también arrojó que los bancos de menor tamaño presentan a su vez las tasas más altas. Lo anterior podría implicar que algunos establecimientos que por sí solos tienen un RUT (al contrario de pertenecer a una empresa con múltiples establecimientos), puedan no ser considerados grandes usuarios, y se hace necesario observar los bancos en términos de toneladas de CO₂ equivalente. Es importante mencionar que es posible que las muestras obtenidas por cada sector no sean representativas y que la muestra que haya estado dispuesta a entregar información con respecto a su banco sea también aquella con menor carga alojada.

La categoría B, de refrigeración industrial fija con predominancia de equipos Tipo II, abarca solo a productores primarios de leche, para los cuales no se cuenta con más información. Este mismo escenario se repite en la categoría C, D, E y F. Esta situación, en donde se presentan grandes brechas de conocimiento, deberían guiar a que la norma de emisión de HFC considere un periodo de adecuación, durante el cual, aunque no estén vigentes los límites de emisión, sea obligatorio por cada sector potencialmente gran usuario, el reporte de todos sus sistemas, junto a su carga y tipo de refrigerante. Lo anterior contribuiría a identificar qué establecimientos efectivamente tendrían que ser fiscalizados.

En el caso de la categoría H, que abarca solo supermercados, por un lado, presenta una situación similar a la A, en la que, aunque no tan marcado, el comportamiento de la tasa versus el banco tiende a tener una relación inversa, en el que en la medida en que aumenta el banco, disminuye la tasa de mantención. Por otro lado, el banco muestra una distribución que se asimila a la normal, con una mayoría de establecimientos entre 700 y 2.000 toneladas de CO₂ equivalente, a diferencia de la categoría A. En el caso de las tasas, la mayoría de establecimientos presenta tasas menores al 60%.

Paralelamente, para complementar la información de los inventarios, se realizaron entrevistas a los diversos usuarios y así complementar la información o descubrir antecedentes nuevos que pudiesen ayudar en el estudio. Así fue como se entrevistaron a técnicos de instalación y mantención de sistemas de climatización y refrigeración que atienden a distintos sectores. Los principales antecedentes que se lograron recabar fue que las fugas se encuentran asociadas a malas instalaciones y poco mantenimiento, de hecho, al preguntar por estrategias para evitar fugas, la respuesta que más se repitió fue la realización de mantenimientos preventivos. Respecto a la recuperación, se menciona que no se realiza producto al alto costo que viene asociado a la bombona para recuperar y si lo hicieran muchos se encuentran alejados de las plantas de recuperación, lo que les impide trasladar el gas recuperado. Cuando se preguntó respecto a la tendencia a futuro sobre los gases, una gran parte mencionó al R-32 como aquel gas que se va a posicionar dentro del mercado producto de su nula inflamabilidad y baja toxicidad, y su bajo PCG en comparación a los gases que se utilizan actualmente.

La segunda etapa del estudio tiene por objetivo proponer mecanismos que permitan la reducción de emisiones de HFC en sistemas de frío y proponer tres escenarios de norma, incluyendo los contenidos mínimos especificados en la Ley Marco.

Al respecto de la normativa internacional revisada, todas las incluidas en la revisión basan la reducción de las emisiones de HFC en la limitación del consumo de estas sustancias y las complementan con la prohibición de equipos y/o aplicaciones específicas, lo que se complementa con la asignación de cuotas de consumo a los usuarios de cada país. Por ende, lo propuesto en este informe, sería una estrategia novedosa en relación con la normativa de los países revisados.

En cuanto a las medidas de control, se encontró que, si bien no existen tecnologías de abatimiento como tal, existen estrategias para controlar las emisiones de HFC, asociadas al reemplazo de refrigerantes con alto PCG por otros con bajo o nulo PCG, buenas prácticas y medidas de eficiencia energética. La primera medida de reemplazo de sustancias busca que los HFC actualmente utilizados sean reemplazados por HFCs más modernos, con menores PCG, o sustancias ya utilizadas en distintos sectores, pero que presentan desafíos en la operación. La segunda medida, de buenas prácticas, busca que se tomen acciones preventivas, de forma que sea evitada la fuga a la atmósfera del refrigerante o que se originen estas fugas. Por último, las de eficiencia energética logran la reducción de emisiones por dos vías: 1) directamente, evitando la fuga de refrigerante, condición bajo la cual los equipos requieren más energía para continuar enfriando, y 2) indirectamente, reduciendo el consumo energético y por ende la huella de carbono asociada al consumo.

Con respecto a la fiscalización, si bien esta podría resultar desafiante debido a la estructura de norma que se propone, se espera que, con las estrategias propuestas, se facilite la labor de la SMA. Estas estrategias son más bien preventivas, en lugar de correctivas y además se introduciría la figura de persona técnica acreditada, que serviría de apoyo a la gestión de las instituciones involucradas en el cumplimiento de la norma.

Los escenarios de norma propuestos consideran que a un usuario de HFC aplicará un límite de emisión si su banco es mayor o igual a 650 tonCO₂eq, para los cuales se plantean tres niveles de exigencia distintos y se basan, en lo posible, en los antecedentes recopilados en la primera etapa del estudio. Los límites de emisión se estiman en cada caso a partir de una tasa característica de cada categoría y del banco individual alojado por cada establecimiento. Lo anterior obedece a dos cosas: i) la incertidumbre con respecto al banco que aloja cada establecimiento y, ii) que la posibilidad de reducción de emisiones se asocia a mejoras en la operación e implementación de buenas prácticas por parte de los establecimientos y no a la reducción de su banco o de sus actividades comerciales/industriales.

En base a los antecedentes disponibles, solo fue posible proponer límites para las categorías A, C, D y H. Lo anterior vuelve a poner de manifiesto la relevancia de que todas las categorías sean parte de la norma en el sentido de que deberán registrar sus sistemas de frío en el sistema que se disponga para tal fin. Este sistema es la columna vertebral de la norma y lo que permitirá ajustar e incluir otras categorías en la medida en que se cuente con registros.

En la tercera parte y final del estudio, se realizaron simulaciones detalladas para estimar el potencial de reducción de emisiones, los costos asociados y los beneficios de implementar la normativa propuesta. Estas simulaciones se llevaron a cabo en Python, utilizando la distribución de la muestra de los establecimientos identificados en las etapas anteriores. Con el fin de obtener resultados representativos a nivel nacional, se modeló el comportamiento de los establecimientos en el software Analytica con el objetivo de alcanzar el número total de establecimientos con sistemas de frío en Chile. Los resultados mostraron un considerable

potencial de reducción de emisiones, especialmente cuando se combinan las mejoras en eficiencia energética con la sustitución de refrigerantes de alto PCG por alternativas más limpias.

El análisis de costos y beneficios reveló que, aunque la implementación de la normativa podría generar costos iniciales asociados a la transición hacia tecnologías menos contaminantes y a la mejora de las prácticas de mantenimiento y eficiencia energética, estos serían compensados en gran medida por los beneficios a largo plazo. Estos beneficios incluyen la reducción de las emisiones de GEI, los ahorros en consumo energético, y los incentivos económicos derivados de la implementación de refrigerantes reciclados o regenerados. Además, se identificaron beneficios adicionales en términos de competitividad para los sectores que adopten estas tecnologías de manera temprana.

En base al análisis de sensibilidad realizado, se puede observar que tanto el tamaño del banco como el precio de los bonos de HFC influyen significativamente en los costos y beneficios asociados a la implementación de la normativa para la reducción de emisiones de HFC. A medida que aumenta el tamaño del banco límite sobre el cual aplican los límites de emisión, el costo total disminuye, y el beneficio directo también disminuye conforme aumenta el tamaño del banco, sin embargo, se observa que la razón beneficio-costos entre el caso de banco límite 2.000 ton CO₂eq. es igual al caso de 3.000 ton CO₂eq., mayor al caso de 650 ton CO₂eq., lo que sugiere que una menor cantidad de establecimientos afectados lograría mayores beneficios por cada UF gastado, superando todos los escenarios de norma propuestos en el caso base

Por otro lado, también se tiene que a precios más bajos del bono de HFC, la razón beneficio-costos es más alta, lo que refleja que los beneficios derivados del bono superan el costo de manera más eficiente. Esto subraya la incidencia del bono de HFC en los beneficios y costos de la norma.

En base a los análisis y a los datos disponibles, el escenario intermedio parece ser el más adecuado para iniciar la implementación de la normativa. Este escenario lograría una reducción de emisiones significativa sin imponer una carga económica excesiva, permitiendo a los sectores adaptarse gradualmente a los requisitos de la normativa. Además, ofrece un equilibrio entre los costos de implementación y los beneficios a largo plazo, siendo de los escenarios con mayores beneficios directos, lo cual facilitaría la aceptación de la normativa por parte de los usuarios y permitiría alcanzar los objetivos climáticos de manera progresiva. Este escenario se podría ver aún más beneficiado por un precio de bono de HFC de 5 USD/tCO₂eq., que mantendría los beneficios totales en el orden, pero mejorando la razón beneficio-costos.

10. Referencias bibliográficas

- Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático. (2020). *Sector Industria de Alimentos Procesados Sustentable*.
- Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático, Cámara Chilena de Refrigeración y Climatización A.G., & Desarrollo Producto Sostenible. (2024). *Acuerdo de Producción Limpia Gestión Sustentable de Refrigerantes – Cero Fuga*.
- Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático, & ChileAlimentos. (2024). *Quinto Acuerdo de Producción Limpia Sector Industria de Alimentos Procesados Sustentable*.
- Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático, Consorcio Lechero, & Desarrollo Producto Sustentable. (2024). *Segundo Acuerdo de Producción Limpia Sector Industria Láctea Procesadora Sustentable, Programa Chile Origen Consciente*.
- Allaires-Avalos, M. (2023). *Consultoría para la elaboración de un inventario de refrigerantes utilizados en la industria de alimentos procesados congelados en Chile*.
- ATS Energía. (2020). *Elaboración de un inventario nacional individualizado de HFC y sus alternativas, en los sectores de aire acondicionado móvil, transporte refrigerado y supermercados*.
- CERES BCA. (2022). *Inventario de refrigerantes (HFC y otros) en la Industria Láctea en Chile, para los años 2018-2021*.
- Chávez, J., & Pérez, E. (2020). *Estimación de Inventario de hidrofluorocarbonos (HFC) en el Sector Pesquero Acuícola en la zona sur austral de Chile (regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes)*.
- Clarke C., C. (2023). *Caracterización de sistema de climatización en hospitales públicos*.
- Consejo Nacional de Producción Limpia. (2016). *Sector Industria de Alimentos Procesados*.
- European Commission: Directorate-General for Climate Action, Gschrey, B., Behringer, D., Kleinschmidt, J., & Jörß, W. (2022). *Support contract for an evaluation and impact assessment for amending Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases*.
- FDF. (2020). *Inventario Individualizado de hidrofluorocarbonos (HFC) para las subaplicaciones de Refrigeración en el Sector Frutícola de Chile* (p. 54).
- Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF). (2020). *Inventario individualizado de hidrofluorocarbonos (HFC) para las subaplicaciones de Refrigeración en el Sector Frutícola de Chile*.
- GAET. (2023). *Inventario de uso de refrigerantes en supermercados y centros de distribución en Chile*.
- Giroto, S., Minetto, S., & Neksa, P. (2004). Commercial refrigeration system using CO₂ as the refrigerant. *International Journal of Refrigeration*, 27(7), 717–723. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.07.004>
- Gobierno de la República de Chile. (2023). *Primera Etapa del Plan de Implementación de Kigali KIP- I*.
- GreenLab Dictuc. (2017). *Elaboración de Inventario Nacional de Hidrofluorocarbonos (HFC)*.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de GEI: Vol. Orientación* (Issue 1).

- Lecaros, R., & Burgos, L. (2022). *Determinación del inventario y consumo de gases refrigerantes utilizados en la industria de carnes rojas en Chile*.
- Lescani, L. (2020). *Inventario de HFC Sector Naviero*.
- Longo, G. A., Mancin, S., Righetti, G., & Zilio, C. (2015). HFC32, a low GWP substitute for HFC410A in medium size chillers and heat pumps. *International Journal of Refrigeration*, 53, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.01.014>
- Madrazo-Ortega, D., & Morandé-Thompson, V. (2023). *Estimación de uso de refrigerantes HFC en sector minería en Chile año 2020*.
- Ministerio de Agricultura. (2024). *Anteproyecto PLAN SECTORIAL DE MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO SECTOR AGRICULTURA*. <https://climate.nasa.gov/evidence/>
- Ministerio de Energía. (2017). *Plan de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero para el Sector Energía*.
- Ministerio de Minería. (n.d.). *PLAN SECTORIAL DE CAMBIO CLIMÁTICO DEL SECTOR MINERÍA*.
- Ministerio de Salud - Ministerio del Medio Ambiente. (2024). *Anteproyecto Plan Sectorial de Mitigación del Ministerio de Salud*.
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2024). *Plan Sectorial de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático*.
- PASOS. (2020). *Levantamiento de información para elaboración de inventario de consumo de refrigerantes*.
- Pérez & Caro. (2023). *Inventario de uso de refrigerantes en el subsector pesca - acuicultura en Chile*.
- Pérez, E., & Caro, P. (2023). *Inventario de uso de refrigerantes en el subsector pesca – acuicultura en Chile*.
- PROPUESTA DE PLAN NACIONAL DE FRÍO DE CHILE. (2020).
- Purohit, P., & Höglund-Isaksson, L. (2017). Global emissions of fluorinated greenhouse gases 2005–2050 with abatement potentials and costs. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(4), 2795–2816. <https://doi.org/10.5194/acp-17-2795-2017>
- Purohit, P., Höglund-Isaksson, L., Bertok, I., Chaturvedi, V., & Sharma, M. (2016). *Scenario Analysis for HFC Emissions in India: Mitigation potential and costs*. www.iiasa.ac.at
- Purohit, P., Höglund-Isaksson, L., Dulac, J., Shah, N., Wei, M., Rafaj, P., & Schöpp, W. (2020). Electricity savings and greenhouse gas emission reductions from global phase-down of hydrofluorocarbons. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(19), 11305–11327. <https://doi.org/10.5194/acp-20-11305-2020>
- Purohit Pallav, & Höglund - Isaksson Lena. (2017). *Global emissions of fluorinated greenhouse gases 2005–2050 with abatement potentials and costs*. 29–31.
- RCG. (n.d.). *Refrigerante R-290 y R-600*.
- Santander, R. (2023). *Elaboración de un inventario de refrigerantes utilizados en climatización en grandes superficies comerciales e industriales de Chile*.
- S&C. (2022). *Inventario de hidrofluorocarbonos (HFC) en el Sector Vitivinícola en Chile, años 2018-2019 y 2020*.
- Shindell, D., Bréon, F., & Et al. (2013). *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf

UNEP. (2009). *Assessment of alternatives to HCFCs and HFCs and update of the teap 2005 supplement report data.*

11. Anexos

11.1 Potencial de calentamiento global

El potencial de calentamiento global (PCG), calculado para cada gas de efecto invernadero, refleja el forzamiento climático por cada kilogramo de gas emitido en relación con una masa equivalente de CO₂. El PCG es calculado por el Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC), en base a la intensidad de absorción de luz infrarroja de cada GEI y al tiempo que pueden permanecer en la atmósfera. En general, para inventariar GEIs, se considera un horizonte de tiempo de 100 años, en cuyo caso, el PCG se denomina PCG-100.

A continuación, en la Tabla 11-1 se muestran los PCG para los diferentes HFC reportados en el AR4 y AR5, que permiten obtener las toneladas de CO₂ equivalente para cada subsector, tanto para el banco como la recarga. Cabe mencionar que para transformar kilogramos de refrigerante a kilogramos de CO₂ equivalente, basta con multiplicar la masa de refrigerante por el PCG correspondiente.

Tabla 11-1 PCG de los HFC, según AR4 y AR5

Hidrofluorocarbonos	PCG (100 años) IPPC AR4	PCG (100 años) IPPC AR5
HFC-23	14.800	12.400
HFC-32	675	677
HFC-41	92	116
HFC-125	3.500	3.170
HFC-134	1.100	1.120
HFC-134a	1.430	1.300
HFC-143	353	328
HFC-143a	4.470	4.800
HFC-152	53	16
HFC-152a	124	138
HFC-161	12	4
HFC-227ca	S.I.	2.640
HFC-227ea	3.220	3.350
HFC-236cb	1.340	1.210
HFC-236ea	1.370	1.330
HFC-236fa	9.810	8.060
HFC-245ca	693	716
HFC-245cb	S.I.	4.620
HFC-245ea	S.I.	235
HFC-245fa	1.030	858
HFC-365mcf	794	804
HFC-43-10mee	1.640	1.650
R-22	1.810	1.760
R-410A	2.088	1.924
R-407C	1.774	1.624
R-507A	3.985	3.985
R-404A	3.922	3.943
R-438A	2.264	2.059

Fuente: Elaboración propia en base al Anexo F de la Enmienda de Kigali.

11.2 Inventarios sectoriales: obtención de banco y recarga por sector

11.2.1 Sector hortofrutícola

Para poder caracterizar el sector hortofrutícola, se revisó el inventario realizado por Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020). La metodología utilizada por FDF (2020) consistió en levantar información a partir de entrevistas a empresas del rubro. Se logró entrevistar a 39 empresas del sector, desagregadas en pequeños, medianos y grandes usuarios, con el fin de obtener una carga promedio y posteriormente extrapolar los datos al universo de 1.388 empresas²⁴. La carga estimada para la muestra de 39 empresas se observa en la Tabla 11-2 por refrigerante.

²⁴ Universo reportado por FDF (2020) existente al año de realización del estudio.

Tabla 11-2 Carga instalada por usuario en la muestra entrevistada (kg), sector hortofrutícola

Refrigerante	Grandes usuarios	Medianos usuarios	Pequeños usuarios
R-717	214.221	17.600	8.170
R-22	12.520	1.652	796
R-507A	7.507	1.000	3.200

Fuente: Elaboración propia en base a Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020).

La desagregación de las 39 empresas según refrigerante y tipo de usuario se muestra en la Tabla 11-3.

Tabla 11-3 Tipos de usuarios según la muestra entrevistada, sector hortofrutícola

Refrigerante	Grandes usuarios	Medianos usuarios	Pequeños usuarios	Total
R-717	8	9	1	18
R-22	8	4	4	14
R-507A	1	2	2	7
Total				39

Fuente: Elaboración propia en base a Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020).

Uno de los resultados más importantes a destacar es el consumo promedio por usuario, reportado en la Tabla 11-4.

Tabla 11-4 Consumo promedio por usuario en base a la muestra entrevistada (kg), sector hortofrutícola

Refrigerante	Grandes usuarios	Medianos usuarios	Pequeños usuarios
R-717	26.778	1.956	8.170
R-22	1.565	413	398
R-507A	7.507	500	800

Fuente: Elaboración propia en base a Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020).

Cabe notar que el amoniaco constituye el refrigerante predominantemente utilizado en este sector. A pesar de ello, el R-507A (HFC) continúa siendo relevante al considerar que incluso los medianos usuarios de este sector, que son aquellos con el menor banco de HFC, podrían ser considerados *grande usuarios* bajo el criterio de que la sumatoria de sus sistemas, alcance más de 500 kg de refrigerante.

En base a los resultados de la muestra, fue posible extrapolar los resultados al universo existente. La desagregación del universo de 1.388 empresas según grandes, medianos y pequeños usuarios y refrigerante se observa en la Tabla 11-5.

Tabla 11-5 Número de usuarios en el sector hortofrutícola por tamaño y refrigerante

Refrigerante	Grandes usuarios	Medianos usuarios	Pequeños usuarios	Total
R-717	285	320	36	641
R-22	285	142	71	498
R-507A	36	71	142	249
Total				1.388

Fuente: Elaboración propia en base a Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020).

En base a la información anterior, se puede obtener la extrapolación de la carga instalada, multiplicando el consumo promedio por usuario (Tabla 11-4) con la cantidad de usuarios del universo, como se muestra en la Tabla 11-6.

Tabla 11-6 Carga total instalada en el sector hortofrutícola (kg)

Refrigerante	Grandes usuarios	Medianos usuarios	Pequeños usuarios	Total
R-717	7.618.578	625.928	290.559	8.535.065
R-22	445.263	58.752	28.309	532.324
R-507A	266.980	35.564	113.805	416.349

Fuente: Elaboración propia en base a Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020).

En el caso de la recarga, FDF (2020) no reportó el total para todo el sector, sino que solo para la muestra de forma agregada por refrigerante, por lo que fue necesario estimar un factor de extrapolación para obtener el total de recarga para el universo de empresas. Este factor de extrapolación se obtiene de la relación entre la cantidad respuestas por cada refrigerante y el número de usuarios por tipo de refrigerante en el universo. La recarga reportada se multiplica por este factor, lo que permite obtener la recarga anual para el universo. Los resultados obtenidos para la muestra se reportan en la Tabla 11-7, mientras que los resultados de recarga para el universo se muestran en la Tabla 11-8.

Tabla 11-7 Recarga anual en la muestra entrevistada (kg/año), sector hortofrutícola

Refrigerante	Recarga (kg/año)
R-717	6.031
R-22	615
R-507A	1.709

Fuente: Elaboración propia en base a Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020).

Tabla 11-8 Recarga anual extrapolada por refrigerante (kg/año), sector hortofrutícola

Refrigerante	Recarga (kg/año)
R-717	966.468
R-22	141.847
R-507A	38.284

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que, en el caso de la recarga, la obtención de respuestas por parte de las empresas fue menor que para el banco. Solo 14 empresas reportaron esta información, lo que implica una menor representatividad del sector y la exacerbación de los sesgos ya presentes en estimaciones basadas en información autoreportada. Dado que las respuestas de los establecimientos que responden se asumen representativas del universo, podría ocurrir que se esté subestimando o sobreestimando esta tasa. Por un lado, si es que las empresas que no respondieron acerca de la recarga son establecimientos que presentan altas tasas, la recarga del universo se estaría subestimando. Por otro lado, si es que las empresas que no responden efectivamente no recargan, la recarga del universo se estaría sobreestimando.

11.2.2 Alimentos congelados

Para abordar esta industria, se consultó el inventario realizado por Allaires-Avalos (2023). El estudio se enfoca principalmente en frutas y hortalizas congeladas, helados, cecinas y carnes congeladas. Este último se desagrega por carnes de aves y cerdo, y carnes ovinos y bovinos.

Como parte de la estimación del inventario de HFCs en este sector, se entrevistó a los gremios que agrupan a las principales productoras de los rubros antes mencionados. La muestra abarcó un total de 35 empresas, las que corresponden a 45 instalaciones productivas. En la Tabla 11-9 se muestran las características de los gremios consultados en el marco del estudio elaborado por Allaires-Avalos (2023): la participación dentro de la producción nacional, el número de empresas que cuentan con proceso de congelado y el porcentaje de respuesta respecto al universo gremial.

Tabla 11-9 Universo y muestra consultada, sector alimentos congelados

Sector	Gremio	Participación en la producción nacional	Empresas con procesos de congelado	Porcentaje de respuestas respecto al universo gremial
Frutas y hortalizas congeladas	ChileAlimentos A.G.	60%	23	56%
Helados	Consortio Lechero	50%	2	100%
Carnes cerdo y ave	CHILECARNE	90%	8	87%
Carnes ovinos y bovinos	FAENACAR	95%	11	100%
Cecinas	ANIC A.G.	80%	4	50%

Fuente: Extracto de Allaires-Avalos (2023).

Para asegurar luego que los resultados obtenidos para la muestra, perteneciente al gremio, los resultados se extrapolaron por un factor que combina tanto la representatividad dentro del gremio como la participación a nivel nacional. En las secciones a continuación se muestran los resultados obtenidos.

11.2.2.1 Frutas y hortalizas congeladas

Los resultados asociados a este subsector se muestran primero para la muestra (ver Tabla 11-10 y Tabla 11-11) y luego para el universo (ver Tabla 11-12 y Tabla 11-13).

Tabla 11-10 Carga en subsector frutas y hortalizas congeladas para la muestra entrevistada (kg), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-404	R-507A	R-717
2019	11.592	95	7.203	77.800
2020	11.592	95	7.203	77.800
2021	11.592	95	7.203	77.800

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-11 Recarga en subsector frutas y hortalizas congeladas para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-404	R-507A	R-717
2019	-	158	1.374	3.500
2020	330	79	1.931	22.039
2021	835	326	1.703	26.306

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-12 Carga en subsector frutas y hortalizas congeladas para el universo (kg), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-404	R-507A	R-717
2019	34.500	283	21.438	231.548
2020	34.500	283	21.438	231.548
2021	34.500	283	21.438	231.548

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-13 Recarga en subsector frutas y hortalizas congeladas para el universo (kg/año), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-404	R-507A	R-717
2019	-	470	4.089	10.417
2020	982	235	5.747	65.592
2021	2.495	970	5.068	78.292

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

11.2.2.2 Helados

Los resultados asociados a este subsector se muestran primero para la muestra (ver Tabla 11-14 y Tabla 11-15) y luego para el universo (ver Tabla 11-16 y Tabla 11-17).

Tabla 11-14 Carga en subsector helados para la muestra entrevistada (kg), sector alimentos congelados

Año	R-438A	R-507A	R-717
2019	6	14.165	66.300
2020	6	14.165	66.300
2021	6	14.165	66.300

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-15 Recarga en subsector helados para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados

Año	R-438A	R-507A	R-717
2019	-	-	-
2020	-	1.500	-
2021	-	1.500	-

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-16 Carga en subsector helados para el universo (kg), sector alimentos congelados

Año	R-438A	R-507A	R-717
2019	12	28.330	132.600
2020	12	28.330	132.600
2021	12	28.330	132.600

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-17 Recarga en subsector helados para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados

Año	R-438A	R-507A	R-717
2019	-	-	-
2020	-	1.500	-
2021	-	1.500	-

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

11.2.2.3 Faenadoras de carne de cerdo y ave

Los resultados asociados a este subsector se muestran primero para la muestra (ver Tabla 11-18 y Tabla 11-19) y luego para el universo (ver Tabla 11-20 y Tabla 11-21).

Tabla 11-18 Carga en subsector faenadoras carnes de cerdo y ave para la muestra entrevistada (kg), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-507A	R-717
2019	468	780	310.980
2020	468	780	310.980
2021	4.082	780	313.980

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-19 Recarga en subsector faenadoras carnes de cerdo y ave para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-507A	R-717
2019	-	-	1.918
2020	468	120	24.578
2021	4.082	200	21.102

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-20 Carga en subsector faenadoras carnes de cerdo y ave para el universo (kg), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-507A	R-717
2019	493	821	327.347
2020	493	821	327.347
2021	4.297	821	330.505

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-21 Recarga en subsector faenadoras carnes de cerdo y ave para el universo (kg/año), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-507A	R-717
2019	-	-	2.019
2020	493	126	25.872
2021	4.297	211	22.213

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

11.2.2.4Faenadoras carne de ovino y bovino

Los resultados asociados a este subsector se muestran primero para la muestra (ver Tabla 11-22 y Tabla 11-23) y luego para el universo (ver Tabla 11-24 y Tabla 11-25).

Tabla 11-22 Carga en subsector faenadoras carnes ovino y bovino para la muestra entrevistada (kg), sector alimentos congelados

Año	R-22	HFC-134a	R-404	R-407C	R-507A	R-717
2019	1.624	471	3	1.467	6.681	93.125
2020	1.624	471	3	1.467	6.681	93.125
2021	1.624	471	3	1.467	6.681	93.125

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-23 Recarga en subsector faenadoras carnes ovino y bovino para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados

Año	R-22	HFC-134a	R-404	R-407C	R-507A	R-717
2019	-	-	-	-	1.065	10.400
2020	-	55	-	-	895	11.490
2021	638	42	2	207	871	13.658

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-24 Carga en subsector faenadoras carnes de ovino y bovino para el universo (kg), sector alimentos congelados

Año	R-22	HFC-134a	R-404	R-407C	R-507A	R-717
2019	2.074	602	4	1.874	8.533	118.934
2020	2.074	602	4	1.874	8.533	118.934
2021	2.074	602	4	1.874	8.533	118.934

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-25 Recarga en subsector faenadoras carnes de ovino y bovino para el universo (kg/año), sector alimentos congelados

Año	R-22	HFC-134a	R-404	R-407C	R-507A	R-717
2019	-	-	-	-	1.360	13.282
2020	-	70	-	-	1.143	14.674
2021	825	54	3	264	1.112	17.443

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Para este subsector en específico, además del inventario realizado por Allaires-Avalos (2023), se consultó el inventario realizado por Lecaros & Burgos (2022). Este último solo aborda la industria de carnes rojas en Chile, por lo que fue útil para comparar el resultado obtenido para las faenadoras de carne de ovino y bovino. Ambos reportan el uso de R-717, R-22, R-507A, R-407C y HFC-134a. Al comparar ambos, la suma que se obtiene del inventario de Allaires-Avalos (2023) es muy similar al total obtenido por Lecaros & Burgos (2022), con 11.011 kg y 11.985 kg, respectivamente. En términos de recarga, si bien difieren, se obtienen órdenes de magnitud similar, con 1.433 kg/año y 2.903 kg/año promedio, respectivamente.

11.2.2.5Cecinas

Los resultados asociados a este subsector se muestran primero para la muestra (ver) y luego para el universo (ver).

Tabla 11-26 Carga en subsector cecinas para la muestra entrevistada (kg), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-507A	R-717
2019	1.123	899	26.460
2020	1.053	899	26.460
2021	793	899	28.770

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-27 Recarga en subsector cecinas para la muestra entrevistada (kg/año), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-507A	R-717
2019	443	-	-
2020	759	305	-
2021	666	583	2.310

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-28 Carga en subsector cecinas para el universo (kg), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-507A	R-717
2019	2.808	2.248	66.150
2020	2.633	2.248	66.150
2021	1.983	2.248	71.925

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

Tabla 11-29 Recarga en subsector cecinas para el universo (kg/año), sector alimentos congelados

Año	R-22	R-507A	R-717
2019	1.108	-	-
2020	1.898	763	-
2021	1.665	1.458	5.775

Fuente: Elaboración propia en base a Allaires-Avalos (2023).

11.2.1 Sector vitivinícola

Para el sector vitivinícola se revisó el inventario realizado por S&C (2022), en el que, como método de levantamiento de información, se aplicó una encuesta a las viñas del rubro. El número de viñas que respondió la encuesta ascendió a 28 de un total de 60 que conforman el universo.

La metodología se enfocó en determinar para cada empresa la cantidad de refrigerante por litros de producción, obteniendo la venta total anual expresada en millones de litros (MMI). Ya con lo anterior se calculó la cantidad de refrigerante asociada al nivel de producción. Finalmente, para cada viña se obtuvo un factor (kg HFC/MMI), el cual relaciona los kilogramos de HFC con la producción total de vinos.

Con la muestra de las 28 viñas que corresponden a 41 plantas vitivinícolas se obtuvo la cantidad de refrigerante utilizado en refrigeración como muestra la Tabla 11-30.

Tabla 11-30 Cantidad de refrigerante en sistemas de refrigeración en la muestra, sector vitivinícola

Refrigerante	Carga instalada (kg)	Distribución (%)
R-22	3.996	38%
HFC-134a	2.404	23%
R-717	2.450	23%
R-407C	767	7%
R-410A	448	4%
R-438A	100	1%
R-507A	168	2%
R-404A	52	0%
R-417A	102	1%
Total	-	100%

Fuente: Elaboración propia en base a S&C (2022).

Para el caso de los sistemas de climatización se menciona que no se pudo realizar un análisis respecto a la cantidad de refrigerante utilizados en los sistemas, dado que los datos que se recibieron de parte de las viñas fueron insuficientes para realizar la cuantificación por kilogramo de refrigerantes. Sin embargo, la información obtenida permitió estimar la distribución de equipos que utilizan ciertos tipos de refrigerantes. Esta estimación se observa en la Tabla 11-31.

Tabla 11-31 Cantidad de equipos de climatización en la muestra, sector vitivinícola

Refrigerante	Número de equipos	Distribución (%)
R-22	33	19%
HFC-134a	22	13%
R-410A	114	66%
Sin Información	5	3%
Total	174	100%

Fuente: Elaboración propia en base a S&C (2022).

También se realiza una proyección de inventario para refrigeración, climatización y recargas en sistemas climatizados, en base al promedio del factor (kg HFC/MMI) de las empresas que respondieron la encuesta. Las proyecciones para los años 2018, 2019, 2020 y 2021 se encuentran en la Tabla 11-32.

Tabla 11-32 Proyecciones de inventario para el sector vitivinícola, sector vitivinícola

Año	Proyección de recarga en climatización (kg/año)	Proyección inventario de refrigeración (kg)	Proyección inventario en climatización (kg)
2018	5.800	28.500	5.000
2019	5.500	32.200	5.900
2020	6.900	36.300	5.900
2021	10.700	36.300	5.900

Fuente: Elaboración propia en base a S&C (2022).

Con los datos mostrados se puede obtener el banco para refrigerantes en sistemas de refrigeración, el banco de refrigerantes para sistemas de climatización y la recarga desagregada por tipo de refrigerante. Para el banco de refrigerante en refrigeración, se multiplica la distribución de cada refrigerante (%) por la proyección del inventario de refrigeración para el año 2021, como se muestra en la Tabla 11-33.

Tabla 11-33 Cantidad de refrigerante proyectado a 2021 en sistemas de refrigeración (kg), sector vitivinícola

Refrigerante	Banco de refrigerante (kg)
R-22	13.831
HFC-134a	8.321
R-717	8.481
R-407C	2.656
R-410A	1.551
R-438A	346
R-507A	580
R-404A	180
R-417A	353

Fuente: Elaboración propia.

Para el banco de refrigerante en climatización, se multiplica la distribución de cada refrigerante (%) por la proyección del inventario de climatización para el año 2021, sin embargo, al no tener la cantidad de refrigerante es necesario realizar el supuesto de que todos los sistemas poseen la misma carga de refrigerante, independientemente del tipo de refrigerante que usen. El resultado de esto se observa en la Tabla 11-34.

Tabla 11-34 Cantidad de refrigerante proyectado a 2021 en sistemas de climatización (kg), sector vitivinícola

Refrigerante	Banco de refrigerante (kg)
R-22	1.119
HFC-134a	746
R-410A	3.866
Sin Información	170
Total	5.900

Fuente: Elaboración propia.

Por último, para la recarga desagregada por tipo de refrigerante, se utilizó el mismo supuesto anterior, y se multiplicó la distribución de los refrigerantes por la proyección de recarga en sistemas climatizados del año 2021, como se muestra en la Tabla 11-35.

Tabla 11-35 Recarga anual proyectada a 2021 en sistemas de climatización (kg/año), sector vitivinícola

Refrigerante	Recarga de refrigerante (kg/año)
R-22	2.029
HFC-134a	1.353
R-410A	7.010
Sin Información	307
Total	10.700

Fuente: Elaboración propia.

Ya que se conoce la cantidad de refrigerante en sistemas de refrigeración y climatización se puede juntar la información para obtener el total de refrigerantes en el sector vitivinícola para el año 2021 reflejado en la Tabla 11-36.

Tabla 11-36 Banco total proyectado de refrigerantes en el sector vitivinícola al 2021 (kg), sector vitivinícola

Refrigerante	Banco de refrigerante (kg)
R-22	14.950
HFC-134a	9.067
R-717	8.481
R-407C	2.656
R-410A	5.417
R-438A	346
R-507A	580
R-404A	180
R-417A	353

Fuente: Elaboración propia.

Resulta importante destacar que no se realizaron las proyecciones respecto a las recargas en sistemas de refrigeración, por lo que no se puede realizar algún tipo de supuesto dentro de un nivel de confianza para poder estimarlas.

11.2.1 Sector lácteo

Para este sector se consultó el inventario realizado por CERES BCA (2022), el que divide la industria entre tres subsectores: Industria Láctea Mayor (ILMa), Industria Láctea Menor (ILMe) y los productores primarios. La ILMa tiene una capacidad de recepción anual mayor a los 10 millones de litros de leche, conformada por 11 empresas que controlan 18 plantas. Por su parte, la ILMe tiene una capacidad de recepción anual que va desde los 20.000 a 10 millones de litros de leche, conformada por 109 a 111 plantas. En cuanto a los productores primarios, se estima que hay entre 2.500 y 3.400 productores lecheros; mientras que, según datos del INE, el número total de productores primarios es de 2.559.

La muestra para la estimación del inventario para el sector de la ILMa e ILMe corresponde a 14 plantas, mientras que para los productores la muestra es de 135. En base a lo anterior, se desagregó las muestras según dos criterios: zona geográfica y volumen anual de producción de leche. El primer criterio considera la zona Centro Sur y zona Sur, la que va desde las regiones de Valparaíso a Biobío y La Araucanía hasta Los Lagos respectivamente. El segundo criterio divide la industria en tres estratos, estrato 3 con una producción anual hasta 500 mil litros/año, estrato 2 de 500 mil a 1,5 millones litro/año y estrato 1 sobre 1,5 millones litros/año. Los resultados de la muestra (n=14 y 135 para industria y productores primarios, respectivamente) para la carga instalada se muestran en la Tabla 11-37.

Tabla 11-37 Cantidad de refrigerante en la ILMa, ILMe y productores primarios dentro de la muestra (kg), sector lácteo

Subsector	R-22 (kg)	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-407C (kg)	R-410A (kg)	R-507A (kg)	R-717 (kg)
ILMa	569	15	161	13	46	1.690	3.631
ILMe	137	-	-	-	-	78	-
Productores primarios	1.014	-	1.593	-	28	22	-

Fuente: Elaboración propia en base a CERES BCA (2022).

Los resultados de la recarga anual por parte de la muestra se indican en la Tabla 11-38. Al observar estos datos, es posible notar que para algunos casos no hay información reportada, lo que sugiere una menor tasa de respuesta. Evidencia de esto es que solo hay información para algunos estratos, solo para R-22, R-404A y R-507A. Lo anterior podría significar que existen establecimientos que no han tenido fugas, sin embargo, se debe ser cauteloso al interpretar los datos.

Tabla 11-38 Recarga anual en la ILMa, ILMe y productores primarios dentro de la muestra (kg/año), sector lácteo

Subsector	R-22 (kg/año)	HFC-134a (kg/año)	R-404A (kg/año)	R-407C (kg/año)	R-410A (kg/año)	R-507A (kg/año)	R-717 (kg/año)
ILMa	314	-	-	-	-	350	-
ILMe	-	-	-	-	-	-	-
Productores primarios	4	-	4	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia en base a CERES BCA (2022).

Para la extrapolación de la muestra, en CERES BCA (2022) se suma la carga y la recarga, se obtiene un promedio desagregado por estrato y por industria, y se extrapola según el número de instalaciones productivas, la producción y recepción anual de leche y la capacidad de equipos de refrigeración. Con lo anterior, según el primer supuesto se obtiene un total de 41.062 kg de refrigerante, en base al segundo supuesto se tiene 39.438 kg de refrigerante presente, y con el último supuesto la cantidad de refrigerante corresponde a 40.309 kg.

Para el presente informe, dado el interés que existe en la recarga, se abordará de manera distinta a lo propuesto por CERES BCA (2022). Se utilizará la metodología de extrapolación utilizada en el inventario desarrollado por Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) (2020), en donde, obtienen el promedio por usuario según la muestra, y se extrapola multiplicando este promedio por el universo (ver Anexo Digital “NEHFC-RecopilacionInventariosSectoriales.xlsx”). Desde la Tabla 11-39 a la Tabla 11-42 se indica el promedio por usuario según la muestra desagregada por estrato productivo para los productores primarios y tipo de refrigerante.

Cabe recordar que, debido a que la información de base es incompleta, se debe tener cuidado al interpretar estos resultados. La metodología utilizada para extrapolar puede dar resultados sesgados, que no sean representativos del universo de la industria láctea.

Tabla 11-39 Carga instalada y recarga de R-22 para el universo de los productores primarios según estrato, sector lácteo

Estrato en productores primarios	Número de productores	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
1	36	896	25	3,5	0,097	560	13.938	54
2	11	86	8	-	-	499	3.840	-
3	23	34	1	-	-	1.500	2.198	-
Total	70	1.014	34	3,5	0,097	2.559	19.977	54

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-40 Carga instalada y recarga de R-404A para el universo de los productores primarios según estrato, sector lácteo

Estrato en productores primarios	Número de productores	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
1	47	1.418	30	-	-	560	16.892	-
2	10	157	16	-	-	499	7.819	-
3	3	19	6	4	1,2	1.500	9.250	1.750
Total	60	1.593	52	4	1,2	2.559	33.961	1.750

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-41 Carga instalada y recarga de R-410A para el universo de los productores primarios según estrato, sector lácteo

Estrato en productores primarios	Número de productores	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
1	3	28	9	-	-	560	5.227	-
2	0	-	-	-	-	499	-	-
3	0	-	-	-	-	1.500	-	-
Total	3	28	9	-	-	2.559	5.227	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-42 Carga instalada y recarga de R-507A para el universo de los productores primarios según estrato, sector lácteo

Estrato en productores primarios	Número de productores	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
1	2	22	11	-	-	560	6.160	-
2	0	-	-	-	-	499	-	-
3	0	-	-	-	-	1.500	-	-
Total	2	22	11	-	-	2.559	6.160	-

Fuente: Elaboración propia

A continuación, desde la Tabla 11-43 a la Tabla 11-49 se presenta la carga y recarga por refrigerante extrapoladas al universo, referidas al tipo de industria.

Tabla 11-43 Carga instalada y recarga de R-22 para el universo de la industria indicado, sector lácteo

Tipo de industria	Número de plantas	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
ILMa	6	569	95	314	52	18	1.707	942
ILMe	4	137	34	-	-	111	3.802	-
Total	10	706	129	314	52	129	5.509	942

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-44 Carga instalada y recarga de HFC-134a para el universo de la industria indicado, sector lácteo

Tipo de industria	Número de plantas	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
ILMa	2	15	8	-	-	18	139	-
ILMe	-	-	-	-	-	111	-	-
Total	2	15	8	-	-	129	139	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-45 Carga instalada y recarga de R-404A para el universo de la industria indicado, sector lácteo

Tipo de industria	Número de plantas	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
ILMa	5	161	32	-	-	18	580	-
ILMe	-	-	-	-	-	111	-	-
Total	5	161	32	-	-	129	580	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-46 Carga instalada y recarga de R-407C para el universo de la industria indicado, sector lácteo

Tipo de industria	Número de plantas	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
ILMa	1	13	13	-	-	18	234	-
ILMe	-	-	-	-	-	111	-	-
Total	1	13	13	-	-	129	234	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-47 Carga instalada y recarga de R-410A para el universo de la industria indicado, sector lácteo

Tipo de industria	Número de plantas	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
ILMa	2	45	23	-	-	18	405	-
ILMe	-	-	-	-	-	111	-	-
Total	2	45	23	-	-	129	405	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-48 Carga instalada y recarga de R-507A para el universo de la industria indicado, sector lácteo

Tipo de industria	Número de plantas	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
ILMa	7	1.690	241	350	50	18	4.346	900
ILMe	2	78	39	-	-	111	4.329	-
Total	9	1.768	280	350	50	129	8.675	900

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-49 Carga instalada y recarga de R-717 para el universo de la industria indicado, sector lácteo

Tipo de industria	Número de plantas	Carga inicial (kg)	Carga inicial promedio (kg)	Recarga total (kg/año)	Recarga promedio (kg/año)	Universo	Carga inicial para el universo (kg)	Recarga promedio para el universo (kg/año)
ILMa	6	3.631	605	-	-	18	10.893	-
ILMe	-	-	-	-	-	111	-	-
Total	6	3.631	605	-	-	129	10.893	-

Fuente: Elaboración propia

A modo de resumen en la Tabla 11-50 y Tabla 11-51 se muestran los resultados de la extrapolación para la carga y recarga respectivamente para los productores primarios y las industrias indicadas.

Tabla 11-50 Carga instalada (kg) extrapolada de refrigerante, sector lácteo

Subsector	R-22	HFC-134a	R-404A	R-407C	R-410A	R-507A	R-717	Total
ILMa	1.707	139	580	234	405	4.346	10.893	18.303
ILMe	3.802	-	-	-	-	4.329	-	8.131
Productores primarios	19.997	-	33.961	-	5.227	6.160	-	65.324
Total	25.485	139	34.541	234	5.632	14.835	10.893	91.758

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-51 Recarga anual (kg/año) extrapolada de refrigerante, sector lácteo

Subsector	R-22	HFC-134a	R-404A	R-407C	R-410A	R-507A	R-717	Total
ILMa	942	-	-	-	-	900	-	1.842
ILMe	-	-	-	-	-	-	-	-
Productores primarios	54	-	1.750	-	-	-	-	1.804
Total	956	-	1.750	-	-	900	-	3.636

Fuente: Elaboración propia

11.2.2 Centros de distribución

Para los centros de distribución y centros logísticos, se utilizó el inventario realizado por GAET (2023). En este se menciona que se consideran como centros logísticos refrigerados aquellos que prestan servicios de arriendo de almacenamiento refrigerado, por lo que no se contabilizan los frigoríficos y centros de distribución de empresas que poseen sus propias plantas de almacenamiento refrigerado.

Dentro de los centros de distribución se establecen 4 tramos según la superficie que abarca el recinto.

- Tramo 1, Centro logístico refrigerado pequeño, con una superficie entre 150 y 499 m².
- Tramo 2, Centro logístico refrigerado mediano, con una superficie entre 500 a 1.999 m².
- Tramo 3, Centro logístico refrigerado grande, con una superficie entre 2.000 a 4.999 m².
- Tramo 4, Centro de distribución refrigerado, con superficie sobre los 5.000 m².

La metodología utilizada por GAET (2023) consiste en calcular la cantidad de refrigerante por superficie, con los siguientes supuestos. Se sabe que la capacidad media de refrigeración es de 0,055 kW/m², la cantidad de refrigerante por unidad de potencia frigorífica (kW) oscila entre los 5,33 a 6,66 kg/kW (ATS Energía, 2020). Se obtiene que los centros de distribución utilizan una masa de 6 kg/kW, por lo que se utilizan 0,33 kg/m² en la industria del frío. En complemento, es necesario realizar una corrección con el concepto de *coefficient of performance* (COP), el cual relaciona la capacidad de refrigeración con la potencia del compresor. Para este inventario se utilizó un COP de 2,2.

En base a lo anterior y a la superficie total de cada tramo se puede establecer la cantidad de refrigerante presente en cada tramo. En la Tabla 11-52 se presentan los datos de la cantidad de

superficie presente en cada tramo y la cantidad de refrigerante. La información de la superficie por cada tramo se obtuvo del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), del estudio de ATS Energía (2020) y de la revisión de proyectos. Por otro lado, la distribución de refrigerantes se realizó en base información de proyectistas. Es relevante destacar una discrepancia en la relación entre el número de recintos por tramo y la superficie, especialmente en el Tramo 1, donde la superficie promedio de un recinto es de aproximadamente 1.690 m², y el Tramo 3, donde el promedio por recinto alcanza los 5.042 m², lo que se aleja significativamente de los rangos previamente mencionados.

Tabla 11-52 Cantidad de superficie y refrigerantes por tramos, sector centros de distribución

Tramo	Superficie (m2)	Número de recintos	R-22 (kg)	R-404A (kg)	R-507A (kg)	R-717 (kg)
1	81.118	48	14.236	3.942	3.723	0
2	173.350	98	7.021	0	31.827	7.857
3	186.536	37	2.518	0	17.628	30.219
4	473.013	22	1.277	0	3.831	122.605
Total	914.018	205	25.052	3.942	57.009	160.681

Fuente: Elaboración propia

Debido a que el banco de este sector se estima en base a un factor de carga de refrigerante por superficie, no fue posible obtener información con respecto a la recarga. Sin embargo, por sus características, se propone considerar una tasa de entre 7 y 25% (IPCC, 2006).

11.2.3 Sector pesquero y acuícola

Para el sector pesquero y acuícola se revisaron los inventarios de Chávez & Pérez (2020) y de Pérez & Caro (2023). El primero se enfoca en las empresas procesadoras de las líneas de producción L2 (fresco y refrigerado) y L3 (congelado), presentes entre la Región de los Lagos y la Región de Magallanes y la Antártica Chilena. El segundo inventario, realizado por Pérez & Caro (2023), dedica sus esfuerzos a las mismas líneas de producción, pero desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Magallanes y la Antártica Chilena, abarcando todo el territorio nacional.

En ambos inventarios, la metodología principal consistió en identificar y contactar a las principales plantas de producción. Chávez & Pérez (2020) realizan una estratificación según capacidad productiva, bajo el supuesto de que los equipos y por lo tanto cargas de refrigerantes pueden ser diferentes según el estrato. En cada región, se definieron tres o cuatro estratos, dependiendo de la concentración de producción entre las plantas. Así se obtiene el estrato Superior, Medio Alto, Medio Bajo e Inferior. En total, se contabilizan 191 plantas al 2018 autorizadas por el SERNAPESCA, 146 pertenecientes a la Región de Los Lagos, 32 son de la Región de Magallanes y la Región de Aysén cuenta con 13 plantas.

Chávez & Pérez (2020) mencionan que dos de sus problemáticas al realizar el estudio fueron la baja tasa de respuesta y la alta dispersión en la cantidad de refrigerante entre empresas, aun

cuando se tienen equipos equivalentes. Lo anterior se debe a que cada empresa presenta necesidades especiales respecto a espacio, existiendo una diferencia entre metros lineales de tubería de equipos de refrigeración por empresa, en donde estos metros adicionales requieren ser llenados con refrigerante provocando esta desviación por empresas similares en capacidad de producción.

Para solucionar el problema planteado, los autores deciden utilizar el Teorema del Límite Central (TLC), usando el *Bootstrap*, el cual definen como una técnica no paramétrica de remuestreo aleatorio intensivo. Los resultados de la carga y la recarga de refrigerante se muestran en la Tabla 11-53 y Tabla 11-54, respectivamente.

Tabla 11-53 Banco de refrigerante por región en el sector de acuicultura

Región	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-407C (kg)	R-507A (kg)	R-22 (kg)	R-717 (kg)
Los Lagos	-	11.286	-	67.180	107.271	629.406
Aysén	7	283	86	8.581	3	15.606
Magallanes y la Antártica Chilena	1.587	571	-	3.685	1.155	116.331
Total	1.594	12.140	86	79.445	108.428	761.343

Fuente: Elaboración propia en base a Chávez & Pérez (2020).

Tabla 11-54 Recarga de refrigerante por región en el sector de acuicultura

Región	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-407C (kg)	R-507A (kg)	R-22 (kg)	R-717 (kg)
Los Lagos	-	4.126	-	12.365	38.271	96.290
Aysén	-	409	-	756	-	-
Magallanes y la Antártica Chilena	-	319	-	1.835	556	27.186
Total	-	4.854	-	14.956	38.927	123.476

Fuente: Elaboración propia en base a Chávez & Pérez (2020).

Luego, Pérez & Caro (2023) toman como antecedente la información entregada por Chávez & Pérez (2020). En Pérez & Caro (2023) abarcan las empresas que van desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Los Lagos. Entre estas regiones se contabilizan un total de 195 empresas, de las que solamente la Región de Arica y Parinacota no presentó plantas. La Región del Bio-Bio fue la que más participación tiene con un total de 70, seguida por la Región de Coquimbo con 39 plantas, y la Región de Valparaíso con 28 plantas procesadoras.

Pérez & Caro (2023), deciden aplicar una técnica de regresión en base a los datos de las encuestas que se obtuvieron. Para esto se asignaron dos grupos de análisis, el primero con plantas hasta 600 toneladas de procesamiento anual y aquellas que tienen más de 1.600 toneladas de

procesamiento. Para el primer grupo se obtuvo una regresión lineal, con un coeficiente de determinación del 75%. Para el segundo grupo se obtuvo una regresión logarítmica con un coeficiente de determinación del 77%. Los resultados se muestran en la Tabla 11-55.

En la Tabla 11-55, las 25 plantas remanentes indicadas son plantas para las cuales no se tienen los datos necesarios para caracterizarlas, por lo que se estimó un promedio simple entre el nivel de procesamiento más alta del grupo de menor a 600 toneladas y la menor del grupo de mayor a 1.600 toneladas.

Tabla 11-55 Cantidad de refrigerante total a nivel nacional en sector acuicultura

Plantas	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-507A (kg)	R-22 (kg)	R-717 (kg)
Plantas a nivel nacional	1.767	2.958	72.534	10.160	677.299
25 plantas remanentes	-	690	23.960	-	-
Total	1.767	3.648	96.494	10.160	677.299

Fuente: Elaboración propia en base a Pérez & Caro (2023).

Respecto a la tasa de recarga anual, según los resultados que obtuvieron los autores con las encuestas, se estima en un 17% del total de refrigerante para este sector. Los datos de la recarga se muestran en la Tabla 11-56.

Tabla 11-56 Recarga total de refrigerante en el sector de acuicultura

Plantas	HFC-134a (kg)	R-404A (kg)	R-507A (kg)	R-22 (kg)	R-717 (kg)
Plantas a nivel nacional	124	828	7.253	2.235	94.822
25 plantas remanentes	-	193	2.396	-	-
Total	124	1.021	9.649	2.235	94.822

Fuente: Elaboración propia en base a Pérez & Caro (2023).

Se puede notar una gran diferencia entre los resultados expuestos por Pérez & Caro (2023) y Chávez & Pérez (2020). De hecho, los primeros autores realizan un inventario a nivel nacional con bancos de entre 1.767 y 677.299 kg de HFC-134a y R-717, respectivamente, versus un inventario para tres regiones en donde se obtiene un banco de entre 1.594 y 761.343 kg para los mismos refrigerantes.

Pérez & Caro (2023) explican estos resultados y mencionan que, al realizar un análisis de regresión, no supone cargas iguales por plantas, si no que se encuentran directamente vinculadas a la cantidad de producción, en cambio, Chávez & Pérez (2020), al realizar la estratificación, las

empresas que caen dentro de un mismo estrato, pero que tienen el nivel más inferior de producción se le está asignando el mismo nivel de producción a la empresa que tiene la mayor producción dentro del mismo estrato, por ende se le está considerando el mismo nivel de carga, lo que implicaría un sobredimensionamiento de las empresas con menor nivel productivo.

11.2.4 Climatización grandes superficies comerciales

La revisión de este sector se basó en el inventario realizado por Santander (2023), el cual lo divide en los subsectores de hoteles, aeropuertos, *strip center*, centros comerciales y malls, y centros asistenciales. Estos últimos no son considerados dentro de la revisión de esta sección, debido a que son analizados en la sección siguiente (Sección 11.2.5).

11.2.4.1 Hoteles

Para este subsector, como parte de la metodología utilizada por Santander (2023), se obtiene la superficie total para luego asociar algún tipo de sistema con sus respectivas características, entre ellos la cantidad y tipo de refrigerante. Según el “Reglamento de clasificación, calificación y registro de establecimientos de alojamiento turístico denominados hotel, motel y apart hotel”, del Servicio Nacional de Turismo publicado en el diario oficial en diciembre del 2003, los aires acondicionados son exigibles solo a hoteles de 4 y 5 estrellas. En complemento, la Subsecretaría de Turismo publica estadísticas periódicas del sector, contando con la cantidad de hoteles, habitaciones y camas. Se contabilizan un total de 1.732 hoteles que deberían contar con climatización, alcanzando una superficie total para los años 2019-2020 de 1.721.092 m². Con lo anterior, y en base a información real de hoteles en conjunto con la de proyectistas se llega a un valor medio de potencia por unidad de superficie de 10,1 m²/kW, y la relación de potencia y la masa de refrigerante es de 4,1 kW/kg, por lo que se tienen 0,024 kg/m². Los datos de refrigerante en el subsector hoteles se encuentra en la Tabla 11-57.

Tabla 11-57 Cantidad de refrigerante en el subsector hotelero a los años 2019-2020 (kg), sector climatización grandes superficies comerciales

Refrigerante	Banco de refrigerante (kg)
HFC-134a	19.119
R-410A	47.480

Fuente: Elaboración propia en base a Santander (2023).

11.2.4.2 Aeropuertos

En Chile actualmente se cuenta con 16 aeropuertos, pero en el caso del Aeropuerto Arturo Merino Benites se consideran los 2 terminales que operan, por lo tanto, en total son 17 establecimientos. Para obtener la masa de refrigerante, se utilizan dos opciones, la primera consiste en obtener la masa a partir de un factor de superficie por unidad de capacidad de frío

utilizada, la segunda opción corresponde a que, para el uso de Chiller, los proveedores conocen la masa de refrigerante necesaria para cada kW de capacidad de refrigeración independiente del tipo de refrigerante, en el inventario de Santander (2023) utiliza ambas opciones.

Con lo anterior, se conoce que la potencia media por unidad de superficie es $7,2 \text{ m}^2/\text{kW}$, y la relación entre la potencia y masa de refrigerante es de $4,58 \text{ kW/kg}$, obteniendo un factor de $0,03 \text{ kg/m}^2$ para el subsector de aeropuertos. En la Tabla 11-58 se muestra la distribución de refrigerantes en el subsector aeropuertos.

Tabla 11-58 Cantidad de refrigerante en el subsector aeropuertos al 2019 (kg), sector climatización grandes superficies comerciales

Refrigerante	Banco de refrigerante (kg)
R-22	1.301
HFC-134a	8.306
R-410A	364
R-407C	217
Total	10.188

Fuente: Elaboración propia.

11.2.4.3 Strip center, centros comerciales y malls

Para obtener los datos necesarios de este subsector, Santander (2023) consultó información entregada por la Cámara Chilena de Centros Comerciales, la que informa que existen 278 centros comerciales en el país, lo que corresponde a $4.437.289 \text{ m}^2$ y que corresponde a la suma de espacios alquilables y estacionamientos, de los cuales solo el primero se asume climatizado.

Para conocer la masa de refrigerante por superficie, se considera la revisión de diferentes fuentes como entrevistas a CENCOSUD, especialistas de equipos en sistemas de refrigeración y climatización, y proyectistas. Con esto, se tiene una potencia media por unidad de superficie de $6,5 \text{ m}^2/\text{kW}$ y la relación entre la masa y potencia del refrigerante es $3,5 \text{ kW/kg}$, por lo que se obtiene un factor de masa por unidad de superficie de $0,044 \text{ kg/m}^2$. En la Tabla 11-59 se exponen los resultados, en donde es resulta importante destacar que el único refrigerante presente en este subsector es el HFC-134a.

Tabla 11-59 Banco de refrigerante subsector strip center, centros comerciales y malls (kg), sector climatización grandes superficies comerciales

Refrigerante	Banco de refrigerante (kg)
HFC-134a	190.802

Fuente: Elaboración propia.

Cabe notar que, debido a que, para estos subsectores, la metodología se basó en la estimación de una carga de refrigerante por superficie, no fue posible obtener información sobre la recarga.

Sin embargo, en base a los antecedentes entregados por el IPCC (2006), se recomienda asumir tasas de mantención de entre 1 y 10%.

11.2.5 Hospitales y recintos de atención primaria

Con el fin de caracterizar el sector de hospitales, se consultó el informe de Clarke C. (2023). Inicialmente, la metodología ideada por el autor consistía en realizar entrevistas que permitiera caracterizar el sector y estimar la carga. Sin embargo, según se menciona, no se obtuvo un número representativo para caracterizar de manera confiable el sector, por lo que se optó por utilizar la estimación de refrigerante por superficie construida, y utilizar el resultado de las encuestas para conocer la distribución de los refrigerantes según su tipo.

El valor de carga de refrigerante por superficie se obtuvo a partir de los datos de fabricantes de equipos utilizados en este rubro. El resultado de esta revisión indica que la carga se encuentra entre 0,035 a 0,052 kg/m². Los datos de la superficie construida se obtuvieron a partir del informe de la Cámara Chilena de la Construcción CChC, “Infraestructura crítica para el Desarrollo”, estimaciones 2014-2018, 2014-2023. Con lo anterior se tiene la superficie de salud de atención primaria al 2013 y la superficie de recintos de salud hospitalarios al 2018. La superficie se procede a multiplicar por 0,052 kg/m² y se obtiene la cantidad de refrigerante total. Para la distribución de los refrigerantes, se obtiene dado la proporción respecto a las encuestas (muestra de 42), en donde se tiene la siguiente distribución que se muestra en la Tabla 11-60.

Tabla 11-60 Distribución por refrigerantes, sector hospitales

Refrigerante	Distribución (%)
R-410A	79%
R-22	11%
HFC-134a	4%
R-407C	2%
R-32	2%
Sin Información	2%

Fuente: Elaboración propia

Con lo anterior se pueden generar la Tabla 11-61 y la Tabla 11-62, en las que se muestra la cantidad de refrigerante según la superficie de salud de atención primaria al 2013 y la cantidad de refrigerante según la superficie de recintos de salud hospitalarios al 2018 respectivamente.

Tabla 11-61 Cantidad de refrigerante por superficie de atención primaria al 2013 (kg), sector hospitales

Refrigerante	Carga instalada (kg)
R-410A	27.933
R-22	3.889
HFC-134a	1.414
R-407C	707
R-32	707
Sin Información	707

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11-62 Cantidad de refrigerante por superficie de recintos de salud hospitalario al 2018 (kg), sector hospitales

Refrigerante	Carga instalada (kg)
R-410A	133.606
R-22	18.603
HFC-134a	6.765
R-407C	3.382
R-32	3.382
Sin Información	3.382

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que, al utilizar la metodología de cantidad de refrigerante por superficie, no se logra abarcar la cantidad de recarga que existen en los equipos. Sin embargo, en base a los antecedentes recopilados tanto en el inventario sectorial de Clarke C. (2023), como en las entrevistas realizadas (Ver Anexo Digital – Entrevista ID 16), en donde se indica que en estos establecimientos la principal aplicación es climatización, se recomienda usar una tasa de entre el 1 y el 10% (IPCC, 2006).

11.2.6 Sector minero

Para el sector minero se consultó el inventario realizado por Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023), en el “Estudio de uso de refrigerantes HFC en el sector minería en Chile el año 2020”, el que cuantifica la cantidad de refrigerante usado en tres aplicaciones dentro de la minería del cobre, los que corresponden a climatización de equipamiento minero, climatización en espacios habitables y climatización en salas eléctricas. Dependiendo del subsector, se realizaron algunos supuestos y modificaciones para poder representar al sector minero completo, no solo aquel dedicado al cobre.

11.2.6.1 Climatización de cabinas en equipamiento minero

Este corresponde el subsector con el mayor grado de confiabilidad respecto a la estimación de HFC, ya que los datos obtenidos se encuentran basado en el Catastro de Equipamiento Minero (CEM), consistente en un inventario completo de la maquinaria utilizada en minería y

representativo de un 80% del mercado minero. Este Catastro contiene información detallada sobre la maquinaria, como, por ejemplo, el modelo, marca y tipo de maquinaria, lo que permitió a las autoras asignar una carga de refrigerante por cada maquinaria.

En este inventario se obtuvo el promedio de carga de refrigerante por maquinarias con cabina a partir del manual de especificaciones de Caterpillar (2005) y otros antecedentes. En complemento con la base de datos recién mencionada, se realizaron dos ajustes a los datos para poder representar la minería del cobre. Los supuestos se citan a continuación.

- Se utiliza un factor de 0,366 que representa la fracción de producción de cobre con respecto al total de producción mineral en Chile en 2020. El motivo es que las empresas de servicios no solo proveen a la minería del cobre, sino que incluye al resto de la minería del país.
- Dado que el sector de la minería caracterizado por el CEM representa al 80% del total, se asume que el 20% restante se comporta de igual manera, por lo que se puede extrapolar para el universo del sector minero.

Lo anterior arroja un total de HFC- 134a de 9.726 kg, sin embargo, como en el presente estudio se requiere conocer toda la industria minera, no se utiliza el primer supuesto mencionado para estimar solo la minería de cobre; otra manera de decirlo es que se reemplaza ese factor de ponderación por 1. Respecto al segundo supuesto, este sí se utiliza ya que se busca caracterizar el total del sector minero. En base a lo anterior, se muestra la cantidad de refrigerante presente en este subsector en la Tabla 11-63.

Tabla 11-63 Cantidad de refrigerantes en el subsector de climatización de cabinas de maquinaria, sector minería

Refrigerante	Banco de refrigerante (kg)
HFC-134a	11.566

Fuente: Elaboración propia.

Para estimar la recarga de refrigerante en maquinarias se usa la información entregada por las empresas entrevistadas que permitió estimar una tasa de recambio entre 0,816 y 3,9 kg de refrigerante anual. Considerando un total de 4.109 máquinas, se tiene un rango de recarga que va desde los 3.352 kg a 16.041kg adicionales para mantención en climatización de cabinas para las maquinarias. Lo anterior se refleja en la Tabla 11-64.

Tabla 11-64 Recarga de refrigerantes en el subsector de climatización de cabinas de maquinaria, sector minería

Refrigerante	Recarga de refrigerante (kg/año)
HFC-134a	3.352 -16.041

Fuente: Elaboración propia en base a Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023).

En cuanto a la dsitribución de empresas mineras y servicios a la minería según la sumatoria de cargas alojadas en sus respectivos equipos mineros, es posible notar que estas se concentran en cargas que suman menos de 20 kg en total, mientras que hay un número importante que suman más de 300 kg.

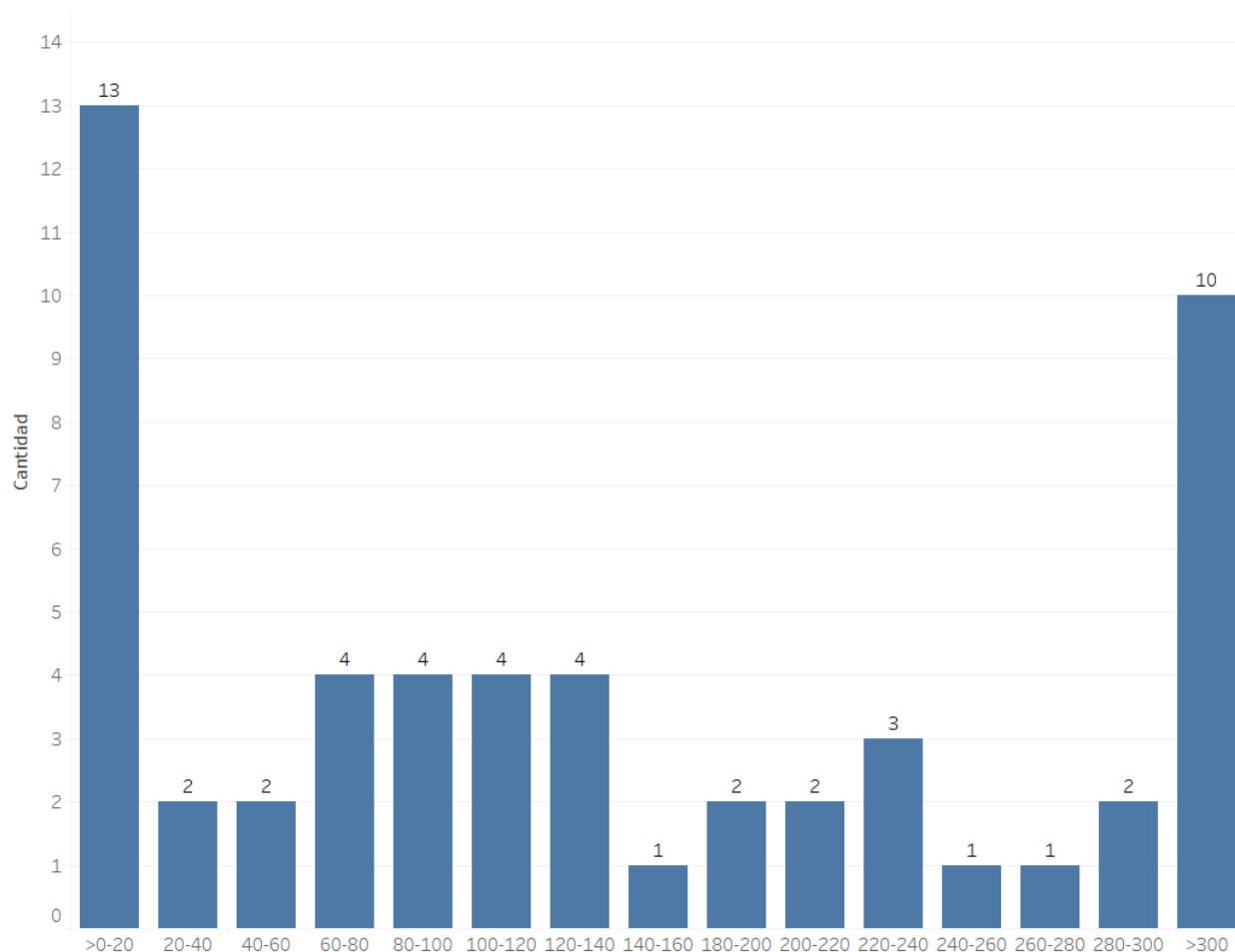


Figura 11-1 Distribución de empresas mineras o de servicios a la minería por carga agregada en equipamiento minero (kg de HFC 134a).

Fuente: Elaboración propia

11.2.6.2 Climatización en espacios habitables

La metodología para la estimación de refrigerante en este subsector se basa principalmente en la información obtenidas por entrevistas. Isuvent menciona que utiliza equipos de climatización entre 9.000 a 12.000 BTU. Tecnofast indica que poseen en cada módulo de campamento un sistema de climatización, en donde aproximadamente son de 15 m², lo que requiere 9.000 BTU. Un equipo de 9.000 BTU, contiene 800 gramos de refrigerantes, por lo que considerando la cantidad de espacios habitables se puede obtener la carga total. Se menciona en el inventario que no resulta posible la distinción sobre el refrigerante que se utiliza en estos sistemas climatizados. Considerando que los posibles refrigerantes son R-410A o R-407C y en base a la información recopilada en las entrevistas realizadas en el sector de minería, se establece que existe un cambio de refrigerante desde el R-407C al R-410A (ver Anexos Digitales – Entrevista ID 6), por lo que se considera solo el R-410A en la cuantificación para este informe. La cantidad total en este subsector se muestra en la Tabla 11-65.

Tabla 11-65 Recarga de refrigerantes en el subsector de climatización en espacios habitables, sector minería

Refrigerante	Recarga de refrigerante (kg)
R-410A	45.780

Fuente: Elaboración propia en base a Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023).

En este subsector no fue posible determinar tasas de mantención, sin embargo, en función de lo recomendado por el (IPCC, 2006) se sugiere considerar tasas de entre 1 y 10%.

11.2.6.3 Climatización salas eléctricas

De acuerdo con la información recopilada por Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023), a partir de diversas entrevistas realizadas a empresas prestadoras de servicios al sector minero, asumen que cada máquina o motor de una máquina requiere de una sala eléctrica, por ende, se puede estimar que son 7.514 salas eléctricas. En complemento, con la misma información que recopilaron las autoras, se tiene que un sistema de climatización de 60.000 BTU requiere 2 kg de refrigerante, un equipo de 36.000 BTU tiene 3 kg de refrigerante y uno de 18.000 BTU posee 1,5 kg de refrigerante. Al igual que en el caso de la climatización en espacios habitables no se pudo distinguir el refrigerante utilizado entre R-410A o R-407C; por lo explicado en esa misma sección se asume que el refrigerante predominante es R-410A. La carga de refrigerante instalada se encuentra en la Tabla 11-66.

Tabla 11-66 Carga de refrigerantes en el subsector de climatización en salas eléctricas

Refrigerante	Carga de refrigerante (kg)
R-410A	6.011-15.028
Total	6.011-15.028

Fuente: Elaboración propia en base a Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023).

Cabe mencionar que de acuerdo con nuevos antecedentes recopilados en el marco de este estudio (ver Anexos Digitales – Entrevista ID 6), existen salas eléctricas que requieren de potencias mucho mayores a las estimadas por Madrazo-Ortega & Morandé-Thompson (2023), del orden de entre 300 mil a 3.000 mil BTU por cada sistema, por lo que es posible que el inventario haya sido subestimado. En base a esta información, se determinó que posiblemente los equipos que predominan en este subsector de la minería sean mayoritariamente Tipo III. En cuanto a la recarga de este subsector, no fue posible determinar la tasa de mantención, por lo que se recomienda asumir tasas de entre 7 y 25% (IPCC, 2006).

11.2.7 Supermercados

Para caracterizar el sector de supermercados se consultaron los inventarios elaborados por (GAET, 2023) y ATS Energía (2020). Para la clasificación de los establecimientos asociados a este rubro, se utiliza la clasificación propuesta por ATS Energía (2020):

- Hipermercados: tienen una superficie sobre los 4.500 m².
- Supermercados: superficie entre 400-2.500 m² o mayores con límites menores a 4.500 m².
- Tiendas de conveniencia: superficie inferior a 400 m².

Para el cálculo de la cantidad de refrigerante se utilizó la misma metodología y supuestos que en la sección de Centros de distribución, en donde se establece un factor 0,33 kg/m² por supermercado y un porcentaje de 24,16% que representa la superficie refrigerada con respecto al total de la superficie de supermercados. La Tabla 11-67 muestra la distribución de refrigerantes dentro del sector de supermercados.

Tabla 11-67 Participación de cada refrigerante en el banco, sector supermercados

Refrigerante	Participación en el banco (%)
R-404A	23,03%
R-22	26,82%
R-410A	0,83%
R-507A	49,19%
HFC-134a	0,04%
R-407C	0,09%

Fuente: Elaboración propia en base a GAET (2023).

Se puede establecer el banco total del sector supermercado considerando la superficie construida hasta el año 2020. En la Tabla 11-68 se muestra el banco total por refrigerante.

Tabla 11-68 Banco de refrigerantes, sector supermercados

Refrigerante	Participación en el banco (%)
R-404A	53.409
R-22	62.200
R-410A	1.919
R-507A	111.026
HFC-134a	95
R-407C	202
CO ₂	4.688

Fuente: Elaboración propia en base a GAET (2023).

En el caso de supermercados, se cuenta con distintos antecedentes para la recarga. Estos datos son analizados en la sección correspondiente a la categoría en la que se clasifica (Sección 4.1.8).

11.2.8 Sector naviero

Existen dos inventarios que abordan el sector naviero, ambos elaborados por Lescani pero con dos años de diferencia, uno en 2020 y el último en 2022. A pesar de la existencia de este último, en este informe se considera el inventario elaborado en 2020, debido a su completitud. Este inventario identifica cuatro subsectores: armada, pesca de altamar, barcos factoría y marina mercante. A continuación, se explica la metodología y los resultados por cada sector.

11.2.8.1 Armada

En la elaboración del inventario sectorial, en base a los antecedentes recopilados por Lescani (2020), se determinó que cada Unidad naval o marítima cuenta con tres plantas. Además, se tiene el antecedente de que es obligatorio en la Armada de Chile que exista como reserva la misma cantidad de refrigerante presente en los sistemas. Esto permite obtener la cantidad de refrigerante por unidad naval.

Los datos que se obtuvieron del sector de la armada se basan principalmente en la información entregada por la Armada de Chile, la que se obtuvo a de historiales, certificados e informes técnicos que se generaron durante la mantención en sistemas de refrigeración y climatización en astilleros y maestranzas entre el 2016 al 2018. En complemento a lo anterior, se realizaron entrevistas a personas con vasta experiencia en el campo de los refrigerantes, proveedores y clientes.

La metodología consiste en contabilizar la cantidad de refrigerante usados en refrigeración y climatización, dentro de las cuales están las plantas de agua enfriadas Chiller, aires acondicionados de expansión directa, cámaras frigoríficas y refrigeradores domésticos. Por otro lado, como antecedente, Lescani (2020) entrega la respuesta al Oficio Público O.T.A.I.P.A. N°12900/97 C.S.E solicitado a la Armada de Chile, en el que se da a conocer lo siguiente:

- Se cuenta con 49 unidades navales y marítimas que cuentan con equipos o sistemas de aire acondicionado o refrigeración.

- En cuanto a las plantas de aires acondicionado y plantas de refrigeración, cada una emplea uno de los gases y cantidades presentados en la Tabla 11-69.

Tabla 11-69 Alternativas de cantidad de refrigerante en cada unidad naval

Sistema	R-22 (kg)	R-404A (kg)	HFC-134a (kg)
Climatización ⁽¹⁾	132	164	164
Refrigeración ⁽²⁾	39	39	39

(1) Cada unidad naval utiliza en sus plantas de aire acondicionado uno de los gases y cantidades indicados.

(2) Cada unidad naval utiliza en sus plantas de refrigeración uno de los gases y cantidades indicados.

Fuente: Elaboración propia a partir del Oficio Público O.T.A.I.P.A. N°12900/97 C.S.E de la Armada de Chile

Luego, con el fin de estimar la cantidad de refrigerante total alojada en las unidades navales, el equipo consultor, al no conocer la distribución de los refrigerantes mencionados en la Tabla 11-69 entre las 49 embarcaciones, se asume una distribución proporcional para obtener la Tabla 11-70.

Tabla 11-70 Cantidad total de refrigerante en Unidades Navales (kg), subsector armada

Sistema	R-22 (kg/unidad naval)	R-404A (kg/unidad naval)	HFC-134a (kg/unidad naval)	R-22 (kg)	R-404A (kg)	HFC-134a (kg)
Climatización	264	328	328	12.936	16.072	16.072
Refrigeración	78	78	78	3.822	3.822	3.822
Total	342	406	406	16.758	19.894	19.894

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar, que los resultados discrepan de manera significativa a lo obtenido por Lescani (2020) para el subsector de Armada. Lo anterior se debe a que, en el presente estudio, los antecedentes recopilados por Lescani (2020) son agregados de forma que el total estimado represente la cantidad total de refrigerante contenido en las 49 embarcaciones antes mencionadas. Para poder estimar este total fue necesario tomar como supuesto una distribución homogénea de los refrigerantes identificados.

En cuanto a la recarga, en este subsector no fue posible obtener información. Además, dadas las características de este, para efectos de proponer una tasa de emisión durante la operación (o tasa de fuga) en base a las estimaciones del IPCC (2006), se podría considerar que las embarcaciones se comportan tanto como aire acondicionado y refrigeración comercial, por su aplicación en el almacenamiento de víveres para uso de la tripulación, por lo que podría presentar tasas de fuga de entre 10 a 35%, dependiendo de la aplicación.

11.2.8.2 Barcos de pesca de altamar

En el subsector de la pesca de altamar, la información se obtuvo a partir del Cuarto Inventario de Gases de Efecto Invernadero, de la Organización marítima internacional (Fourth IMO GHG Study

2020–Final report), en el cual se indica que para sistemas de climatización se usan 150 kg de refrigerantes y 10 kg de refrigerantes para la conservación de víveres por embarcación. En el estudio de Lescani (2020) se consideraron solo las embarcaciones pesqueras con Toneladas de Registro Grueso (TRG) mayores a 50, por lo que al 2019 se contabilizan 105 embarcaciones en donde cada una cuenta con una bodega. Los refrigerantes se distribuyen de la siguiente forma dentro de la embarcación: para climatización se utiliza R-410A, para la refrigeración de víveres se usa HFC-134a y para el almacenamiento en bodegas se utiliza R-404A, R22 y R-717. La distribución de carga por refrigerante se encuentra en la Tabla 11-71.

Tabla 11-71 Cantidad de refrigerantes en pesca de altamar al 2019 (kg), subsector pesca de altamar

Refrigerante	Banco de refrigerante (kg)
R-22	90.000
HFC-134a	1.050
R-717	560.000
R-410A	15.750
R-404A	100.000

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior, no fue posible obtener tasas de recarga para este subsector. Sin embargo, se identifican aplicaciones en climatización, refrigeración comercial para almacenamiento de víveres y transporte refrigerado para almacenamiento de la pesca. Por lo que, según el IPCC (2006), podría tener tasas de fuga de entre 10% y 50%.

11.2.8.3 Barcos factoría

Los datos utilizados por Lescani (2020) para la estimación del inventario de este subsector se obtienen desde los registros del Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA), que indican que al año 2019 operaron 12 barcos factoría. Se utiliza el mismo supuesto utilizado en la pesca de altamar, es decir, 150 kilos de refrigerante por climatización y por conservación de víveres se utilizan 10 kg de refrigerante. Para la refrigeración de víveres, debido a que se usa tanto HFC-134a como R-404A, pero se desconoce en qué medida cada uno, se reporta el banco de manera en conjunta bajo la notación HFC-134a-R-404A. Los datos de los barcos factoría se muestran en la Tabla 11-72.

Tabla 11-72 Cantidad de refrigerantes en barcos factoría al 2019 (kg), subsector barcos factoría

Refrigerante	Banco de refrigerante (kg)
R-22	17.280
HFC-134a	Sin Información
R-717	60.000
R-410A	1.800
R-507A	1.200
R-404A	8.000
HFC-134a-R-404A*	120

* En la refrigeración para víveres no se distingue entre R-404 y HFC-134a, por lo que se reportan en conjunto.

Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente, en este subsector no fue posible obtener información sobre la recarga, y de forma similar al caso anterior, se podrían esperar tasas de entre 10 y 35%.

11.2.8.4 Marina mercante

Al año 2019 se contabilizan 258 embarcaciones según el boletín estadístico de Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) (Lescani, 2020). Para la estimación se asume la misma carga que anteriormente para climatización y refrigeración de víveres, además se obtiene información desde los informes anuales elaborados por la DIRECTEMAR “Análisis de Estadísticas Portuarias” años 2018 y 2019. Lescani (2020) menciona que en este subsector también se utilizan remolcadores, cuya función principal es brindar apoyo logístico en diversas maniobras, como el reabastecimiento de víveres y agua. Además, en caso de que un barco pesquero sufra una falla en su sistema de propulsión, los remolcadores se encargan de llevarlo a un astillero para que se repare el problema. Estos remolcadores están equipados con maquinaria para la conservación de alimentos, que incluye pequeñas cámaras de refrigeración y congelación, en su mayoría operando con los refrigerantes R-404A y HFC-134a. En base a lo anterior, para el subsector marina mercante se tiene la Tabla 11-73 que representa la cantidad de refrigerante presente.

Tabla 11-73 Cantidad de refrigerantes en marina mercante al 2019 (kg), subsector marina mercante

Refrigerante	Banco de refrigerante (kg)
R-22	Sin Información
HFC-134a	Sin Información
R-717	Sin Información
R-410A	65.300
R-507A	Sin Información
R-404A	Sin Información
HFC-134a-R-404A	4.740
Total	70.040

Fuente: Elaboración propia.

En los barcos de marina mercante se identifican aplicaciones en climatización, refrigeración comercial para almacenamiento de víveres y transporte refrigerado para almacenamiento de la pesca. Por lo que, según el IPCC (2006), podría tener tasas de fuga de entre 10% y 50%.

11.3 Recarga estimada en base a la revisión de inventarios sectoriales

Tabla 11-74 Recarga estimada en base a inventarios sectoriales (kg HFC), tasa de fuga y equivalencia en toneladas de CO₂eq (AR4)

Sector	HFC-134a	R-404A	R-410A	R-32	R-407C	R-438A	R-507	Total CO ₂ eq en recarga (ton)
Hortofrutícola	N.E. ²⁵	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	38.284	197.170
Armada	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Pesca de altamar	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Barcos factoría	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Marina mercante	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Acuícola	124	1.021	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	9.649	5.292
Industria Láctea Mayor	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	900	5.292
Industria Láctea Menor	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Productores primarios	N.E.	1.750	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	6.961
Recintos de salud de atención primaria	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Recintos de salud hospitalarios	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Industria vitivinícola	1.353	N.E.	7.010	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	20.241
Sector Helados	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	3.000	11.955
Faenadoras	54	3	N.E.	N.E.	264	N.E.	1.112	6.464
Frutas y hortalizas congeladas	N.E.	970	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	5.068	28.498
Carne de cerdo y ave	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	211	8.618
Cecinas	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	1.458	8.824
Centro de distribución Tramo 1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Centro de distribución Tramo 2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Centro de distribución Tramo 3	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Centro de distribución Tramo 4	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Supermercados	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Malls	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Hoteles	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Aeropuertos	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-

²⁵ N.E.: No Estimado.

Sector	HFC-134a	R-404A	R-410A	R-32	R-407C	R-438A	R-507	Total CO2eq en recarga (ton)
Equipamiento minero	9.697	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	13.867
Espacios habitables minería cobre	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-
Salas eléctricas minería cobre	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	-

Fuente: Elaboración propia

11.4 Detalle de registros para el Reglamento UE 573/2024

- Registros de operadores de aparatos: los operadores de aparatos sujetos a control de fugas deben mantener registros detallados de:
 - Cantidad y tipo de gases en el aparato, incluyendo la cantidad añadida durante la instalación.
 - Cantidades añadidas durante el mantenimiento o debido a fugas, con la fecha de cada adición.
 - Cantidad de gases recuperados.
 - Información sobre gases reciclados o regenerados, incluyendo nombre y dirección del centro de reciclado o regeneración.
 - Identidad de la empresa que realizó la instalación, mantenimiento, revisión, recuperación, reparación o desmantelamiento, incluyendo número de certificado.
 - Fechas y resultados de los controles de fugas y reparaciones.
 - Medidas tomadas para recuperar y eliminar gases en caso de desmantelamiento del aparato.
- Conservación de registros:
 - Si no se almacenan en una base de datos oficial, los operadores deben conservar estos registros por al menos cinco años. Las empresas que realicen actividades de mantenimiento también deben conservar copias de estos registros por cinco años.
- Registros de empresas que suministran gases fluorados:
 - Deben registrar información sobre los compradores de gases fluorados, incluyendo el número de certificado y las cantidades compradas. Estos registros deben conservarse por al menos cinco años y estar disponibles para las autoridades.
- Registros de ventas de aparatos no sellados:
 - Las empresas que vendan aparatos no sellados cargados con gases fluorados deben registrar los detalles de las ventas y de las empresas certificadas que realicen la instalación. Estos registros también deben conservarse por cinco años.
- Registros de producción y suministro: las empresas que produzcan, suministren o reciban gases fluorados para usos exentos deben llevar registros que incluyan:
 - Nombre de la sustancia o mezcla.
 - Cantidad producida, importada, exportada, regenerada o destruida durante el año.

- Cantidad suministrada y recibida, junto con los nombres y datos de contacto de los proveedores o receptores.
- Cantidad utilizada y almacenada durante el año, especificando su uso.
- Conservación de estos registros:
 - Los registros deben conservarse por cinco años después de la producción, suministro o recepción, y estar disponibles para las autoridades competentes, que deben garantizar la confidencialidad de la información.

11.5 Datos oficiales de la CChRyC sobre las personas certificadas

Tabla 11-75 Resumen sobre datos oficiales de personas certificadas

Perfil	Hombres	Mujeres	Total
Instalador(a)/Mantenedor(a) de Equipos de Climatización y Refrigeración	831	22	853
Instalador(a) de Sistemas de Climatización	112	2	114
Instalador(a) de Sistemas de Refrigeración	86	2	88
Mantenedor(a) de Sistemas de Climatización	0	0	0
Mantenedor de Sistemas de Refrigeración	0	0	0
Operador de Sistemas de Refrigeración con Amoníaco	2	0	2
Instalador y Mantenedor de Sistemas de Refrigeración Comercial	65	0	65
Total	1.096	26	1.222

Fuente: Elaboración propia.

11.6 Progresión normativa europea

De acuerdo con a una revisión realizada por la Comisión Europea para la Acción Climática (European Commission: Directorate-General for Climate Action et al., 2022) el Reglamento abordó la reducción de emisiones en los equipos y en el manejo al final de su vida útil, lo que ha demostrado ser eficaz, especialmente en el sector de la refrigeración comercial, donde las tasas de fugas han disminuido. Sin embargo, las normativas aplicadas al 2014 solo se aplicaban a los gases fluorados listados en el anexo I, y no a los del anexo II, como el NF3 y otros compuestos, que también presentan riesgos debido a su alto PCG. Aunque el NF3 representa una pequeña parte de las emisiones, podría volverse más significativo debido a su PCG elevado.

Por otro lado, se observó que las emisiones también ocurren en otras fases de la cadena de suministro, como la manipulación de los contenedores de refrigerantes, lo que representa entre el 2% y el 5% del mercado. A pesar de que el Reglamento ha sido eficaz, se identificaron áreas de mejora, principalmente en la aplicación y cumplimiento. Un desafío clave ha sido la lenta adopción de alternativas más ecológicas, como refrigerantes naturales (CO₂, propano, amoníaco), debido a obstáculos regulatorios y la falta de personal capacitado. Aunque ha habido avances en algunos países y programas de formación, la adopción sigue siendo limitada.

Otro problema relevante es el comercio ilegal de HFCs, que elude las cuotas y socava la eficacia del Reglamento. Las importaciones ilegales a menudo se ven facilitadas por controles aduaneros insuficientes y sanciones inadecuadas. Además, el comercio en línea ha complicado la identificación de vendedores ilegales, y algunos países han iniciado medidas para controlar esta actividad, aunque el problema persiste en gran parte de la UE.

Finalmente, se ha detectado un abuso del sistema de asignación de cuotas, donde algunas empresas han creado múltiples filiales para maximizar sus cuotas de importación. A pesar de los esfuerzos regulatorios para frenar esta práctica, aún existen lagunas que facilitan el acceso al mercado a actores sin experiencia en el manejo de gases fluorados, lo que incrementa los riesgos de incumplimiento normativo.

La evaluación del Reglamento sobre gases fluorados encontró que los datos reportados proporcionan una base confiable para monitorear la respuesta de las industrias de la UE a las regulaciones, aunque también se identificaron algunas lagunas y desafíos. El Reglamento cubre los gases fluorados incluidos en los anexos I y II, pero sustancias más recientes, como el sevoflurano y el fluoruro de sulfuro, no están completamente incluidas en las obligaciones de reporte. Además, se carece de información sobre el uso de algunos gases en aplicaciones específicas, como el SF₆ en aceleradores de partículas o ciertos PFC en productos de cuidado personal.

Un problema identificado es que los informes sobre la recuperación de gases fluorados son incompletos, ya que solo las empresas importadoras deben reportar, excluyendo a las que se dedican al reciclaje y regeneración. También se señaló que algunas sustancias alternativas a los HFC, aunque con menor potencial de calentamiento global, pueden tener efectos ambientales negativos que requieren mayor seguimiento.

La verificación de los datos reportados tampoco es uniforme, ya que las directrices actuales no son claras respecto a la calidad de los informes, lo que lleva a variaciones en su formato y calidad. Aunque el número de empresas sujetas a verificación aumentó entre 2015 y 2018, persisten problemas con empresas que reportan menos de 10.000 ton de CO₂ eq., lo que crea lagunas en la verificación obligatoria.

Se encontraron inconsistencias en los umbrales de notificación, lo que ha generado confusión en la industria. Por ejemplo, el umbral de 500 toneladas de CO₂ equivalente para reportar productos precargados no coincide con el de 100 toneladas para la importación de gases a granel. Además, los plazos para presentar los informes de verificación tampoco están alineados con los informes anuales requeridos, lo que genera complicaciones administrativas.

La evaluación del Reglamento de gases fluorados constató un alto nivel de coherencia general con otras normativas de la UE y acuerdos internacionales, aunque se identificaron algunas incoherencias que requieren atención. Se destaca una diferencia con el Reglamento sobre sustancias que agotan el ozono (SAO) en cuanto a la definición de "comercialización", lo que

genera confusión en los controles a lo largo de la cadena de suministro. Mientras que el Reglamento sobre el ozono tiene una definición más amplia, el Reglamento de gases fluorados se enfoca en el primer suministro dentro de la UE, lo que deja una brecha en las regulaciones sobre el control posterior.

A nivel interno, el Reglamento es en su mayoría coherente, pero hay aspectos que necesitan modificaciones para una mejor aplicación. Las partes interesadas señalaron varias definiciones poco claras, lo que afecta la implementación de ciertas disposiciones. Entre ellas se encuentran:

- **Equipos herméticamente sellados:** La falta de precisión sobre válvulas tapadas y puertos de servicio complica la aplicación de exenciones relacionadas con este tipo de equipos.
- **Recipiente no rellenable y Reciclado:** La redacción actual permite eludir el uso de gases fluorados vírgenes con alto PCA mediante el relleno con gases recuperados contaminados.
- **Destrucción y Recuperación:** Las definiciones no distinguen entre destrucción intencional y no intencional, y la definición de recuperación no especifica claramente las etapas del proceso.
- **Mantenimiento o revisión:** Aunque se centra en instalaciones RACHP, debería abarcar otras instalaciones.

También se señaló la falta de claridad en la clasificación de equipos, como "camiones frigoríficos", "aerosoles técnicos" y "equipos precargados", lo que podría dar lugar a la elusión de las prohibiciones de comercialización. Asimismo, la ausencia de una definición para "instalación de regeneración" dificulta diferenciar entre los procesos de reciclaje y regeneración.

En cuanto a las actividades, se identificaron incoherencias en los umbrales de notificación, donde los productos precargados deben reportarse a partir de 500 toneladas de CO₂ equivalente, mientras que los gases a granel a partir de 100 toneladas. Además, hay confusión en los requisitos de registro de gases reciclados o recuperados y en las fechas para reportar las reparaciones de fugas. Se ha propuesto que el refrigerante recuperado solo se use si ha sido reciclado o regenerado adecuadamente, evitando mal funcionamiento y consumo energético adicional.

Finalmente, las autoridades indicaron que deben aclararse algunos artículos, como el control de las importaciones de HFC precargados y la prohibición estricta de comercializar HFC por encima de los límites de cuotas. La expresión "personas físicas debidamente calificadas" también requiere mayor precisión para evitar interpretaciones dispares.

Tabla 11-76 Comparativa de propuesta de consumo para normas internacionales y la Enmienda de Kigali a nivel nacional

Años	Norma US - 2020	Años	Reglamento UE 517/2014	Años	Reglamento UE 573/2024	Años	Regulación SOR/2016-137	Años	Reglamento de Costa Rica	Años	Establecido en Enmienda de Kigali para Chile
2020-2023	90%	2015	100%	2025-2026	24,3%	2019-2023	90%	2024-2028	100%	2029-2034	90%
2024-2028	60%	2016-2017	93%	2027-2030	12,3%	2024-2028	60%	2029-2034	90%	2035-2039	70%
2029-2033	30%	2018-2020	63%	2030-2032	5,2%	2029-2033	30%	2035-2039	70%	2040-2044	50%
2034-2035	20%	2021-2023	45%	2033-2035	4,8%	2034-2035	20%	2040-2044	50%	A partir de 2045	20%
A partir de 2036	15%	2024-2026	31%	2036-2038	3,8%	A partir de 2036	15%	A partir de 2036	20%		
		2027-2029	24%	2039-2041	3,5%						
		A partir de 2030	21%	2042-2044	3,1%						
				2045-2047	2,7%						
				2048-2049	2,4%						
				A partir de 2050	0%						

Fuente: Elaboración propia

11.7 Otros costos compilados

Tabla 11-77 Costos de fiscalización

Medidas de reducción de HFC	Tareas	Temporalidad y unidad	Costo (CLP/año) (al 2017)	Costo (CLP/año) (2024 según variación del IPC)
Sistema de fiscalización y monitoreo	Costo sistema de monitoreo	Anual, por establecimiento	-	\$2.000.000
	Mantenimiento del sistema de fiscalización	Anual	-	\$36.000.000
Costo actividad de fiscalización	Recepción y revisión de informes de fuga	Anual	\$3.000.000	\$4.284.000
	Programa y seguimiento actividades de fiscalización para verificación en terreno de los informes emitidos	Anual	\$1.500.000	\$2.142.000

Fuente: Elaboración propia a partir del AGIES del PDA Coyhaique 2017

Tabla 11-78 Costos de regenerar

Refrigerante	Método	Precio (CLP)
R-22	Disposición final	1.900
HFC-134a	Disposición final	1.900
R-22	Regeneración	3.900
HFC-134a	Regeneración	3.900
R-404A	Disposición final	3.900
R-410A	Disposición final	3.900
R-507A	Disposición final	3.900
R-407A	Disposición final	4.900
Cilindro de recuperación 100 kg	Venta	170.000
Bombona desechable	Disposición final	2.900
Disposición final de equipos de climatización	Disposición final	30.000
Destrucción en Francia	Destrucción	14.900

Fuente: Elaboración propia a partir de entrevistas con técnicos

Tabla 11-79 Costos de mantenciones preventivas y correctivas

Sistema	Rango mantenimiento preventivo (CLP)	Rango mantenimiento correctivo (CLP)
AA	\$50.000	\$120.000
Centralizado	\$400.000	\$1.000.000
Refrigeración	\$400.000	\$1.200.000

Fuente: Elaboración propia a partir de entrevistas con técnicos