

Un marco para estimar los costos incrementales del cambio climático en infraestructura

Jacques Clerc
Manuel Díaz

Departamento de Investigación
y Economista Jefe

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-749

Un marco para estimar los costos incrementales del cambio climático en infraestructura

Jacques Clerc
Manuel Díaz

Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA), Universidad de Chile

Febrero 2016

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo

Díaz, Manuel.

Un marco para estimar los costos incrementales del cambio climático en
infraestructura / Manuel Díaz, Jacques Clerc.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 749)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Climatic changes—Economic aspects. 2. Roads—Environmental aspects—Chile.
3. Roads—Environmental aspects—Bolivia. I. Clerc, Jacques. II. Banco
Interamericano de Desarrollo. Departamento de Investigación y Economista Jefe. III.
Título. IV. Serie.
IDB-TN-749

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2016 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Resumen

El objetivo general del estudio es revisar la literatura internacional y las mejores prácticas para desarrollar un marco metodológico capaz de cuantificar el aumento de las inversiones requeridas para un estándar tradicional de vida en un mundo sujeto a cambio climático. Posteriormente, esta metodología será aplicada en dos casos de estudio: Bolivia y Chile. En particular, el documento presenta una referencia a la economía de la adaptación al cambio climático y expone un resumen de los principales impactos del cambio climático en la infraestructura, según la literatura. Se describen los enfoques metodológicos para cuantificar el impacto del cambio climático en la infraestructura que ha sido seleccionada a partir de la revisión de la información presentada. A base de esto, se presentan los casos de análisis evaluados en el sector carreteras, tanto en Chile como en Bolivia, y el subsector embalses para regadío, evaluado en Chile. Por último, se lleva a cabo la discusión de resultados y se presentan las conclusiones finales.

Códigos JEL: H12, H54, Q47, Q51, Q54

Palabras clave: Cambio climático, Adaptación, Impacto, Costos, Inversiones, Infraestructura, Bolivia, Chile

1. Introducción

El presente documento ha sido elaborado por los profesionales Jacques Clerc y Manuel Díaz, y corresponde al segundo informe del proyecto “Un Marco para Estimar los Costos Incrementales del Cambio Climático en Infraestructura”, para el Banco Interamericano de Desarrollo.

En esta sección se presenta una breve contextualización del estudio y luego se presentan de manera general los contenidos de los capítulos que conforman el presente documento.

1.1 Contextualización del estudio

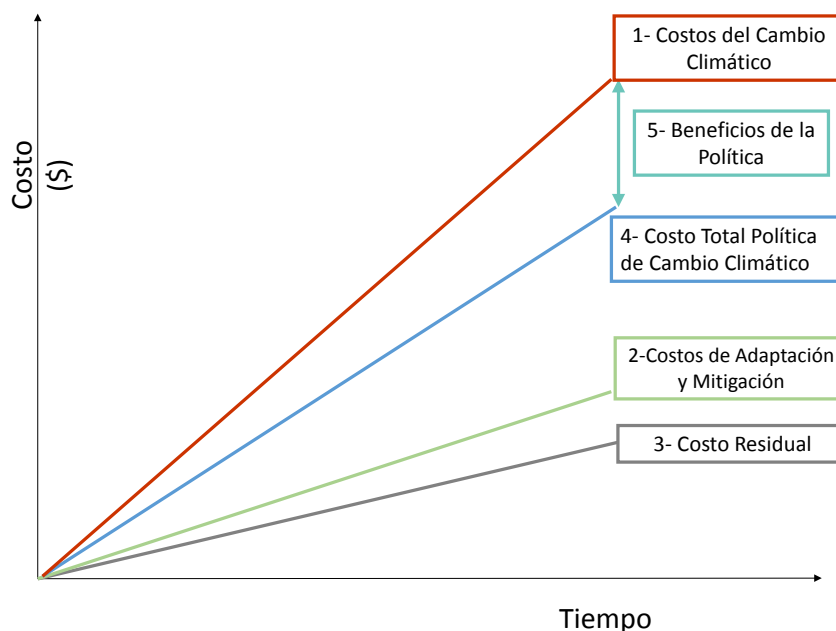
El desarrollo económico y bienestar social no se pueden aislar del fenómeno de cambio climático. Cualquier proceso de planificación de desarrollo eficaz tendrá que tomar el fenómeno en cuenta y, en particular, tendrá que facilitar la adaptación al cambio climático. Los desafíos del cambio climático se han enfrentado con dos estrategias principales. La primera alternativa es adaptarse a los impactos del cambio climático (adaptación). La segunda, reducir las emisiones para frenar el cambio climático y sus impactos (mitigación). Las dos estrategias conllevan costos. La adaptación requiere de recursos privados y públicos; por ejemplo, en sistemas de aire acondicionado y aumento de capacidad de represas. Por otra parte, la mitigación suele asociarse con el uso de tecnologías de abatimiento más caras; por ejemplo, las tecnologías de generación renovable (Dannenberg et al., 2009).

En este contexto, la UNFCCC ha enfatizado la urgencia sobre los temas de adaptación. En la Hoja de Ruta de Bali (UNFCCC, 2007a), se establecieron cuatro líneas estratégicas de trabajo para facilitar un acuerdo vinculante post 2012: mitigación, adaptación, desarrollo y transferencia tecnológica, y financiamiento.

La mitigación y adaptación resultan ser complementarias y no excluyentes en una estrategia comprehensiva del cambio climático. La figura siguiente ilustra los costos del cambio climático y los beneficios y costos de la política en función del tiempo. Se asumen trayectorias crecientes para cada una de las categorías. En la figura se aprecian (1) el costo del cambio climático y sus impactos en un escenario de inacción y sin política de cambio climático (inexistencia de acciones de adaptación y mitigación); (2) los costos de

mitigación y adaptación de las políticas de cambio climático; (3) los daños residuales del cambio climático (costos asociados a impactos que ocurrieron a pesar de las acciones de adaptación y mitigación); y (4) los costos totales de la política (suma de costos residuales y de política). Los beneficios de la política en cada instante resultan ser la diferencia entre los costos del cambio climático (1) y de la política (4). Los beneficios también se presentan en la figura (5).

Figura 1. Costos y beneficios asociados a la política de cambio climático



Fuente: Elaboración propia.

A nivel global, existe entonces un *trade-off* entre mitigación y adaptación, ya que mayor mitigación reduciría los requerimientos de adaptación.

Una política óptima debería considerar conjuntamente adaptación y mitigación, y así minimizar los costos de la adaptación, mitigación y daños residuales. Nordhaus (1991) establece dos condiciones necesarias para caracterizar este mínimo costo. Primero, los costos marginales de reducción de emisiones deben ser iguales a los beneficios marginales de reducción (costos residuales evitados). La segunda condición establece que el nivel óptimo de adaptación se dará cuando los costos marginales igualen los beneficios marginales de adaptación.

Distintos estudios muestran como la infraestructura es uno de los principales costos de la adaptación. A modo de ejemplo, en el cuadro siguiente se presentan los costos que se estiman en UNFCCC (2007b). En este famoso informe, se concluye que el financiamiento total que se necesita para 2030 podría llegar a US\$ 49-171 mil millones por año globalmente. Se destaca que, de lejos, el componente de mayor importancia es la inversión en infraestructura.

**Cuadro 1. Estimación de UNFCCC del costo de inversión anual adicional para cubrir costos de adaptación al 2030
(Billones de dólares por año en moneda constante)**

Sector	Costo Global	Países Desarrollados	Países en Desarrollo
Agricultura	14	7	7
Agua	11	2	9
Salud Humana	5	No estimado	5
Zonas Costeras	11	7	4
Infraestructura	8-130	6-88	2-41
Total	49-171	22-105	27-66

Fuente: UNFCCC (2007b).

1.2 Contenidos del informe

El objetivo general del estudio es revisar la literatura internacional y las mejores prácticas para desarrollar un marco metodológico capaz de cuantificar el aumento de las inversiones requeridas para mantener el estándar “tradicional” de vida en un mundo sujeto a cambio climático. Posteriormente, esta metodología será aplicada en 2 o 3 casos de estudio. Las secciones de este informe son un paso necesario para cumplir con el objetivo de desarrollar una metodología específica y analizar una aplicación de la misma.

Este informe se estructura de forma tal que cuenta con secciones breves pero que permiten al lector obtener una visión general del tema que abarca cada sección. Para complementar y profundizar algunas secciones, se incluyen una serie de anexos que profundizan la discusión o formalizan el contenido tratado en éstos.

En particular, la Sección 2 presenta una referencia a la economía de la adaptación al cambio climático. La Sección 3 presenta un resumen de los principales impactos del cambio climático en la infraestructura, según la literatura. En la Sección 4 se describen los

enfoques metodológicos usados para cuantificar el impacto del cambio climático en la infraestructura, los cuales han sido seleccionados a partir de la revisión de la literatura. En la Sección 5 se presentan los casos de análisis evaluados en el sector de carreteras, tanto en Chile como en Bolivia, y el subsector de embalses para regadío, evaluado en Chile. Por último, en la Sección 6, se lleva a cabo la discusión de resultados y se presentan las conclusiones finales.

2. La economía de la adaptación al cambio climático

La adaptación se refiere a aquellas acciones conducentes a reducir las consecuencias adversas resultantes del cambio climático. Incluso las medidas de mitigación más estrictas no podrán evitar los impactos del cambio climático. Por lo tanto, la adaptación es un eje de política fundamental, en particular, para hacerse cargo de impactos de corto plazo. (Agrawala et al., 2010)

Existen desafíos de política y analíticos asociados con la adaptación y mitigación. El caso de la mitigación es más claro estando las medidas de mitigación mejor definidas y tratadas en numerosa literatura. Por otra parte, la reducción de emisiones o costo unitario de mitigación son métricas claras para comparar distintas medidas. Por el contrario, qué acciones caen o no dentro de la categoría de adaptación es más ambiguo, existe escasa literatura con enfoques distintos y no existe métrica consensuada para evaluar la efectividad (o costo efectividad) de las políticas y medidas de adaptación (Agrawala y Fankhauser, 2008).

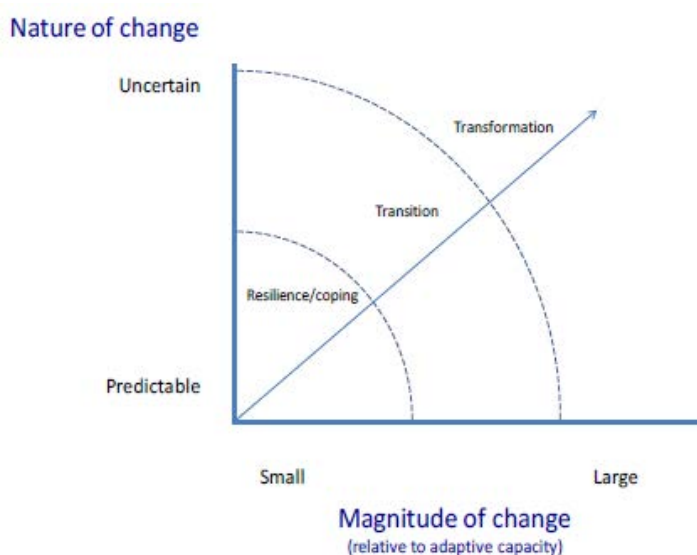
La realización correcta de acciones de adaptación dependerá de la naturaleza de los impactos, y, en particular, según el nivel de predictibilidad y magnitud del impacto relativa a la capacidad de adaptación. Es posible distinguir distintos tipos de adaptación (Pelling, 2010):

- Adaptación incremental (también conocida como resiliencia): Adecuada para impactos que son predecibles y/o relativamente pequeños. No altera mayormente metas ni acciones de política actuales.
- Adaptación de transición: Para impactos que son sólo predecibles parcialmente y/o se asocian a impactos significativos relativos a la capacidad de adaptación.

- Adaptación transformacional: Para impactos inciertos o que exceden la capacidad de adaptación. Requiere cambios profundos.

La figura siguiente presenta las dimensiones del cambio y la adaptación.

Figura 2. Dimensiones de cambio y adaptación



Fuente: Pelling (2010).

En la práctica, la adaptación se lleva a cabo a través de las acciones de distintos *stakeholders*, incluyendo individuos, hogares, comunidades, empresas y el estado. Todos estos agentes realizan acciones en distintos niveles y a diferentes escalas cumplir metas múltiples, interactivas y cambiantes.

La adaptación puede llevarse a cabo antes o después de que ocurra el cambio. Para impactos pequeños y predecibles, no hace mucha diferencia adaptarse antes o después. Sin embargo, para impactos grandes e inciertos es muy importante adelantarse al cambio mejorando las opciones de adaptarse a bajo costo y con flexibilidad.

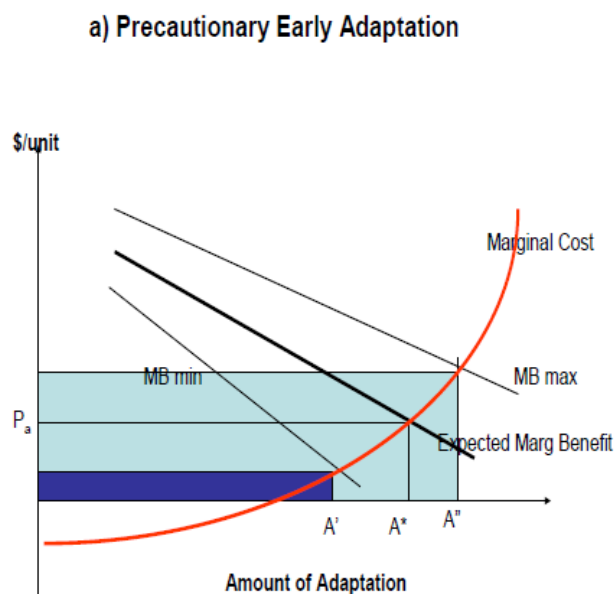
A diferencia de la adaptación que sigue un cambio, la adaptación que se anticipa a cambios futuros es una forma de garantía que los estados o privados pueden tomar. En general, se relaciona con inversiones menores y relativamente certeras (preventivas) para evitar o manejar las consecuencias de costos inciertos y potencialmente mucho mayores. Esta interpretación de “póliza de seguros”, en el contexto de la adaptación anticipada,

ayuda a comprender el valor de opción de la adaptación. Un seguro especifica el derecho, mas no la obligación, de vender el activo dañado a un precio predefinido en caso de un evento adverso¹.

En general, adelantarse a un cambio resulta económicamente más eficiente que reaccionar tras su ocurrencia. La figura siguiente muestra la curva del costo marginal de adaptarse anticipadamente a un cambio significativo. Estos costos comienzan siendo bajos e incluso pueden presentar tramo con costos negativos por existir acciones para otros propósitos con costos adicionales nulos o muy pequeños. Los costos de adaptación aumentan con las opciones de adaptación. El tiempo adecuado para la planificación e innovación significa que es menos probable que se restrinjan las opciones de adaptación en el rango relevante (que la curva de costo marginal no tenga comportamiento asintótico vertical).

Los beneficios marginales de adaptación anticipada comienzan bajos pero caen sólo gradualmente a niveles de adaptación mayores (en valor absoluto tiene una pendiente baja). La figura siguiente presenta la economía de la adaptación anticipada.

Figura 3. Economía de la adaptación anticipada



Fuente: Pelling (2010).

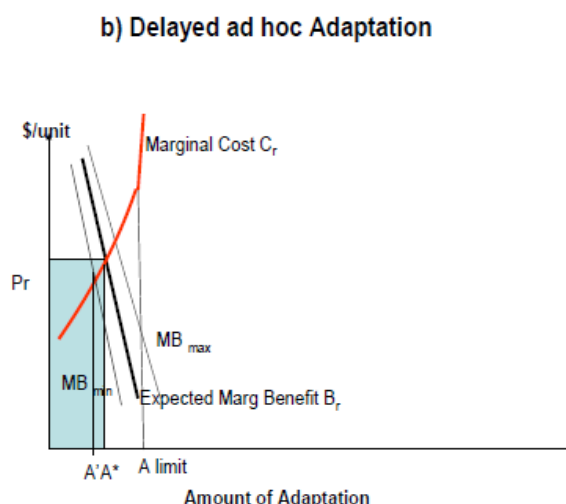
¹ En términos financieros, un seguro es un ejemplo de opción put.

Los beneficios marginales parten bajos porque no existe presión actual para adaptarse. La acción se toma antes de los cambios adversos. Esto hace difícil evaluar los beneficios netos: los costos tangibles de las acciones con los beneficios inciertos de la adaptación. En la figura se presentan tres curvas de beneficios marginales para dar cuenta de la incertidumbre asociada.

Las cosas cambian cuando la adaptación se realiza después del cambio. Los costos marginales comienzan altos y también es alta la tasa de crecimiento del costo sobre un conjunto acotado de medidas de adaptación, terminando con comportamiento asintótico. Los costos comienzan altos porque las alternativas de bajo costo y anticipadas son imposibles de llevar a cabo. El tiempo apremia en este caso, siendo las restricciones de planificación e innovación presiones sobre los costos. Las medidas que quedan disponibles incluyen respuestas de crisis a eventos adversos inevitables e incluso irreversibles.

Los beneficios de adaptarse tras cambios significativos que ya ocurrieron comienzan altos pero caen rápidamente. El manejo de crisis obliga a medidas inmediatas costosas. Por lo tanto, los beneficios de adaptarse reactivamente son inmediatos y certeros, pero pequeños. Los beneficios totales (área bajo de la curva del beneficio marginal) son pequeños porque este tipo de adaptación contribuye poco a capacidad adaptativa de largo plazo (la curva está cerca del eje y). La figura siguiente presenta la economía de la adaptación reactiva.

Figura 4. Economía de la adaptación reactiva



Fuente: Pelling (2010).

La adaptación anticipada tiene puntos a favor al igual que en contra. El tiempo permite aprovechar alternativas de bajo costo versus los beneficios inciertos derivados de las acciones. Sin embargo, esperar por muchos años para reducir la incertidumbre de los beneficios (al aumentar el nivel de confianza de los pagos esperados de la adaptación) tiene como consecuencia perder las opciones de bajo costo. La incertidumbre también significa que el valor total de cada inversión en un caso de adaptación anticipada podría nunca verse completamente realizado. Cada inversión crea la opción de un futuro mejor, por lo que si este beneficio se alcanza, dependerá de la dirección futura del cambio.

El costo neto de la economía de apoyarse en medidas de adaptación reactivas es el valor de adelantarse a las oportunidades para anticiparse al cambio. Para el caso reactivo, las figuras muestran que un nivel de adaptación A^* se alcanza a un costo marginal P_r mientras que P_a en el caso anticipado.

Este sencillo marco conceptual permite explicar las causas de adaptación inapropiada o fuera de plazo (mala adaptación). Si se pensara una o dos décadas a futuro acerca de suministro de agua potable, podría hacerse bastante bien y a bajo costo de manera anticipada. Por ejemplo, un diseño de suministro urbano o gestión de demanda versus desalinización como medida reactiva. En sectores que se adaptan sólo ante cambios significativos, probablemente será difícil reenfocar la adaptación en acciones que se anticipen a cambios futuros. Esto ocurre, ya que al ocurrir los cambios resulta eficiente llevar a cabo medidas de adaptación reactiva.

3. Impactos del cambio climático en la infraestructura

El término “infraestructura” suele referirse a activos físicos en una amplia gama de áreas de política, incluyendo comunicaciones, servicios de emergencia, energía, finanzas, alimentos, gobierno, salud, educación, protección civil, transporte, agua y residuos (European Commission, 2013). Estos sectores son críticos para el desarrollo y crecimiento económico porque viabilizan la actividad privada y su competitividad.

El cuadro siguiente muestra ejemplos de infraestructura para sectores clave:

Cuadro 2. Sectores clave en infraestructura

Energía	Tecnologías de Información	Transporte	Agua
Generación a combustibles fósiles, ERNC, transmisión y distribución, procesamiento de combustibles, almacenamiento	Redes de comunicaciones fijas y móviles, internet y banda ancha, redes inalámbricas, datacenters, etc.	Carreteras, puertos, aeropuertos, rieles.	Infraestructura de abastecimiento y tratamiento de agua, aguas servidas, infraestructura de tratamiento y disposición

Fuente: HM Government, Reino Unido (2011).

El cambio climático y sus impactos deben enfrentarse desde ahora. Para ello se debe distinguir entre la infraestructura existente y la nueva:

- La infraestructura existente ha sido construida en el pasado y sin incorporar consideraciones de cambio climático, por lo que puede ser vulnerable a este fenómeno.
- La infraestructura nueva es aquella cuya vida útil debe superar los 50 o 100 años. En estos casos, para asegurar su viabilidad, es necesario que no sea vulnerable al cambio climático.

Al tomar decisiones sobre la provisión de infraestructura nacional se deben considerar los cambios en el clima para evitar rigideces que dificulten e incrementen los costos de llevar a cabo acciones de adaptación.

En esta sección se presenta la identificación de los impactos de la adaptación al cambio climático en la infraestructura para el transporte, la energía y la construcción. Ello se basa en los documentos European Commission (2013) y Oficina Española de Cambio Climático (2014).

A continuación se listan los tipos de impactos, riesgos, periodo del impacto y regiones principalmente afectadas para los distintos tipos de infraestructura en los sectores de transporte, energía y construcción.

Cuadro 3. Riesgo climático e impactos en la infraestructura de transporte

	Tipo	Presión Climática	Riesgos/peligros	Marco de tiempo impacto esperado	Regiones mayormente afectadas
Infraestructura de rieles	Rieles	Calor de Verano	• Torcedura de rieles; • aumento fatiga del material; • inestabilidad de terraplén; • recalentamiento del equipo, (por ej. Ventilación del motor, aclimatación); • aumento de incendios puede dañar la infraestructura	Medio negativo (2025; 2080) a negativo alto (2080)	Europa del sur medio negativo hasta 2025 y negativo alto hasta 2080; Oeste, Este y EU Central negativo medio hasta 2080
		Invierno helado/frío	• Hielo en trenes y catenaria	Negativo medio (2025; 2080)	Europa del norte y central
		Precipitación extrema	• Daño en infraestructura debido a inundación/ derrumbamiento • socavación de las estructuras; • desestabilización del terraplén	Negativo medio (2025) a negativo alto (2080)	Nivel Europeo
		Tormentas extremas	• Daño en infraestructura como en señales, cable de poder etc.(debido a la caída de árboles) etc.	Sin información	Sin información
		En general	• Seguridad reducida; • aumenta el costo de reparación y mantención; • alteración de “entrega a tiempo” de pasajeros y bienes		
Infraestructura de carretera	Carreteras (incluyendo puentes, túneles, etc.)	Calor del verano	• Hundimiento y deterioro de pavimento; • derretimiento de asfalto • vida reducida de superficie de carreteras de asfalto (ej. superficie agrietada) • aumento de incendios puede dañar infraestructura; - expansión/torcedura de puentes	Negativo medio (2025; 2080) a negativo alto (2080)	Europa del Sur (2025), Europa Oeste, Este y Central (2080)
		Precipitaciones / inundaciones extremas	• daño en la infraestructura (ej. pavimentos, carretera inundada); • inmersión de carretera; • socavación de las estructuras; • inundación de pasos bajo nivel; • presión en los sistemas de drenaje; • riesgo de derrumbamiento; • inestabilidad de terraplén	Negativo medio (2025) a negativo alto (2080)	Nivel Europeo
		Eventos de tormentas extremas	• daño en infraestructura; - árboles/vegetación al borde del camino puede bloquear caminos	Sin información	Sin información
		En general:	• Reducción de velocidad; • Cierre de carretera o riesgos de seguridad en el caminos; • alteración de “entrega a tiempo” de bienes • pérdidas de bienestar; • mayor costo de reparaciones y mantención		
		Aumento del nivel del mar	• Daño de infraestructura debido a inundaciones; • erosión costera; • cierre de camino	Negativo medio (2080)	Nivel Europeo
	Carreteras costeras	Eventos de tormentas extremas		Sin información	Sin información
		Eventos de fuertes precipitaciones		Negativo medio (2025) a negativo alto (2080)	Nivel Europeo
	Carreteras en montañas	Degradación del congelamiento permanente	• disminuye estabilidad; - desprendimientos; - derrumbamientos; cierre de camino;	Sin información	Sin información
	Sistema de alcantarillado	Eventos de precipitaciones fuertes	• sistema de alcantarillado sobrecargado puede provocar inundación de caminos y contaminación del agua	Negativo medio (2025) a negativo alto (2080)	Nivel Europeo

	Tipo	Presión Climática	Riesgos/peligros	Marco de tiempo impacto esperado	Regiones mayormente afectadas
Estructura de aviación	Aeropuertos (incluyendo pista de aterrizaje)	Calor de verano	• mayor necesidad de enfriamiento del suelo; • degradación de cimientos de pista de aterrizaje; • mayor densidad de altitud reduce la eficiencia de combustión del motor; • disminuye la fuerza de propulsión y aumenta la longitud de la pista de aterrizaje	Negativo medio (2025; 2080) a negativo alto (2080)	Europa del sur (2025), Europa del Oeste, Este y central (2080)
		Eventos de precipitaciones fuertes	• inundación daña la pista de aterrizaje y otras infraestructuras; • residuo de líquidos de agua excede la capacidad del sistema de alcantarillado	Negativo medio (2025) a negativo alto (2080)	Nivel Europeo
		Tormentas extremas	• daño de viento a terminales, navegación, equipos, señalización	Sin información	Sin información
		Aumento del nivel del mar	• inundaciones de pista de aterrizajes, edificaciones anexas y acceso a caminos	Negativo medio (2080)	Nivel Europeo
		En general:	• Interrupción y alteración a servicios de suministros y acceso a suelos; • cierre periódico de aeropuertos; • mayores costos de mantención		
Estructuras de embarcaciones	Embarcaciones internas	Ríos caudalosos (ej. Precipitación extrema, derretimiento de nieve)	• Problemas por el paso por puentes; • limitaciones de velocidad debido a inestabilidad de diques; • algunas restricciones en la altura de navíos	Negativo medio (2080)	Nivel Europeo
		Ríos con corriente baja (ej. sequia)	• Fuertes restricciones a la capacidad de carga; • problemas de navegación, reducción de velocidad	Negativo medio (2025) a negativo alto (2080)	Europa del sur, central y Este; en 2080 también Europa occidental
		Cambio en la cubierta de hielo	En general pueden ser esperados pequeños periodos de cubiertas de hielo; sin embargo, calor e inviernos tempranos, seguido de una disminución rápida en la temperatura el aire, podría resultar en formaciones de cubiertas de hielo más gruesas o peligrosas, y así, llevar a obstrucciones de hielo, daño en señales e infraestructura (ej. compuertas)	Sin información	Sin información
		En general:	• alteración de entrega de bienes a tiempo”; • detención de embarcaciones al interior; • pérdidas de bienestar		
	Transporte marítimo	Aumento del nivel del mar	• navegación podría ser afectada por los cambios en los niveles de sedimentación y ubicación de bancos de cardumen; cierres más frecuentes	Negativo medio (2080)	Nivel Europeo
		Cambios en condiciones del mar	• tormentas más severas y olas extremas que podrían afectar a barcos	Sin información	Sin información
		Menos días Debajo de Temperaturas bajo cero	• se reduce problemas con el hielo acumulación de navíos, cubiertas, jarcias y muelles; incidencia a peligrosa niebla de hielo	Positivo medio (2080)	Nivel Europeo

	Tipo	Presión Climática	Riesgos/peligros	Marco de tiempo impacto esperado	Regiones mayormente afectadas
		Hielo del mar reducido	• acceso mejorado; • temporadas más largas para embarcaciones; • nuevas rutas de embarcaciones	Hielo del océano en verano podría desaparecer completamente en el océano ártico entre 2013-2040	Sin información
	Puertos	Eventos de tormentas extremas	• Destrucción de infraestructura; • Interrupciones y cuellos de botella en el flujo de productos a través de los puertos	Sin información	Sin información
		Aumento del nivel del mar		Negativo medio (2080)	Nivel Europeo
		inundaciones/ derrumbamientos		Negativo medio (2025) a negativo alto (2080)	Nivel Europeo
		en general:	• alteración de entrega de bienes a tiempo; pérdidas de bienestar; • aumenta el costo por reparación y mantenimiento		
TRANSPORTE URBANO	Transporte urbano (infraestructura de caminos, ciclo vías, pasarelas, infraestructura de riel, vías fluviales, transporte público y privado)	Aumento de temperatura y olas de calor	• aumento del efecto del calor de la isla (ej. derretimiento del asfalto, aumento de surcos en asfalto debido a la coacción del material, expansión termal en uniones de expansión de puentes y superficies pavimentadas, y daño en el material del puente)	Negativo medio a negativo extremo	2025: Europa del sur y del este 2080: Europa del norte, del sur del este y central
		Eventos de Fuertes precipitaciones (repentinas inundaciones extremas)	• daño en la infraestructura debido a inundación, propiedad en riesgo debido a la ubicación, pesados residuos líquidos de agua	Medio negativo (2025;2080) a negativo alto (2080)	2025: Europa occidental y del sur 2080: Europa del este, oeste, del sur, del norte, y central
		Aumento del nivel del mar e inundación de oleaje por tormenta	• Riesgo de inundación de la infraestructura del camino e inundación de túneles bajo tierra, • Degradación de superficies de caminos y base de la capa por la penetración de sal	Negativo medio a negativo extremo	2025: Europa del sur, occidental y del norte 2080: Europa del sur, occidental y del norte
		Tormentas extremas, viento extremo	• Daños, aumento en el costo de mantenimiento	Pequeños a medianos impactos	Nivel Europeo

Fuente: European Commission (2013).

Cuadro 4. Riesgo climático e impactos en la infraestructura de energía

	Tipo	Presiones climáticas	Riesgos	Marco de tiempo del impacto esperado	Regiones mayormente afectadas
Transmisión y distribución de infraestructura	Transmisión eléctrica primaria y cadenas de distribución	Temperaturas altas extremas	Disminuye la capacidad de cadenas	Negativo medio (2025) a negativo extremo (2080)	Nivel Europeo
		Nieve, hielo, tormentas	• aumentan las posibilidades de daños a cadenas de energía/ apagón	Medio negativo a positivo bajo (2050)	Europa del norte y oeste
		Precipitaciones fuertes	• movimientos de masas (derrumbamientos, lodo, y corrientes de escombros) causando daños	Marco de tiempo, magnitudes, y frecuencias inciertas	Regiones montañosas especialmente
	Cadenas de transmisión primarias (aceite y gasolina)	Derretimiento del congelamiento permanente	• atascos en conductos de gas en suelo causa problemas técnicos (referido solamente a los suministros de conducto árticos y no los conductos de gas Este-Oeste, si los últimos no están cimentados en permafrost)	Bajo por 2025 y gradualmente aumentando	Eurasia Ártica
		Temperaturas más altas	• capacidad de producción reducida en conductos de gas	Bajo por 2025 y gradualmente aumentando	Nivel Europeo
	Almacenaje y distribución primarios	Tormentas en conexión con mareas altas y SLR	• Amenazas a refinерías y conductos costeros •debido al SLR/mareas altas/tormentas		
ENERGY SUPPLY AND DEMAND	Energía Hidroeléctrica, gran escala (instalaciones río abajo)	Disminuye residuos de líquido glacial (mediano a largo plazo) Ríos bajos extremos y corrientes de arroyos durante periodos de sequías	•Aumenta la posibilidad de escasez de suministro de energía hidráulica en verano en río abajo (alimentación de régimen pluvial) estaciones	Negativo medio (2025; 2080) negativo alto(2080)	Nivel Europeo
	Energía Hidroeléctrica en pequeña escala, (corriente arriba/alpino)	Aumenta residuo líquido glacial en el corto plazo)	•Pérdida de “capacidades del amortiguador” por sequías en verano en mediano y largo plazo debido a pérdidas de volúmenes de glaciares	Positivo corto plazo Mediano a largo plazo; negativo alto (con volúmenes de glacial individual, climas regionales y así diferentes escalas de tiempo)	Mayormente los Alpes y Escandinavia
	Energía Sola (PV y termal)	Temperaturas aumentan	• pérdida en la efectividad de celdas solares debido a altas temperaturas en el ambiente	Medio (2050) y largo plazo (2080) negativo	Nivel Europeo
		Nubosidad	• Para algunas regiones con gran potencial (y capacidades existentes) parece probable una disminución en la nubosidad	Altamente incierto: negativo medio(2025), sin información 2080 (dependiendo en Buena parte en los parámetros de irradiación del clima incierto y nubosidad)	Europa del Sur: positivo. Europa del Norte: negativa (altamente incierto)
		Irradiación solar	• proporcional inversa a nubosidad		
	Plantas de energía térmica (incl. nuclear)	Temperatura del agua aumenta	• Eficiencia baja de CARNOT debido a un ambiente más alto y temperaturas del agua frías	Negativo medio (2025) a negativo extremo (2080)	Nivel Europeo
		Inundaciones	• Riesgo de daños por inundación debido a la ubicación de la mayoría de las instalaciones térmicas en cuerpos de agua (ríos)		
		Flujos de agua muy bajos	• Disponibilidad reducida de agua fría		

Fuente: European Commission (2013).

Cuadro 4. Impactos climáticos en el sector construcción

	Presiones climáticas	Riesgos e Impactos				Marco de tiempo del impacto esperado	Regiones mayormente afectadas
		Riesgo	Impactos medioambientales posibles	Impactos económicos posibles	Impactos sociales posibles		
Infraestructura de la construcción	Cambios de patrones de precipitaciones	Fluvial /inundación de desagüe urbano	Contaminación (vertederos /estación de servicio)	A través de daño físico a edificios, mantención de infraestructuras	Seguridad de agua para habitantes Mantención de infraestructura	2020 Medio / bajo	Ciudades en ríos y ciudades con inadecuados sistemas de alcantarillado
		Carga alta de nieve		A través de daño físico a edificios, Mantención de infraestructura	Problema de seguridad Mantención de infraestructura	2020	Áreas montañosas, Europa del norte
		Hundimiento y derrumbe de edificios infraestructura	NA	A través de daño físico a edificios, Mantención de infraestructura	Mantención de infraestructura de seguridad	2050 Medio / bajo	Áreas montañosas
		Escasez de agua, sequía y consecuencias por recursos de agua	Restricciones por techos verdes	Limitado uso de agua interna. Hundimiento de tierra rica en arcilla y tierra de turba causando daño en cimientos	NA	2020 Medio / medio	Europa del sur
	Aumento de temperaturas	Muertes relacionadas al calor / frío	NA	Disminución de productividad de trabajo, mayores costos por refrigeración, aumento de costos de emergencia / servicios médicos/ suministros	Impactos de salud	2050 Medio/medio	Mejora al norte de Europa, deterioro en Sur de Europa
		Enfermedad (portador y enfermedades transmitida a través del agua)	NA			2050 Medio / bajo	Nivel Europeo
		Calidad del aire y salud	NA			2020 Medio /bajo	Nivel Europeo, particularmente sur
	Aumento nivel del mar	Aumento del nivel del mar e inundación por tormentas Intrusión de agua salada	Contaminación (vertederos, estaciones de servicios)	A través de daño físico a edificios, Mantención de infraestructura; mayor mantención /aumento de/por instalaciones de protección	Seguridad de agua para habitantes Mantención de infraestructura	2080 Medio / bajo	Ciudades costeras
	Eventos extremos (tormentas)	Daño directo de viento de tormenta	NA	Daño físico a edificios; Mantención de	Inconvenientes por alteraciones	2080 bajo / bajo	Nivel Europeo, áreas costeras

	Presiones climáticas	Riesgos e Impactos				Marco de tiempo del	Regiones mayormente
		Alteración de energía, comunicación, y otros servicios	NA	infraestructura	del servicio de electricidad y agua	2050 bajo /bajo	Nivel Europeo, áreas costeras
Generación de energía eólica	Frecuencia de tormenta (no severas, ya que las instalaciones son capaces de manejar velocidades de viento más altas)	Generación de energía eólica debe ser reducida más allá de ciertos umbrales de velocidad del viento para evitar recalentamiento/sobrecarga de los sistemas de distribución				Referencia a salidas de modelo de clima, frecuencias de futuras tormentas altamente inciertas, pero podría aumentar en el Mar del Norte y Báltico	Mar del Norte y Báltico y regiones del mar Báltico
	Derretimiento de glaciares y expansión de agua debido al aumento de temperatura	SLR (solo en algunos casos cerca del litoral y considerando altos escenarios SLR)				Largo plazo (2080) negativo	
Reducción de demanda de electricidad (a través de auto-suministro por ej. Pequeñas unidades de PV)	Temperaturas más altas	Eficiencia de PV reducida				Altamente incierto	Comparado con energía solar
Calefacción pasiva (geotérmica)	Régimen de precipitación alterado	Niveles de agua subterránea oscilantes				Impredecible	Con acuíferos susceptibles
Demanda de energía	Temperaturas más altas	Alta demanda de AC en verano; alta demanda de frío por la industria alimenticia				Negativo en corto medio y largo plazo (es decir, aumenta la demanda de electricidad en verano)	Nivel Europeo
		Baja demanda de calefacción en invierno				Positivo	
	Sequías	Alta demanda de energía por bombeo para riego				Negativo bajo	Europa del sur y Este

Fuente: European Commission (2013).

4. Enfoques metodológicos

En esta sección se presentan enfoques metodológicos que resultan interesantes al ser descritos de manera más detallada, buscando proponer una metodología para la evaluación de los impactos económicos de la adaptación al cambio climático en la infraestructura.

El punto de partida para esta evaluación suele ser complejo, ya que requiere analizar la vulnerabilidad de un país o sector e identificar las opciones de adaptación potenciales. La evaluación económica es el proceso de apreciación y priorización de opciones de

adaptación bien definidas usando criterios económicos o criterios que pueden incluirse en un análisis económico. La adaptación al cambio climático suele considerarse como una inversión en un contexto de recursos limitados. Surgen entonces las interrogantes de en qué opciones y cuándo se debería invertir.

La evaluación económica se relaciona básicamente con los costos y beneficios medidos en unidades monetarias. Por lo tanto, UNFCCC (2002), GSF (2011) y Niang-Diop y Bosch (2011) recomiendan la utilización de tres técnicas principales en la evaluación económica de medidas de adaptación. Éstas incluyen:

- Análisis costo-beneficio
- Análisis costo-efectividad
- Análisis multi-criterio

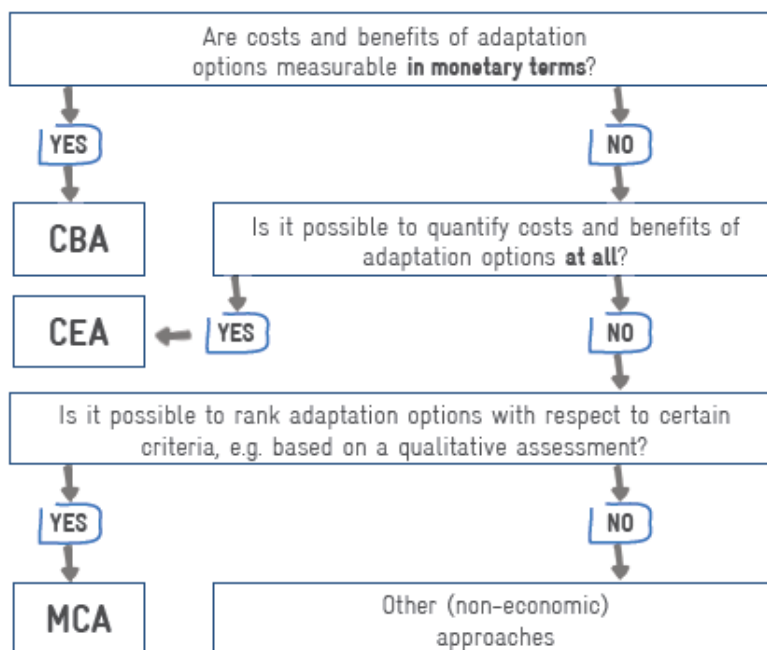
Estos tres enfoques permiten analizar y priorizar medidas de adaptación. En algunas ocasiones el análisis costo-beneficio se presenta conjuntamente con el de costo-efectividad. Además de estos tres enfoques, existen técnicas más complejas que se utilizan como métodos o herramientas para evaluar medidas de adaptación al cambio climático. Es posible distinguir entre dos tipologías principales.

La primera tipología clasifica los modelos según su cobertura económica (mercado o sector). Las variables de entrada de los modelos son valores monetarios de precios, rentas, costos, etc. En esta tipología destacan los enfoques de equilibrio parcial y equilibrio general. Ambos enfoques se utilizan principalmente para analizar costos y beneficios en un contexto estándar de economía del bienestar.

La segunda tipología no considera sólo elementos económicos sino que los combina con física y otras ciencias. Los modelos entregan información en indicadores físicos (como ocurrencia de efectos de salud adversos, números de daños, etc.), que luego se relacionan con valores monetarios. En esta tipología se encuentran los famosos modelos denominados “Modelos Integrados de Valoración del Cambio Climático” (Integrated Assessment Models, IAMs). Ejemplo de éstos son los modelos PAGE2020, DICE, RICE y FUND.

La figura siguiente muestra qué método debe emplearse para analizar las opciones de adaptación.

Figura 5. Selección de enfoque económico de evaluación de opciones de cambio climático



Fuente: GIZ (2013).

4.1 Análisis costo-beneficio y costo-efectividad

Desde la perspectiva económica determinar el impacto de las medidas de adaptación significa establecer los impactos en bienestar derivados de tales iniciativas. El marco tradicional de análisis de bienestar en la evaluación de instrumentos ambientales ha sido el enfoque de costo-beneficio. Éste es un marco muy general y puede llevar a propuestas conceptuales y metodológicas muy diversas.

Según el propósito y alcance, la evaluación puede realizarse desde una perspectiva privada, de algún organismo del Estado, de la perspectiva de un sector, de la economía y/o de la sociedad. Pueden o no considerarse un mayor o menor número de externalidades. En algunos casos (generalmente por problemas de disponibilidad de información y de modelos adecuados) no se cuenta con información de beneficios. En estos casos se suele optar por un análisis de costo-efectividad.

Dado que el análisis de bienestar (o bien de costos) es inherentemente contrafactual, para realizar este tipo de análisis se debe contar con dos escenarios. El primero es el escenario base y el otro el escenario caso, el cual está asociado a una determinada política, medida o acción. La comparación de ambos escenarios permite inferir respecto a

diferencias en variables relevantes, entre los casos sin medidas o acciones de mitigación y/o adaptación y aquellos que sí las presentan. Por otra parte, el análisis de escenarios resulta ser una manera sencilla de abordar la incertidumbre, ya que permite diferenciaciones de variables o parámetros clave².

Aspectos críticos en la realización de análisis costo-beneficio incluyen la definición adecuada de los escenarios base y alternativos y el tratamiento del descuento y de la incertidumbre. La definición de línea base es un tema complejo y la definición de metas y evaluación de resultados de las medidas adicionales suele resultar controversial. En general, se recomienda que la línea base considere todas aquellas políticas y medidas que la autoridad está llevando a cabo y también haya anunciado oficialmente. Sin embargo, hoy existe amplio debate de como los países en desarrollo deben incluir la evolución, por ejemplo, de variables de eficiencia energética o de matriz de generación en sus líneas de base.

Otro tema crucial es el tratamiento de la incertidumbre. En general, las incertidumbres que afecten aquellos factores determinantes de los costos de la mitigación y adaptación deben identificarse y presentarse con claridad. En los casos de mitigación las principales variables inciertas se relacionan a precios y tecnología. Para poder acotar la incertidumbre existen distintas alternativas. La más simple consiste en establecer escenarios críticos de comparación. La otra opción es utilizar modelos que den cuenta explícita de la variabilidad de la incertidumbre asociada y propagada por las distintas variables (por ejemplo, métodos de simulación o cotas de probabilidad).

Luego, se han identificado los tres enfoques siguientes:

- Análisis de costos, considerando un punto de vista financiero y netamente de costos, identificando los flujos financieros requeridos para implementar medidas de adaptación.
- Análisis costo-efectividad, considerando los costos requeridos para implementar medidas de abatimiento y entregar los antecedentes para construir una curva de costos de abatimiento.
- Análisis costo-beneficio.

² Ver Anexo 7.3.6 donde se presentan consideraciones respecto de la naturaleza y construcción de escenarios.

La correcta realización de un análisis costo-beneficio tiene como premisa definir el propósito de la evaluación y definición del alcance del sistema. El análisis de los costos y beneficios incrementales de un determinado proyecto o medida suele conocerse como *análisis costo-beneficio financiero* cuando el análisis considera precios de mercado y esperados (precios financieros). Los precios financieros incorporan todos los impuestos y subsidios que resultan relevantes de considerar desde la perspectiva de un desarrollador de proyectos o inversionista. De este tipo de análisis, el retorno del capital mínimo requerido para tomar la decisión de inversión se utiliza típicamente para determinar la tasa de descuento financiera. Esta tasa luego se utiliza para llevar a valor presente los beneficios y costos incrementales de un proyecto.

El análisis será referido como *análisis costo-beneficio económico* cuando los costos y beneficios incrementales se asocian a impactos considerados a nivel nacional o regional. Para este tipo de análisis los precios deben corregirse adecuadamente considerando impuestos y subsidios para establecer los precios económicos (o precios de eficiencia). Estos precios representan el costo en términos de recursos que a la economía le significa el uso de los bienes en cuestión. En la práctica, un *análisis costo-beneficio económico* debería corregir los impactos *externos* que afectan también a otros actores (no sólo aquellos relacionados directamente con el proyecto). En este análisis la tasa de descuento considerada suele ser la tasa libre de riesgo (bonos de gobierno de largo plazo) más un premio por el riesgo del crecimiento macroeconómico de un país.

4.2 Uso de técnicas multi-criterio³

4.2.1 Marco conceptual

Uno de los problemas que enfrenta la evaluación de los impactos relacionados con la adaptación en infraestructuras es la incertidumbre y falta de información al respecto, lo cual abre un espacio para el uso de métodos más subjetivos, tales como las técnicas multi-criterio, que permiten avanzar en la evaluación de los problemas. Los métodos multi-criterio corresponden a un enfoque y una serie de técnicas que tienen como propósito el proveer un modo de comparación entre opciones. Estas metodologías se utilizan para

³ Basado en CEPAL (2008) y Yilmaz y Harmancioglu (2013).

apoyar al tomador de decisiones, de manera que sus decisiones sean consistentes con un marco de racionalidad adoptado.

La decisión a través de técnicas multi-criterio es una optimización con varias funciones de objetivo simultáneas y un único agente tomador de decisiones. Este tipo de problema puede modelarse matemáticamente de la siguiente forma:

$$\text{Max } F(x); x \in X$$

donde

$x = x_1, x_2, x_3, \dots$. Vector de las variables de decisión.

X = Región factible del problema.

$F(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, f_p(x))$. Vector de las “p” funciones objetivo que recogen los criterios u objetivos simultáneos del problema.

Dentro de las principales técnicas usadas para la determinación de ponderadores en análisis multi-criterio se encuentra el AHP: Analytic Hierarchy Process.

Esta es una metodología de análisis multi-criterio que requiere que el tomador de decisiones proporcione tanto evaluaciones como preferencias subjetivas con respecto a la importancia relativa de decisión para cada criterio. El resultado del AHP corresponde a una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada alternativa de decisión.

Dado que es el tomador de decisiones quien determina, mediante sus juicios de valor, conocimientos y experiencia previa, las ponderaciones de cada criterio en el modelo, el AHP es considerado como un método subjetivo.

Entre las principales ventajas del AHP se considera la posibilidad de incluir datos cualitativos que, generalmente, no se consideran en los análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero sin embargo suelen ser relevantes en algunos casos.

El AHP posibilita organizar la información de manera eficiente y gráfica, lo cual permite que el problema pueda ser descompuesto y analizado por partes, para así visualizar de mejor manera los efectos de cambios en los distintos niveles.

El AHP “trata de desmenuzar un problema y luego unir todas las soluciones de los sub-problemas en una conclusión”.

4.2.2 Método de la entropía

El término entropía es comúnmente definido como “la medición de la incertidumbre asociada con los fenómenos aleatorios”. Esta incertidumbre está representada, generalmente, por una distribución de probabilidad discreta.

El método de entropía se utiliza para calcular las ponderaciones de los distintos criterios asociados a la matriz de utilidades. Estos valores son independientes de los juicios de valor e intuiciones del tomador de decisiones, por lo cual el método de la entropía es considerado como un método objetivo.

Esta técnica es particularmente útil para explorar contrastes entre grupos de datos. Estos conjuntos de datos se pueden asignar como un conjunto de soluciones alternativas en la matriz de utilidades, donde se evalúa cada alternativa de solución en términos de su resultado. La filosofía de este método se basa en la cantidad de información disponible y su relación con la importancia del criterio.

Si el valor de entropía es alto, la incertidumbre contenida en el vector es alta, la diversificación de la información es baja y, correspondientemente, el criterio es menos importante.

Una de las principales ventajas de este método es que reduce la carga al tomador de decisiones en problemas de gran complejidad. Adicional a esto, se puede utilizar como una solución de referencia en situaciones donde es complicado llegar a un consenso de forma grupal, ya que es a través del modelo que se realiza la estimación de los ponderadores de los criterios.

4.3 Enfoque experto y manejo de incertidumbre

Este enfoque se basa en la metodología descrita en Hayhoe et al. (2010), la cual está basada en el uso de opinión experta y modelación de Monte Carlo. Ésta es útil para traducir el aumento de la “presión” en la demanda de energía y los costos de mantenimiento, la infraestructura e inversiones de capital. También es útil para calcular los impactos económicos para estimar los futuros efectos del cambio climático en la infraestructura urbana y la economía. Con esta metodología, se logra cuantificar los impactos económicos del cambio climático sobre la base de las relaciones observadas entre los umbrales climáticos clave y sus impactos sobre la energía y la infraestructura.

El objetivo en este estudio fue recurrir a las observaciones de los impactos de los cambios en el clima y la frecuencia y gravedad de los fenómenos meteorológicos extremos específicos de la ciudad de Chicago, con el fin de evaluar los impactos potenciales del cambio climático sobre la energía, el transporte, la infraestructura y la economía de esta ciudad.

En el caso de Chicago, los impactos en energía e infraestructura, incluyendo tanto los costos y ahorros, son impulsados principalmente por los aumentos en la temperatura media anual y en segundo lugar por el aumento de la frecuencia de eventos extremos (calor) y la disminución en los días fríos. Con períodos de extremo calor más frecuentes, intensos y largos, la demanda de electricidad promedia y máxima anual se incrementará.

La metodología asume que dada la magnitud de los impactos en el pasado reciente, es probable que los cambios futuros proyectados en la ola de calor y fuertes lluvias tengan un impacto significativo en muchos aspectos de la vida general en Chicago. De esta forma, se describe el desarrollo y aplicación de un marco de modelación cuantitativa capaz de evaluar los impactos potenciales y los costos económicos de los cambios en el clima medio y extremo, en el uso de energía de Chicago, en la demanda máxima de electricidad, en el transporte y en su medio ambiente construido, incluyendo sus parques y sistemas de recreación.

Otros estudios de este tipo abordan los impactos esperados del cambio climático en la salud pública, la calidad del aire y los recursos hídricos. Sin embargo, este enfoque es único, ya que es el primer esfuerzo para proporcionar vinculación precisa entre las proyecciones climáticas de alta resolución y funciones específicas de la ciudad y la infraestructura. También se distingue ya que el modelo se basa en información específica y la visión de expertos de la ciudad. Adicionalmente, la construcción global del modelo se diseñó para garantizar la portabilidad a otras ciudades, incluida la integración de la información de impacto específico.

Inicialmente, la metodología identifica impactos como los siguientes:

- Mayores requerimientos de electricidad por temperaturas extremas.
- Infraestructura costera por aumento del nivel del mar, intensidad de los huracanes, tormentas, derretimiento del permafrost, etc.

- Calles de la ciudad torcidas, records de uso de electricidad rotos, y fallas de la energía que dejaron algunos residentes sin electricidad hasta por 2 días por el aumento de temperatura.
- Entre otros.

La metodología considera la proyección de los cambios futuros en los umbrales climáticos impacto-relevantes, es decir, indicadores relacionados con temperatura del aire y precipitación diaria. Luego se realiza la estimación de los impactos de la temperatura sobre la demanda de energía y electricidad en horas punta. Para estimar la relación entre la temperatura y la demanda de electricidad, se analiza la correlación entre la carga horaria de la electricidad y la temperatura promedio por hora. Finalmente, se desarrolla el marco de modelación económica y de evaluaciones de impactos.

El propósito del análisis económico era identificar el punto en el que las tendencias climáticas a largo plazo afectarían la infraestructura y las operaciones de la ciudad, para estimar los costos asociados a estos impactos. El objetivo del análisis era mejorar la comprensión de la adaptación y la mitigación en la planificación departamental y en toda la ciudad. A tal efecto, el análisis económico se centró en las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los “drivers” primarios, relacionados con el clima, de la infraestructura y/o los impactos económicos?
- ¿Cuál es la naturaleza del impacto (por ejemplo, el deterioro de las fachadas del edificio)?
- ¿Cuál es la probable magnitud de los impactos potenciales?
- ¿Cuáles son las áreas probablemente más afectadas desde el punto de vista financiero?
- ¿Qué tipo de impacto financiero resultaría/cambiaría en la inversión de capital, costos operacionales, u otros?

Cuadro 5. Drivers de riesgo climático e impactos asociados identificados para los departamentos de la ciudad de Chicago

Departamento	Driver de Riesgo Climático	Impacto Proyectado
Ingresos	Aumento de temperatura promedio	Ingresos tributarios por utilidades
Transporte	Aumento de temperatura promedio	Plantación y mantenimiento de plantas en los bulevares Reemplazo y reparación de caminos
	Cambios en precipitaciones extremas	Manejo de inundaciones en estacionamientos
	Cambios en nevazones	Remoción de nieve
Autoridad de Tránsito de Chicago	Aumento de temperatura promedio	Refrigeración y calefacción de autobuses: estrés adicional en los motores de autobuses con aumento de la demanda de refrigeración Mantenimiento de autobuses: tensión adicional en los neumáticos por el calor extremo Refrigeración y calefacción de trenes
		Adecuación de instalaciones de mantenimiento con capacidad de refrigeración Instalaciones de enfriamiento readaptadas
	Frecuencia de días de extremo calor	Demanda de enfriamiento de los autobuses en días calurosos durante apagones Costos de tiempo adicional
Chicago Park District	Aumento de temperatura promedio	Instalaciones de calefacción y enfriamiento
		Reemplazo de árboles debido a salinización del camino Tratamiento de Algas en playas y estanques
		Ingresos de playas por extensión de temporada
		Costos de contratistas del paisaje por temporada extendida
	Frecuencia de días de extremo calor	Adecuación de instalaciones de mantenimiento con capacidad de refrigeración
		Instalaciones de calefacción y enfriamiento
	Niveles más bajos de lagos	Dragado de puertos
Calles y Saneamiento	Aumento de temperatura promedio	Reemplazo de árboles
	Cambios en nevazones	Remoción de nieve
Distrito Metropolitano de Reclamación de Agua	Aumento de temperatura promedio	Costos de Operación afectados por el calor
	Cambios en precipitación promedio	Costos de operación afectados por la lluvia Costos prematuros de inundaciones y contaminación
Aviación	Aumento de temperatura promedio	Ingresos de impuestos a los combustibles Instalaciones de calefacción y enfriamiento Costos de mantención contratistas del paisaje Costos de capital contratistas de paisaje (riego)
	Cambios en nevazones	Remoción de nieve
Escuelas públicas de Chicago	Aumento de temperatura promedio	Instalaciones de calefacción y enfriamiento
Asuntos Culturales	Aumento de temperatura promedio	Ingresos de los eventos culturales
Bomberos de Chicago	Frecuencia de días de extremo calor	Reemplazo acelerado de vehículos y uso más prolongado de equipos

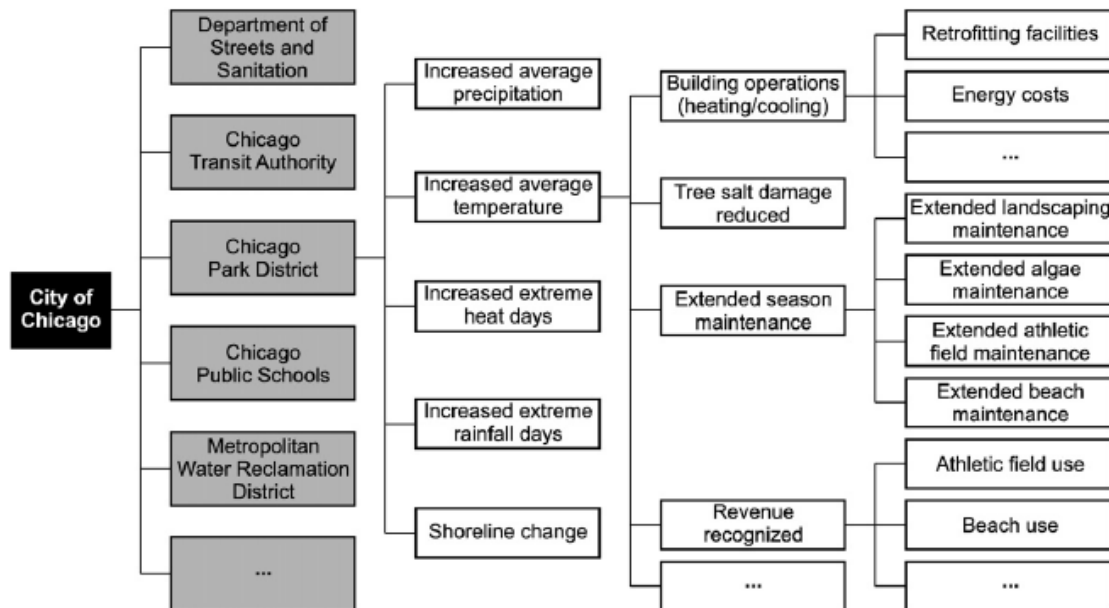
Departamento	Driver de Riesgo Climático	Impacto Proyectado
		Aumento de volumen de respuestas a incendios y controles de seguridad Mantenimiento cuarteles de bomberos Costo laboral del sistema médico
Servicios Generales	Aumento de temperatura promedio	Instalaciones de calefacción y enfriamiento Reparación y sustitución de azoteas
Servicios Sociales	Frecuencia de días de extremo calor	Costos de tiempo adicional
Policía de Chicago	Frecuencia de días de extremo calor	Costos de tiempo adicional y controles de seguridad más frecuentes

Fuente: Hayhoe et al. (2010).

Para la estimación de los impactos económicos del cambio climático en la ciudad de Chicago se hizo una integración profunda de múltiples fuentes de datos, incluyendo los indicadores del clima, los impactos previstos y los costos económicos, los cuales sirven de entrada a un modelo económico. La salida del modelo proporciona una amplia gama de perspectivas económicas sobre los impactos potenciales del cambio climático en la ciudad, así como la cuantificación de los costos relativos de la adaptación frente a la mitigación.

El desarrollo del modelo incluye dos pasos fundamentales. El **paso 1** consiste en identificar los impactos del cambio impulsados por el clima y la definición de la varianza de impacto dado diferentes umbrales climáticos. Cada impacto físico u operacional potencial, o conjunto de impactos, se considera desde la perspectiva de su mayor efecto económico en la ciudad. Este análisis “bottom-up” resulta en el desarrollo de los Climate Impact Pathways (CIPs), como en el análisis causal que se ilustra en la figura siguiente. Usando un marco generalizable en todos los departamentos, sectores e incluso otras áreas urbanas, estos CIPs son la base de múltiples escenarios de impacto específicos para cada departamento, y capturan impactos económicos específicos en dólares por departamento y por umbrales climáticos.

Figura 6. Muestra de Climate Impact Pathway para Chicago



Fuente: Hayhoe et al. (2010).

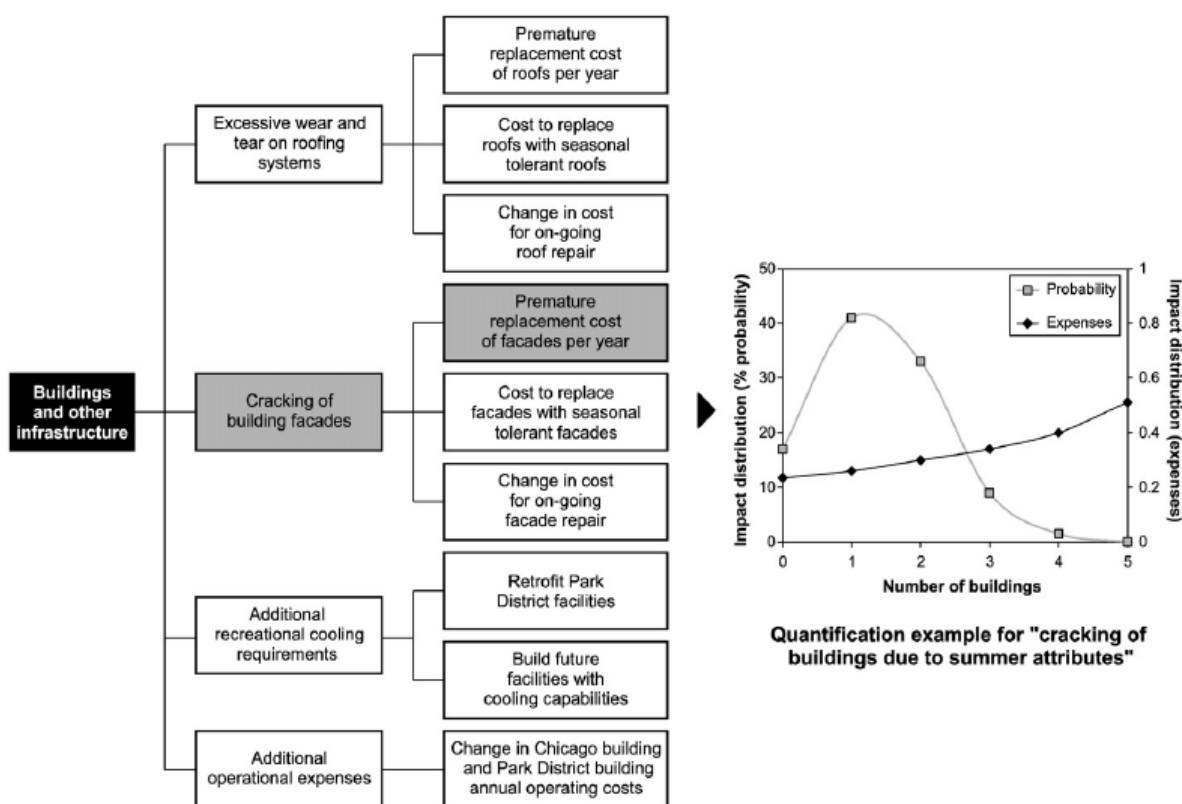
En este ejemplo se muestra el análisis causal que representa los resultados de la recopilación de información y análisis de los dieciocho departamentos del Ayuntamiento de Chicago.

Después de que se definen los CIPs, la metodología sigue con la definición de la magnitud de los impactos. En el **paso 2**, se desarrollan las distribuciones de impacto, probabilidad y frecuencia de los “drivers” dentro de los CIPs. Los datos de costos/ingresos relacionados (por ejemplo, el reemplazo de equipos, reparación de activos) que se prevé en relación con cada escenario climático futuro, se determinan específicamente para cada departamento de la ciudad. Los datos incluyen factores como: desencadenantes de la sincronización de los gastos; tipo de gastos; inversiones de capital o aumento de los costos de operación; magnitud de los gastos; naturaleza del gasto, en concreto costos nuevos versus incrementales; etc. Para cada uno de los umbrales de los efectos, se pidió a los expertos participantes proporcionar una gama de valores para los “drivers” de impacto.

A continuación, las distribuciones de datos se someten a simulaciones de Monte Carlo para producir un conjunto de distribuciones de probabilidad de impacto, el cual sirve

para apoyar los rangos de distribución de costos y puede resultar más confiable (Figura 6). El ejemplo mostrado aquí es para edificios de la ciudad.

Figura 7. Distribuciones de impacto y probabilidad de los escenarios climáticos futuros que afecten las operaciones y los activos de la ciudad de Chicago



Fuente: Hayhoe et al. (2010).

A continuación, para calcular los impactos del cambio climático en la infraestructura y la economía de Chicago, se estiman los cambios previstos en los umbrales climáticos que tienen relevancia en el impacto.

El cambio climático aumenta las temperaturas medias anuales y estacionales, así como altera el momento, la magnitud y el umbral de eventos climatológicos "extremos" que afectan a la energía, los edificios, el transporte y otras infraestructuras urbanas. Este análisis se centra específicamente en la evaluación del impacto de estos cambios climáticos en la demanda de energía eléctrica, infraestructura de la ciudad, los departamentos clave y presupuestos.

A partir de la información de diversos departamentos de la ciudad, se identificaron una serie de umbrales climáticos más allá de los cuales los impactos significativos ya se han experimentado en el pasado o se espera que ocurran en el futuro (el sistema tendría que ser presionado más allá de su capacidad de diseño).

El “driver” principal de la gran cantidad de impactos es el incremento previsto de días de extremo calor y la correspondiente disminución de condiciones de frío extremo. Algunas variables (como el número promedio anual de eventos de lluvias extremas) mostraron pocos cambios cuando se evaluaron sobre una base anual, pero sí mostraron un aumento significativo en la escala estacional para el invierno y la primavera, equilibrado por las correspondientes disminuciones en verano y otoño.

Para cuantificar los impactos potenciales del cambio climático sobre la demanda media anual de electricidad, primero se calculan los cambios proyectados en grados-día anuales de refrigeración, usando una temperatura media umbral o punto de equilibrio de 59°F (15°C), tal como se deriva de la relación observada entre la demanda de electricidad y la temperatura.

Sobre la base de este umbral, el enfriamiento anual en grados-día promedio será entre 1.500°C y 1.800°C por año para el período de referencia histórico 1961-1990, en función de la estación meteorológica.

En términos del impacto financiero para el Chicago Department of Revenue, se espera un impacto neto negativo en cuanto a la recaudación del impuesto a la utilidad. Los ingresos fiscales de la electricidad probablemente aumentarán, pero esto se ve compensado por la pérdida de los ingresos recaudados en el gas natural para la calefacción en invierno.

Por otra parte, se producen aumentos potenciales en la demanda máxima de electricidad, dado que el cambio climático afectará la demanda por el cambio en la media de distribución de la temperatura, lo que aumenta el consumo anual (como se indica en el análisis grado-día anterior). Tal vez más importante, sin embargo, el cambio climático también puede afectar la demanda de electricidad por aumentos simultáneos, tanto en la media, como en la varianza de la distribución de temperatura. Esto implica que eventos actualmente clasificados como “peaks” se producirán con más frecuencia en el futuro, superpuestos sobre los incrementos simultáneos de los “peaks” de demanda.

Para desarrollar los cálculos, se usan las correlaciones observadas entre la temperatura por hora y la demanda de electricidad para la región de Chicago, las cuales indican la posibilidad de un drástico aumento en la carga de electricidad a altas temperaturas. Una hora a una temperatura ambiente media de aproximadamente 90°F (32°C), por ejemplo, es probable que resulte en una carga 8.000 MW por encima de una hora equivalente a aproximadamente 55°C (13°F). Esta diferencia es más o menos equivalente a la electricidad consumida por 261.000 hogares en un día, o 6,3 millones de hogares en una sola hora.

Este análisis está sujeto a advertencias importantes. En primer lugar, la incertidumbre sobre los futuros cambios en los factores socioeconómicos (población, ingresos, producción y tecnología) puede dominar la incertidumbre de los futuros cambios en el consumo de electricidad. En segundo lugar, sin embargo, mediante el mantenimiento de las relaciones de hoy, esta simulación puede subestimar los impactos reales del cambio climático. En el futuro, si las personas alteran los hábitos actuales para compensar algunos de los efectos negativos del cambio climático, por ejemplo mediante una mayor adopción de aire acondicionado y una mayor frecuencia de uso de aire acondicionado existente, esto puede dar lugar a aumentos adicionales en el consumo de electricidad más allá de los estimados por la metodología. Finalmente, este análisis es conservador, ya que se basa en simulaciones de baja sensibilidad. De esta forma, los aumentos de temperatura proyectados, incluso bajo el escenario de emisiones más altas, están, por tanto, en el extremo inferior del rango esperado para ese escenario.

A continuación se resume el estado de la información y se presentan algunos de los principales resultados referidos a impactos relacionados con el clima y las opciones de adaptación para la infraestructura de Chicago, por tipo de infraestructura:

Parques, recreación y turismo:

- Información a partir del Departamento de Asuntos Culturales y el Distrito de Parques de Chicago de Chicago.
- El aumento de las temperaturas extiende el período de recreación al aire libre, a la vez que también puede presionar más los recursos de la ciudad.

- Períodos más largos de apertura de las playas, parques y otras instalaciones suponen mayores ingresos para la ciudad. Una temporada más caliente y más húmeda del verano, sin embargo, podría disminuir el número de eventos celebrados en Chicago, ya que sería más difícil atraer a los asistentes no residentes.
- Aumentan los costos del paisajismo relacionados con el mantenimiento de árboles, plantas y flores.
- Los costos de jardinería al aire libre para el Distrito de Parques de Chicago se prevé que sean dos veces mayores en el escenario de emisiones más alto en comparación con el inferior.

Carreteras y transporte público:

- Información a partir de la Autoridad de Tránsito de Chicago (CTA) y los Departamentos de Transporte, Aviación y Calles y Saneamiento de Chicago.
- Los impactos dependen fundamentalmente de los cambios en la temperatura media y las precipitaciones, eventos extremos de calor y aumento de la frecuencia de eventos de fuertes lluvias.
- Se prevé un aumento en la reparación de carreteras y los costos de mantenimiento a finales de siglo bajo el escenario de emisiones más alto, debido a los cambios en los costos de plantación y mantenimiento, reemplazo de caminos y reparaciones relacionadas con el aumento de calor y lluvias más severas en invierno y primavera.

• Mantenimiento y estructura de edificios:

- Información a partir del Departamento de Servicios Generales, Distrito de Reclamación de Agua Metropolitano y la Junta de Escuelas Públicas de Chicago.
- Es probable que la construcción de infraestructuras sea afectada principalmente por los cambios en la temperatura media y las

temperaturas extremas que afectan la demanda de calefacción y refrigeración y reparaciones de techos y fachadas.

- A finales de siglo, los gastos relacionados con la construcción en el escenario de emisiones más altas tienden a ser diez veces mayor que en el escenario de emisiones más bajas.
- Pérdidas de construcción debido a los daños causados por fenómenos extremos podrían representar un gasto mucho mayor que los cambios debidos a la temperatura media.

4.4 Metodología para Sector Infraestructura del World Bank (2010)

Esta sección se basa en el documento World Bank (2010), donde se estiman costos de la adaptación para varios sectores en un tratamiento global. El enfoque intuitivo para estimar el costo de la adaptación requiere comparar el futuro sin cambio climático con uno que sí lo presenta. En general, el estudio considera los pasos siguientes:

- Definición de una línea base: Se considera un horizonte temporal hasta 2050.
- Elección de proyecciones climáticas.
- Predicción de impactos.
- Identificación de alternativas de adaptación y costeo.

En este sector, el punto de partida para estimar los costos de la adaptación son proyecciones base de infraestructura en unidades físicas por país, considerando intervalos de cinco años sin cambio climático. Estas proyecciones se obtienen de ecuaciones econométricas estimadas utilizando datos de panel que incluyen variables explicativas como PIB per cápita a PPC, estructura de la población, urbanización, características de los países y variables de cambio climático.

Se utilizan dos especificaciones econométricas: análisis de panel que representa promedios de infraestructura, y regresión de frontera estocástica para representar niveles de infraestructura eficientes dados los valores de las variables exógenas.

En el periodo t al $t+1$ (por ejemplo, del 2000 al 2005), el país tiene que invertir para tener un nivel de infraestructura adecuado en $t+1$ y para reemplazar infraestructura

existente en t que termina su vida útil en ese periodo. Por lo tanto, el nivel de infraestructura de tipo i en el país j en el periodo t es:

$$I_{ijt} = C_{ijt}(Q_{ijt+1} - Q_{ijt} + R_{ijt})$$

donde C_{ijt} es el costo unitario de la inversión, $Q_{ijt+1} - Q_{ijt}$ es la cantidad de nueva inversión de infraestructura, y R_{ijt} la cantidad de infraestructura reemplazada.

El cambio en el costo total de inversión en infraestructura puede expresarse como el diferencial de la ecuación anterior⁴.

$$\Delta I_{ijt} = \Delta C_{ijt}(Q_{ijt+1} - Q_{ijt} + R_{ijt}) + C_{ijt}(\Delta Q_{ijt+1} - \Delta Q_{ijt} + \Delta R_{ijt})$$

Considerando el lado derecho de la última ecuación, el primer término de la suma se denomina componente delta-P, mientras que el segundo delta-Q.

La componente delta-P combina las proyecciones de base de infraestructura asumiendo que no hay impactos de cambio climático con estimaciones de los cambios porcentuales en costos de construcción, operación y mantenimiento como consecuencia del cambio climático. Los cambios de costos se obtienen de funciones de dosis-respuesta estimadas de literatura económica-ingenieril que analiza los costos de ajustar el diseño de activos y estándares de operaciones ante distintas condiciones climáticas. Estos factores incluyen temperaturas y precipitaciones mensuales medias y máximas, velocidad máxima del viento, entre otras. Las funciones de dosis-respuesta para costos de operación y mantenimiento no aplican a nueva infraestructura, la cual se diseña para poder lidiar con los desafíos del cambio climático. El cuadro siguiente muestra ejemplos de funciones de daño para pavimentación de carreteras.

⁴ Una expresión equivalente puede obtenerse para los costos de mantención y operación.

Cuadro 6. Ejemplos de funciones de daño para pavimentación de carreteras

Type of cost	Precipitation	Temperature
Construction costs	Change in costs of constructing 1 kilometer (km) of paved road per 10 centimeter (cm) change in annual precipitation projected during lifespan relative to baseline climate; dose-response represents change in costs for every 10 cm increment	Change in cost of constructing 1 km of paved road per stepwise increase in maximum of monthly maximum temperature values projected during lifespan relative to baseline climate; the first increase occurs after a 1°C change in maximum temperature. Every other step occurs at 3°C beyond that
Maintenance costs		
Existing assets	Change in annual maintenance costs for 1 km of paved road per 10 cm change in annual rainfall projected during lifespan relative to baseline climate	Change in annual maintenance costs for 1 km per 3°C change in maximum of monthly maximum temperature projected during lifespan
New assets	Paved roads constructed after 2010 would have no maintenance impact if designed for changes in climate expected during their lifetime	

Source: Economics of Adaptation to Climate Change study team.

La componente delta-Q de la ecuación captura el impacto del cambio climático en la demanda de servicios de infraestructura. El cambio climático puede cambiar el nivel o composición de la demanda de energía, transporte y agua a los niveles de ingreso dados, por lo que debe calcularse el impacto del capital y costos de operación. El cambio climático implica que los países deben invertir en activos adicionales para poder mantener sus estándares de protección.

El análisis econométrico incluye estimar una forma reducida de la ecuación que describe la demanda de infraestructura:

$$Q_{ijt} = h_i(p_{jt}, y_{jt}, x_{jt}, v_{jt}, t)$$

Donde p_{jt} es la población del país j en t , y_{jt} es el ingreso per cápita del país j en t , x_{jt} es un vector de características del país j en t (incluyendo un índice de costos de construcción), y v_{jt} es un vector de variables climáticas del país j en t .

El cuadro siguiente muestra los costos delta-p para infraestructura por región y periodo 2010-2050.

Cuadro 7. Costos delta-p anuales de adaptación para infraestructura por región y periodo 2010-2050 (billones de USD a precios 2005, no descontados)

Period	East Asia and Pacific	Europe and Central Asia	Latin America and Caribbean	Middle East and North Africa	South Asia	Sub-Saharan Africa	Total
National Centre for Atmospheric Research (NCAR), wettest scenario							
2010-19	6.8	1.5	1.8	0.9	3.8	1.1	15.9
2020-29	9.5	1.9	2.8	1.2	6.6	2.3	24.3
2030-39	11.3	4.4	3.9	1.5	8.7	3.9	33.7
2040-49	14.8	5.3	5.4	1.8	10.7	6.1	44.1
Average	10.6	3.3	3.5	1.4	7.5	3.4	29.5
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), driest scenario							
2010-19	3.1	0.7	1.3	0.6	1.4	0.7	7.8
2020-29	3.3	1.1	1.6	0.5	1.5	1.0	9.0
2030-39	4.3	1.5	1.8	0.9	3.9	1.7	14.1
2040-49	5.6	2.1	2.1	1.4	9.1	2.6	22.9
Average	4.1	1.4	1.7	0.9	4.0	1.5	13.5

Note: Delta-P cost is the adaptation cost computed as the additional cost of constructing, operating, and maintaining baseline levels of infrastructure services under the new climate conditions projected by the two global climate models.

Source: Economics of Adaptation to Climate Change study team.

4.5 Discusión del análisis metodológico y aplicación

De acuerdo a la literatura revisada, se ha podido estructurar e identificar las principales metodologías que son útiles en la evaluación de los costos y beneficios de la adaptación.

Como se ha descrito en el documento, se recomienda la utilización de tres técnicas principales en la evaluación económica de medidas de adaptación:

- Análisis costo-beneficio
- Análisis costo-efectividad
- Análisis multi-criterio

Estos enfoques permiten analizar y priorizar medidas de adaptación, los que se complementan con técnicas más complejas que se utilizan como métodos o herramientas para evaluar medidas de adaptación al cambio climático.

La mayor parte de los enfoques revisados son muy demandantes de información de base, la cual es muy difícil de conseguir en los países de Latinoamérica. Por lo tanto, se impediría su utilización a un nivel sectorial amplio (incluso en un sector en particular), a

menos de que se desarrollen en el contexto de un proyecto o programa de largo plazo con amplia disponibilidad de recursos.

Por otro lado, metodologías complementarias como los análisis multi-criterio y la incorporación de incertidumbre conllevan la disponibilidad de una gran variedad de expertos en muchas áreas y sectores productivos, lo que imposibilita llevar un proceso participativo que ayude a sistematizar la información requerida para llevar a cabo los análisis. Esto también demanda una gran cantidad de recursos y de liderazgo de expertos en la aplicación de estas técnicas y su sistematización de resultados, los que son escasos de encontrar.

Se recomienda, por lo tanto, el uso de la metodología planteada en World Bank (2010) donde se estiman costos de la adaptación para varios sectores en un tratamiento global. De esta forma, se plantea el uso de proyecciones base de infraestructura en unidades físicas por país versus un escenario sin cambio climático. Estas proyecciones se obtienen de ecuaciones econométricas estimadas utilizando datos de panel, incluyendo variables explicativas como PIB per cápita a PPC, estructura de la población, urbanización, características de los países y variables de cambio climático. La metodología busca representar niveles de infraestructura eficientes dados los valores de las variables exógenas.

A pesar de que esta metodología propone el manejo de información de manera más simplificada que los otros enfoques revisados, su aplicación a casos reales sigue siendo un esfuerzo de magnitud superior a la presupuestada para este estudio. Por ello, para cumplir con el objetivo de aplicación a algunos casos de estudio reales, se toman casos evaluados en la literatura y se aplicará a dos casos en Chile (infraestructura hídrica y carreteras) y Bolivia (carreteras).

5. Casos de análisis

A continuación se presenta el análisis del impacto en la infraestructura vial e hídrica para Bolivia y Chile, de manera de estimar los costos adicionales de la adaptación al cambio climático para distintos escenarios y tipos de respuesta.

5.1 Análisis de medidas de infraestructura: carreteras

En esta sección se presenta el análisis del impacto en la infraestructura vial para Bolivia y Chile.

5.1.1 Impacto del cambio climático en el sector

La literatura ha documentado el impacto adverso de variables climáticas en los estándares de calidad y vida útil de carreteras. En particular, se han considerado impactos derivados de aumentos en temperatura, precipitaciones e inundaciones.

Estas metodologías permiten realizar análisis costo-beneficio acotados a costos directos de inversión y mantenimiento de la infraestructura existente y nueva. Como es usual en un análisis costo-beneficio, se requiere de dos escenarios: un escenario base sin cambio climático y otro escenario con cambio climático. Así se estima el costo incremental asociado a cambio climático. También distinguimos entre adaptación anticipada (que realiza inversiones ex ante) para reducir impactos futuros y la adaptación reactiva o ad hoc.

Es importante destacar que en la comparación del caso anticipado con el reactivo no se considera un sinnúmero de costos y beneficios. En particular, se omiten cambios en costos de mantenimiento de vehículos, costos y beneficios de productividad asociados a menor o mayor conectividad vial, cambios en los niveles de utilidad de los usuarios por calidad de los servicios de transporte, externalidades que puedan variar según calidad de las rutas, entre otras.

Por ello, es que el análisis de este estudio se acota a los costos directos de inversión y mantenimiento de las rutas. En particular, se comparan los costos totales de inversión y mantención del escenario anticipado y el reactivo. Sin embargo, la inclusión de otras categorías relevantes de costos y beneficios podría cambiar los resultados.

Para estimar estos costos directos, en el caso de carreteras, existen funciones que relacionan cambios en temperatura, precipitaciones e inundaciones con impactos en costos de infraestructura. En general, se distingue entre nueva infraestructura y mantención de infraestructura.

La ecuación “stressor-response” general es:

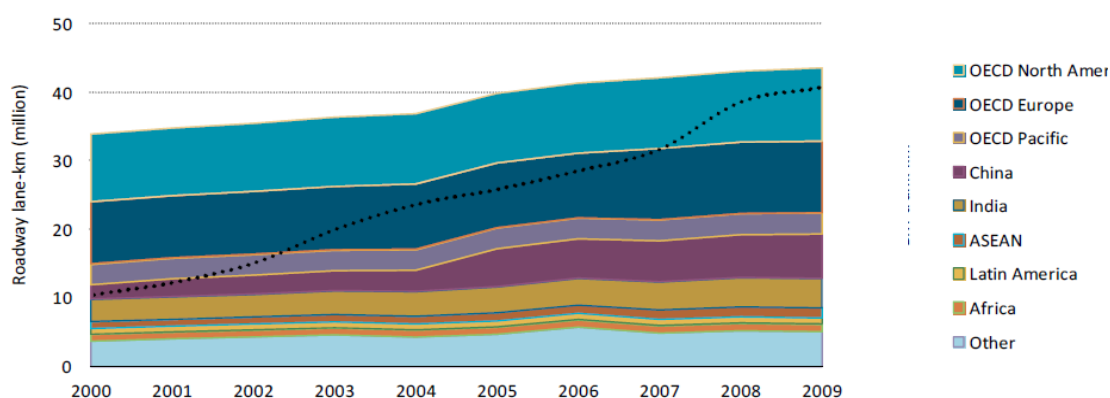
$$\Delta\%c = f(\Delta T)$$

Por cada grado de aumento de temperatura máxima de pavimento se requiere nuevo aglutinante de asfalto, por lo que el costo de capital aumenta 0,6% (Chinowsky, 2010). Habría funciones análogas para precipitaciones.

5.1.2 Antecedentes del caso en estudio

Según cifras de 2013 de la IEA, entre los años 2000 y 2013, la extensión de la red global de calzadas se incrementó en 12 millones de kilómetros-pista. Las pistas pavimentadas a nivel mundial pasaron de 53% del total en 2000 a casi 60% en 2010. La figura siguiente presenta la evolución de pistas pavimentadas por región entre 2000 y 2009.

Figura 8. Kilómetros de pistas



Sources: IRF (2012); EMBARQ, ALT-BRT and IEA (2012).

El cuadro siguiente muestra el porcentaje de calles pavimentadas como fracción del total para distintas regiones en el año 2011 según la base de datos del Banco Mundial.

Cuadro 8. Fracción pavimentada de caminos

Región	Porcentaje
Asia Pacífico	65,0
Unión Europea	89,3
América Latina y el Caribe	26,0
Medio Oriente y Norte de África	80,4
Norteamérica	67,4
OECD	79,3
África Sub-Sahara	15,6

Fuente: Banco Mundial.

<http://data.worldbank.org/indicator/IS.ROD.PAVE.ZS/countries?display=default>

Los países en América Latina están por debajo del promedio mundial (en torno a 60%) y muy por debajo de las regiones de países desarrollados. Los casos de Bolivia y Chile presentan tasas incluso por debajo de los de la región con cifras de 11,6% y 23,8%, respectivamente.

La estrategia de los países latinoamericanos considera el aumento sostenido en infraestructura vial y pavimentación de rutas. Los casos de Bolivia y Chile coinciden en definir planes futuros de obra de infraestructura vial que permita anticipar requerimientos futuros. Es relevante destacar que en América Latina la provisión adecuada de infraestructura es crucial en el desarrollo económico y como medio de superación de la pobreza.

5.1.3 El caso de Chile

En este caso se analizará la Red Interlagos sin y con consideraciones de cambio climático. La Red Interlagos es un sistema de caminos ubicado en la zona precordillerana de las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, actualmente conformada por un eje troncal paralelo a la Ruta 5 y por una serie de caminos transversales y complementarios. Esta red posee una extensión de 1.900 km y tiene por objetivo generar una ruta eminentemente turística.

5.1.3.1 Cambio climático en Chile

Esta sección se basa en Rojas (2013). La figura siguiente presenta el promedio del aumento de temperatura proyectado por las 22 simulaciones existentes para el escenario RCP8.5 para el periodo 2031-2050 y de la simulación regional PRECIS-ECHAM⁵. Todas las simulaciones muestran un calentamiento sobre la totalidad del territorio. Este calentamiento es mayor en la zona norte (altiplano) y la cordillera y va disminuyendo hacia el sur y hacia el Pacífico. Comparado con el escenario SRES A2, el cambio de temperatura en RCP8.5 es mayor en el nuevo escenario, pero se mantiene el patrón espacial. El modelo regional muestra más detalle en los cambios de temperatura, que se aprecian sobre todo en aumentos mayores sobre la cumbre de los Andes.

⁵ Esta simulación fue realizada en el contexto del proyecto Anillo SOC-28, <http://mirasol.dgf.uchile.cl/PRECIS-ECHAM.html>

En cifras, las simulaciones proyectan aumento de temperaturas en todo Chile. Los valores van desde 0.5°C (Magallanes) a 2.5°C (Altiplano) para el periodo 2031-2050. En promedio, y a nivel de país, las temperaturas subirían entre 1°C y 2°C.

Figura 9. Proyección de variación de temperatura para el periodo 2031-2050

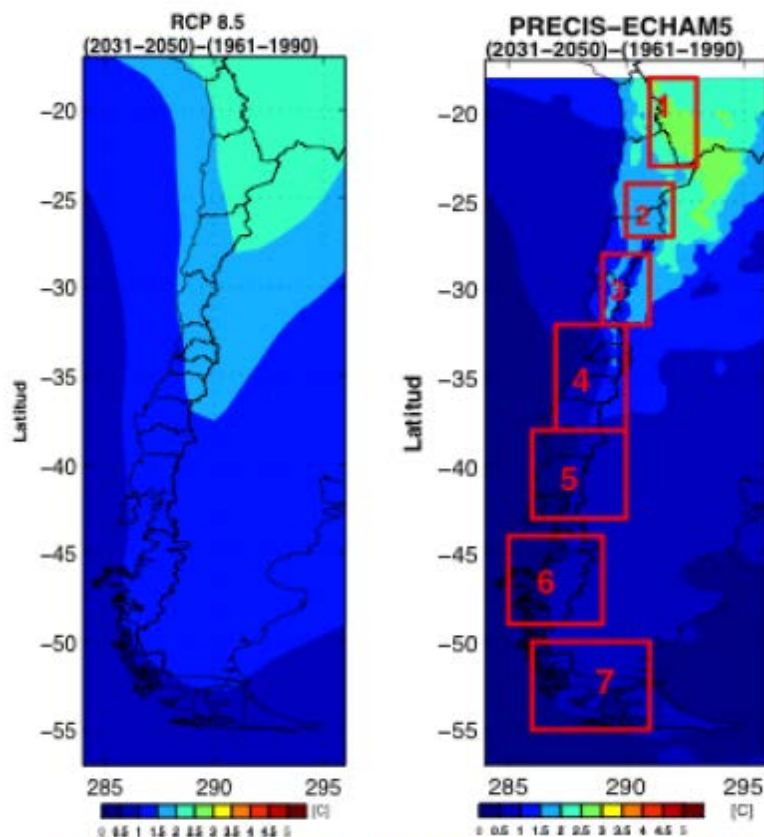


Figura 2: Proyecciones de variación de la temperatura para el periodo 2031-2050, con respecto al periodo 1961-1990 (a) promedio de las simulaciones RCP 8.5. (b) PRECIS-ECHAM.

Con respecto a las precipitaciones, en todos los escenarios analizados, se proyecta un secamiento de la zona centro-sur (30-45°S), y un leve, pero consistente aumento de precipitaciones en el extremo sur (región de Magallanes).

Figura 10. Proyección de variación de precipitaciones para el periodo 2031-2050

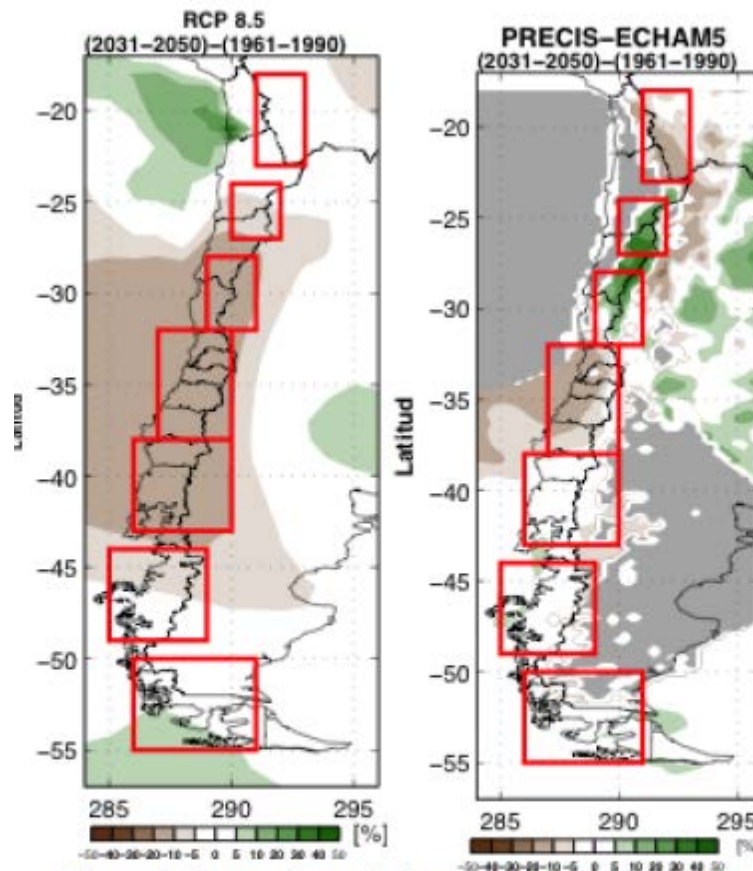


Figura 3: Proyecciones de la variación porcentual de precipitación para el periodo 2031-2050, con respecto al periodo 1961-1990 (a) promedio de las simulaciones RCP 8.5. (b) PRECIS-ECHAM.

5.1.3.2 Supuestos

A continuación se describen los supuestos utilizados para el cálculo de la línea base. En el caso de Chile, los impactos se originan por aumentos en la temperatura esperada (dado que las precipitaciones se reducirían en la zona en la que se emplaza la carretera). Los antecedentes principales del proyecto se obtienen de MOP (2010).

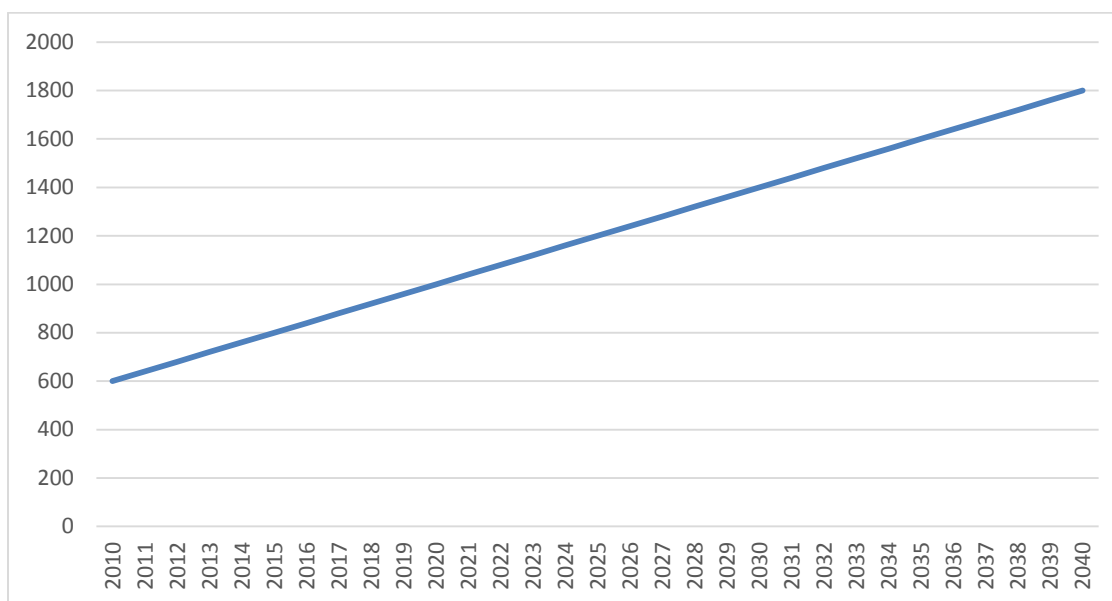
Supuestos de inversión

La perspectiva trazada por la Dirección de Vialidad al 2020 es aumentar en 400 km los caminos pavimentados de la Red Interlagos, a un monto estimado de US \$670 mil por kilómetro (según el Gobierno de Chile). Esta inversión permitirá alcanzar un 53% de

pavimentación de la red, pasando de los actuales 600 km a los 1.000 km, según el proyecto. Posteriormente, se asume que hasta el 2040 se pavimentan 40 km de ruta al año.

La figura siguiente presenta los supuestos de inversión y de stock de carretera pavimentadas.

Figura 11. Stock de carretera pavimentada (km)



Fuente: Elaboración propia.

Supuestos para operación y mantenimiento

Se asume que la vida útil es de 20 años y que ésta cae a causa del cambio climático. Se asume un costo de mantención de US \$45 mil/km y que anualmente se mantiene una fracción del total correspondiente a 1/vida útil.

5.1.3.3 Definición de escenarios

Para evaluar los costos del cambio climático se definen tres escenarios:

- 1) Un escenario sin cambio climático
- 2) Un escenario con cambio climático y adaptación anticipada. En este caso se asume que se mejora el estándar de construcción, por lo que el costo unitario de inversión aumenta en un 1,2% (consistente con un aumento de 2°C, según enfoque

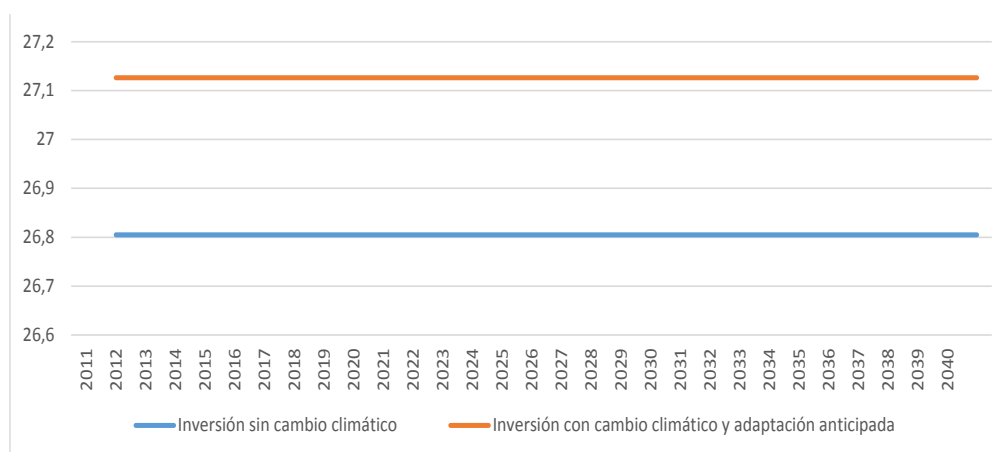
metodológico). En este caso, y para la nueva infraestructura, no es necesario aumentar la frecuencia de mantenimiento.

- 3) Un escenario con cambio climático y adaptación ad hoc. No se mejora el estándar de construcción (por lo que no se modifican costos de inversión) pero es necesario aumentar la frecuencia de mantenimiento. Se asume que la vida útil se reduce en 5% por año.

Costos de capital

Los resultados para los escenarios con cambio climático (anticipado) y sin cambio climático (o bien con cambio climático ad hoc) se presentan en la figura siguiente. Anualmente se construyen 40 km pero con distinto costo de inversión, por lo que estos costos son constantes en cada caso.

Figura 12. Costo de inversión por escenario (MM USD)

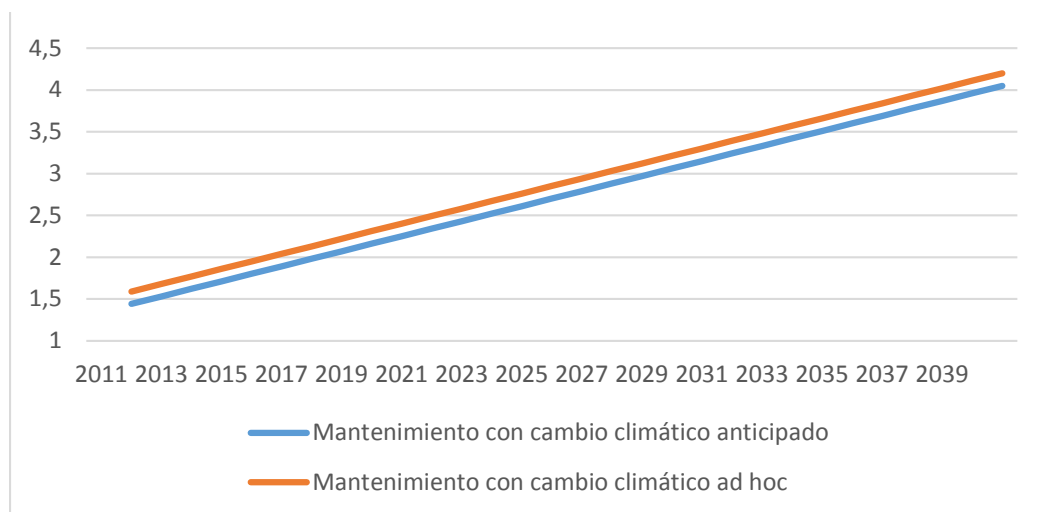


Fuente: Elaboración propia.

Costos de mantenimiento

La figura siguiente presenta los costos de mantenimiento para los escenarios con cambio climático anticipado (cuya nueva inversión no se modifica respecto al escenario sin cambio climático) y con cambio climático ad hoc (asociado a mayor frecuencia de mantenimiento para todo el stock). Es necesario aclarar que en el caso anticipado, los 600 km que ya estaban construidos también verán afectados su frecuencia de mantención (no será el caso para la nueva infraestructura).

Figura 13. Costos de mantenimiento por escenario (MM USD)



Fuente: Elaboración propia.

5.1.3.4 Estimación de costos de adaptación al cambio climático

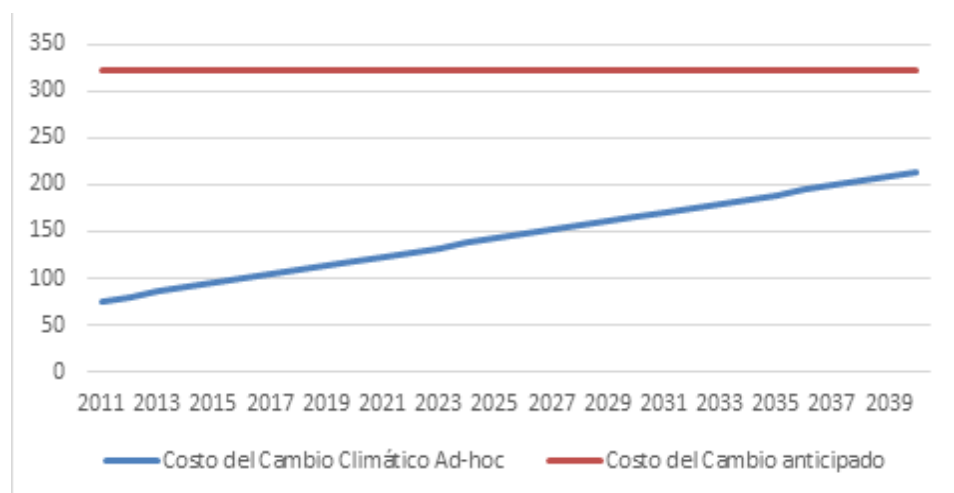
Los costos totales de cada escenario corresponden a la suma de los costos de capital y mantenimiento. Por ello, para estimar los costos incrementales asociados al cambio climático, se utilizan las relaciones:

$$COSTOS\ ANTICIPADO = COSTOS\ ESC.(ANTICIPADO) - COSTOS(SIN\ CC)$$

$$COSTOS\ AD\ HOC = COSTOS\ ESC.(AD\ HOC) - COSTOS(SIN\ CC)$$

La figura siguiente muestra los resultados. El caso anticipado arroja mayores costos que aquellos asociados a mayor frecuencia de mantenimiento (ad hoc).

Figura 14. Costos de adaptación al cambio climático en Chile (M USD)



Fuente: Elaboración propia.

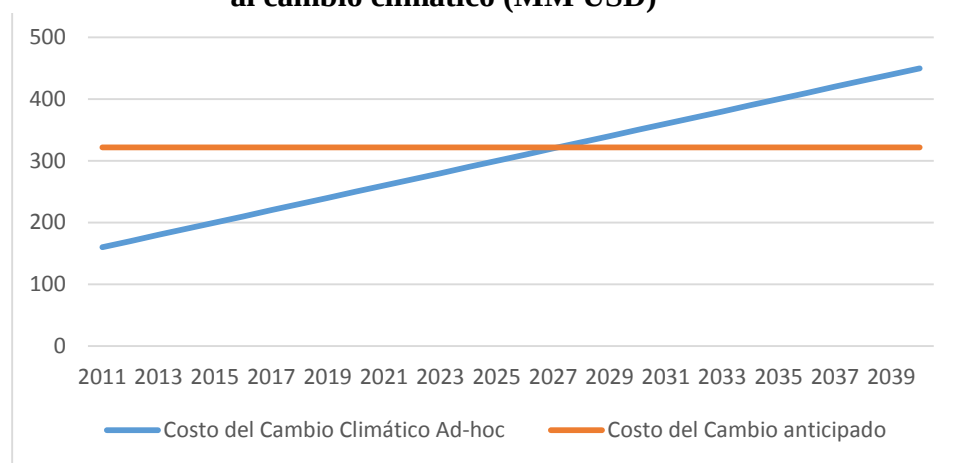
Los resultados sugieren que los costos del cambio climático reactivo crecen al requerirse mayores niveles de mantención cada vez.

En valor presente del año 2011, y considerando la tasa social de descuento de 6% oficial para Chile, se aprecia que en los 30 años el valor presente de la diferencia de costos es sólo US \$3 MM. Considerando el horizonte, se considera que este valor es muy pequeño, ya que al cuantificar otros beneficios de anticiparse, cambiaría esta conclusión.

Sensibilidad

Los resultados son muy sensibles a variaciones en los parámetros. Para ilustrar esto, se presenta una sensibilización con reducción de vida útil de 10% (a 2 años). En el caso base, la reducción considerada era 5%.

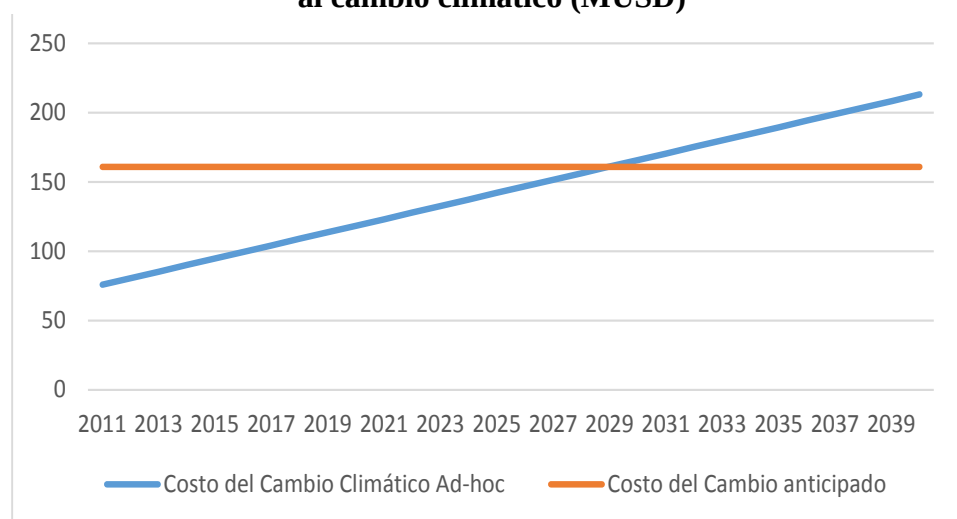
Figura 15. Sensibilidad respecto a vida útil de costos de adaptación al cambio climático (MM USD)



Fuente: Elaboración propia.

Lo mismo ocurre si se sensibiliza el costo de inversión anticipado. Si la temperatura media sube 1°C (y no 2°C), entonces se esperaría que el costo de capital aumente sólo 0,6% en el caso anticipado.

Figura 16. Sensibilidad respecto a inversión anticipada de costos de adaptación al cambio climático (MUSD)



Fuente: Elaboración propia.

En los casos anteriores no queda tan claro que la adaptación ad hoc resulte más costo-efectiva que la anticipada. En este caso, en valor presente, el escenario anticipado es solo US \$526 millones más caro.

5.1.4 El caso de Bolivia

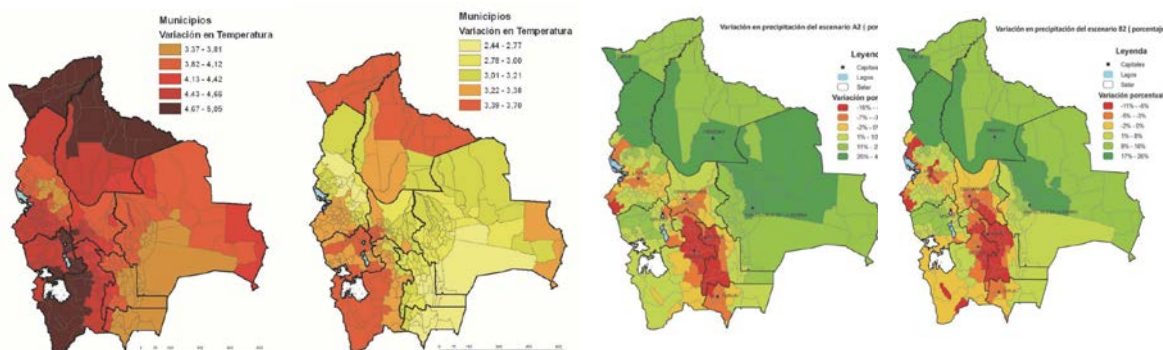
En este caso se analizará la Red RURRENABAQUE - RIBERALTA sin y con consideraciones de cambio climático. Esta red se encuentra en el departamento de Beni.

5.1.4.1 Cambio climático en Bolivia

Las temperaturas y precipitaciones fueron analizadas para el periodo 2071-2100 en términos de los escenarios climáticos A2 y B2, y comparados con el periodo base 1961-1990. El incremento en temperaturas medias, mínimas y máximas estaría entre 2,4°C y 3,7°C para el escenario B2 y entre 3,4°C y 5,1°C para el escenario A2. Los mayores incrementos de temperatura media se encontraría al sur del Altiplano y en el norte de Bolivia para ambos escenarios. Encontramos un incremento menor en la zona de los valles, donde existe un fuerte gradiente altitudinal. En la zona del Chaco, en la frontera con Paraguay, las proyecciones muestran de manera sistemática un menor incremento de la temperatura que la media nacional.

La precipitación muestra un comportamiento más variable que la temperatura. La precipitación promedio disminuye moderadamente en la zona altiplánica y se incrementa en las zonas bajas.

Figura 17. Variación en temperatura y precipitaciones para el periodo 2071-2100



Cambios en temperatura media anual entre 1961-1990 y 2071-2100 de acuerdo con el modelo PRECIS, escenarios A2 y B2 (En grados centígrados)

Cambios en precipitación media anual entre 1961-1990 y 2071-2100 de acuerdo con el modelo PRECIS, escenarios A2 y B2 (En porcentaje)

Fuente: La economía del cambio climático en Bolivia. BID-CEPAL 2014.

5.1.4.2 Supuestos

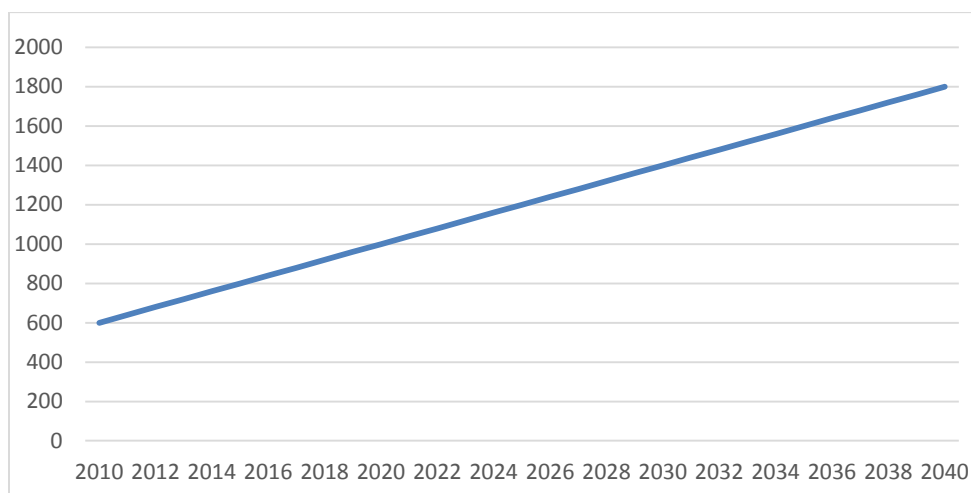
A continuación se describen los supuestos utilizados para el cálculo de la línea base. En el caso de Bolivia, los impactos se originan por aumentos en la temperatura esperada y por aumento en precipitaciones.

Supuestos de inversión

Distintas fuentes argumentan un primer tramo aprobado de más de 508 km según Administradora Boliviana de Carreteras (2014). Se asume un costo de inversión unitario de US \$1.196 mil. Otras fuentes de prensa sostienen que esta red sería incluso de 1.000 km en el largo plazo.

La figura siguiente presenta los supuestos de inversión y de stock de carretera pavimentadas.

Figura 18. Stock de carretera pavimentada (km)



Fuente: Elaboración propia.

Supuestos para operación y mantención

Se asume que la vida útil es de 20 años y que ésta cae a causa del cambio climático. Se asume un costo de mantención de US \$45 mil/km y que anualmente se mantiene una fracción del total correspondiente a $1/\text{vida útil}$.

5.1.4.3 Definición de escenarios

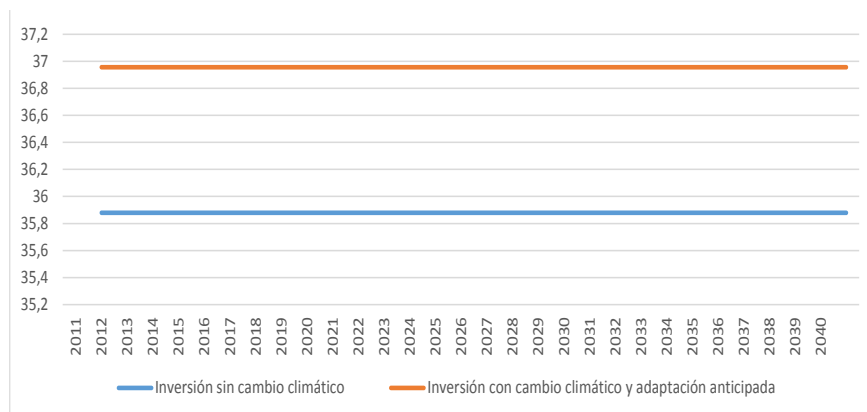
Para evaluar los costos del cambio climático se definen tres escenarios:

- 1) Un escenario sin cambio climático
- 2) Un escenario con cambio climático y adaptación anticipada. En este caso, se asume que se mejora el estándar de construcción, ya que el costo unitario de inversión aumenta en un 3% (asociado a aumento de temperatura y precipitaciones). En este caso, y para la nueva infraestructura, no es necesario aumentar la frecuencia de mantenimiento.
- 3) Un escenario con cambio climático y adaptación ad hoc. No se mejora el estándar de construcción (por lo que no se modifican costos de inversión), pero es necesario aumentar la frecuencia de mantenimiento. Se asume que la vida útil se reduce 10% (en 2 años).

Costos de capital

Los resultados para los escenarios con cambio climático (anticipado) y sin cambio climático (o bien con cambio climático ad hoc) se presentan en la figura siguiente. Anualmente se construyen 30 km de carretera, pero con distinto costo de inversión en cada escenario (por lo que estos costos son constantes en cada caso).

Figura 19. Costo de inversión por escenario (MM USD)

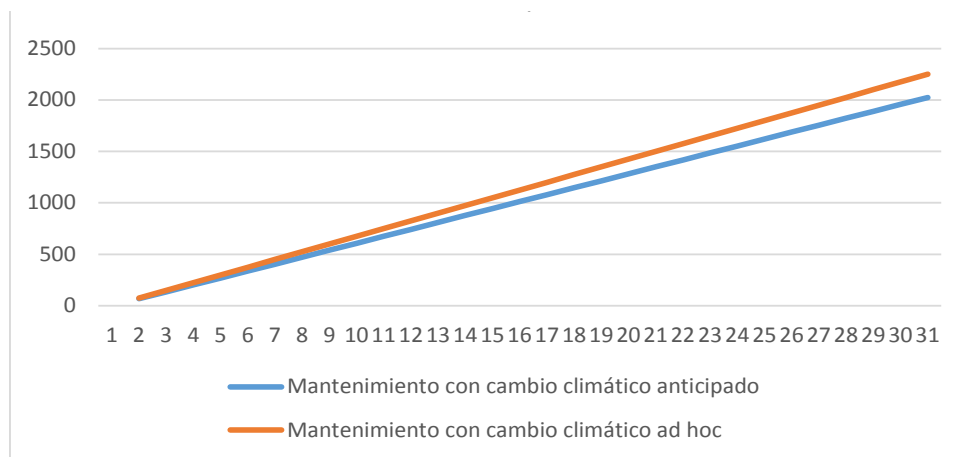


Fuente: Elaboración propia.

Costos de mantenimiento

La figura siguiente presenta los costos de mantenimiento para los escenarios con cambio climático anticipado (cuya nueva inversión no se modifica respecto al escenario sin cambio climático) y con cambio climático ad hoc (asociado a mayor frecuencia de mantenimiento para todo el stock).

Figura 20. Costos de mantenimiento por escenario (MM USD)



Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.4 Estimación de costos de adaptación al cambio climático

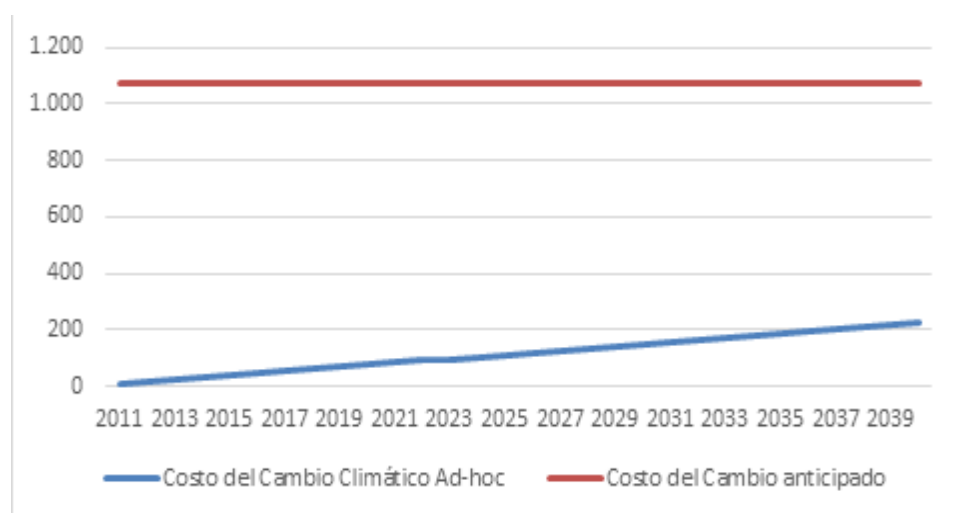
Los costos totales de cada escenario corresponden a la suma de costos de capital y mantenimiento. Por ello, para estimar los costos incrementales asociados al cambio climático se utilizan las relaciones:

$$COSTOS\ ANTICIPADO = COSTOS\ ESC.(ANTICIPADO) - COSTOS\ (SIN\ CC)$$

$$COSTOS\ AD\ HOC = COSTOS\ ESC.(AD\ HOC) - COSTOS\ (SIN\ CC)$$

La figura siguiente muestra los resultados. El caso anticipado arroja mayores costos que aquellos asociados a mayor frecuencia de mantenimiento (ad hoc).

Figura 21. Costos de adaptación al cambio climático en Bolivia (MM USD)



Fuente: Elaboración propia.

En este caso, el costo diferencial entre escenarios en valor presente es US \$14 MM, lo que nuevamente es muy bajo. Al igual que en el caso de Chile, los resultados son muy sensibles a cambios en parámetros relevantes.

5.2 *Análisis de medidas de infraestructura hídrica: Embalses en Chile*

El recurso hídrico es clave para el desarrollo de los países, en atención a lo fundamental que resulta ser para el desarrollo de las actividades humanas y productivas. La demanda del recurso se intensifica en los diversos sectores productivos; en general la población aumenta, demandando más servicios básicos. La incertidumbre en la disponibilidad del mismo recurso también va en aumento.

En el caso de Chile, los usos del agua se pueden agrupar en cinco grandes áreas: Agrícola, Agua Potable, Minería, Industrial y Energía. El manejo e inversiones de recursos hídricos para cada uso se reparten entre el sector privado y el público. El privado proporciona inversión para la infraestructura y la distribución de servicios concesionados o para el desarrollo privado, como son los casos de las empresas sanitarias, las hidroeléctricas, o la misma infraestructura para tratamiento de residuos industriales líquidos en el sector industrial, entre otros (PROGEA, 2011).

Por su parte, el sector público invierte en infraestructura de grandes obras de riego; obras para evacuar aguas de lluvias en áreas urbanas; obras fluviales y de mantención de cauces que permiten la protección de la población frente a la crecida de ríos; y, sistemas de agua potable en las comunidades rurales que no se encuentran en el ámbito de responsabilidad de las empresas sanitarias (PROGEA, 2011).

Para todos los usos mencionados, existe un riesgo relacionado a los impactos que pudiera ocasionar el cambio climático sobre los recursos. Este riesgo afectará la disponibilidad del recurso hídrico así como el comportamiento del régimen hidrológico de los ríos, afectando a su vez la eficiencia de la infraestructura hídrica en los distintos sectores.

Este es el argumento que mueve a la búsqueda de medidas de adaptación en el sector, de manera que se pueda contar con la disponibilidad de agua necesaria para mantener, al menos, los niveles de servicio actuales de la infraestructura hídrica en zonas específicas del país.

5.2.1 Impacto del cambio climático en el sector

La información respecto a los impactos y problemas productos del cambio climático existe a gran escala en Chile, no obstante, cuando se quiere ir a una escala más acotada de diseño de obras, se requiere información más detallada que no existe a nivel nacional. En efecto, existen pocas cuencas con estudios de impacto del cambio climático, entre ellas se encuentran el Maule y la Laja⁶.

Respecto a la metodología para definir las medidas de adaptación al cambio climático, según PROGEA (2011), se parte del supuesto que, para cada subtipo de

⁶ Información recopilada de entrevista de Sra. X. Vargas y Sr. J. McPhee.

infraestructura, hay una relación entre los costos de inversión, los parámetros de diseño y la zona geográfica donde se implementa. Esto implica:

- Identificación de obras representativas a nivel nacional por cada subtipo;
- Recopilación de los parámetros de diseño para cada caso, considerando principalmente aquellas variables relacionadas con la condición climática y los caudales pasantes;
- Recopilación de los costos asociados a las obras seleccionadas;
- Análisis de la información:
 - Exploración del impacto de la condición climática futura en los parámetros de diseño de las distintas obras;
 - Para obras diseñadas para eventos extremos se analizan las precipitaciones diarias máximas;
 - Para obras de operación anual, se consideran las precipitaciones mensuales y agregadas a nivel anual.
- Propuesta de medidas y definición de una aproximación que permita estimar el incremento en la inversión.

Lo anterior permite analizar algunos casos de infraestructura específicos, en los cuales se puede contar con toda la información. No obstante, se debe resaltar que hay una dificultad importante para lograr una representatividad a nivel nacional, por lo cual la extrapolación relativa al incremento en la inversión no se logra sustentar con supuestos robustos para evaluar las medidas de adaptación, como se explica más adelante.

Respecto al criterio de existencia de la información que permite construir la línea base de la infraestructura en el sector hídrico, se cuenta con la ventaja que las inversiones públicas se concentran principalmente en una sola institución: el Ministerio de Obras Públicas (MOP), a través de su Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

El estudio PROGEA (2011) contempla las obras de inversión del sector público, que se enuncian a continuación:

- Grandes y medianas obras de riego
- Obras de Agua Potable Rural (APR) en localidades concentradas y semiconcentradas
- Planes maestros de aguas lluvias y obras de evacuación; y obras de drenaje de aguas lluvias
- Planes maestros de obras fluviales y obras de manejo de cauces;
- Captura de información: Red Hidrométrica

Para este análisis se considera el caso de grandes y medianas obras de riego. En este tipo de infraestructura se definen medidas de adaptación según las categorías agregadas de los distintos tipos de inversión en infraestructura y que corresponden al aprovisionamiento del recurso, incluyendo aquellas obras que permiten provisionar recursos hídricos con distintos fines. Luego, se identifican las siguientes posibles medidas de adaptación:

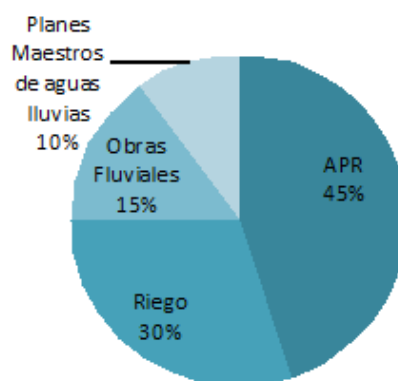
- Construcción de nuevos embalses;
- Reparar y aumentar capacidades de los embalses;

Estas medidas coinciden con los desafíos identificados por la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas en su documento MOP (2010).

Las principales inversiones en el periodo histórico – 2005 a 2010 – se concentraron en las obras de agua potable rural y en las grandes y medianas obras de riego hasta el 2008. En efecto, para el año 2005, las inversiones en obras de APR corresponden al 66,7% de las inversiones totales. Por su parte, riego sólo representó el 21,4%, las obras fluviales representaron el 8,7%, los planes maestros de aguas lluvias el 2,9% de las inversiones totales al año 2005 y, finalmente, la red hidrométrica representó el 0,1% de las inversiones (PROGEA, 2011).

No obstante, a partir del año 2008 esta tendencia cambia, dando paso a mayores inversiones en grandes y medianas obras de riego, cuyo peso relativo en las inversiones realizadas es de un 30%, mientras que APR baja a 45%, aguas lluvias representa el 10% y obras fluviales un 15%. La siguiente figura representa la distribución de la inversión para el año 2008 (PROGEA, 2011).

Figura 22. Principales inversiones en el año 2008 para cada subsector



Nota: Debido a que las inversiones de la Red Hidrometeorológica son poco significativas, en comparación con las otras inversiones, no se consideró en el gráfico.

Fuente: PROGEA (2011).

La proyección de línea base de la infraestructura hídrica se realiza sobre la base de información de la Dirección de Obras Hidráulica y el informe MOP (2010). Con esta información, se identifican nuevas tendencias en las inversiones del subsector hídrico, donde para el año 2020 se proyecta que el 43% de las inversiones totales corresponderán a grandes y medianas obras de riego, mientras que el 35% a obras de APR, el 14% a aguas lluvias y el 8% restante a obras fluviales.

A continuación se presenta una breve descripción de las categorías de obra y los subtipos de infraestructura que considera.

En la clasificación de las grandes y medianas obras de riego se consideran los siguientes tipos de infraestructura:

- Estudios obras de riego
- Construcción de obras de riego
- Explotación obras de riego
- Programa de fortalecimiento
- Inspección técnica de proyectos postulados a la Ley de Fomento al Riego
- Conservación obras de riego

En este subconjunto de obras, las inversiones de línea base se concentran en construcción de obras de riego y conservación de obras de riego entre los años 2005 y

2007. La proyección posterior al año 2007 indica que la tendencia se mantiene con la salvedad que los estudios en obras de riego empiezan a requerir inversiones de financiamiento mayores. No obstante, son poco significativas comparadas con los requerimientos de inversión en la construcción de obras propiamente tal (PROGEA, 2011).

5.2.2 Antecedentes del caso en estudio

La institucionalidad chilena relacionada al diseño e implementación de la infraestructura de recursos hídricos está repartida en un conjunto limitado de organizaciones, como son la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas, y la Comisión Nacional de Riego (CNR).

La DOH es la institución encargada de la ejecución y mantención de infraestructura de riego, gestión de aguas lluvias y sistemas de agua potable rural; la CNR, la entidad encargada de fomentar las obras privadas de construcción y reparación de obras de riego y drenaje, así como de promover el desarrollo agrícola de los productores de las áreas beneficiadas; y la DGA se encarga de promover la gestión y administración del recurso hídrico en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente, como también de proporcionar y difundir la información generada por su red hidrométrica y la contenida en el Catastro Público de Aguas con el objeto de contribuir a la competitividad del país y mejorar la calidad de vida de las personas.

Entre los años 1990 y 2000, el gobierno desarrolló importantes obras de embalses que significaron un aumento de 440 millones de m³ en la capacidad de almacenamiento, así otorgando seguridad de riego a cerca de 68 mil hectáreas. En este período también se invirtió en el desarrollo de estudios de los embalses el Bato, Convento Viejo II Etapa y Ancoa, los cuales actualmente se encuentran en distintas fases de ejecución y que en un futuro cercano permitirán aumentar la capacidad de almacenamiento por aproximadamente 350 millones de m³. Adicionalmente, en este período se hicieron inversiones importantes en la reparación de embalses, en concordancia con el objetivo de la DOH de mantener y/o aumentar la seguridad de riego (PROGEA, 2011).

La política para el período 2010-2030 parece estar marcada por el fuerte desarrollo esperado de la actividad agrícola en el país. La justificación de esto radica principalmente en que la actividad se verá favorecida por las oportunidades a nivel mundial, a saber: i)

desplazamiento del cultivo para alimentos por el cultivo para el desarrollo de biocombustibles, en países de América, Europa y Asia; así como, ii) una recuperación en la demanda de productos agropecuarios una vez superada la recesión mundial. Por ello, el Ministerio de Agricultura proyecta una transformación del país en potencia agroalimentaria, con el consecuente aumento en requerimientos del recurso hídrico y en infraestructura de obras de riego.

Bajo este escenario, los lineamientos de política para la infraestructura de grandes y medianas obras de riego para los próximos años están claramente acotados a programas de inversión en infraestructura de riego hasta el año 2020. Con el desafío de transformar a Chile en potencia agroalimentaria, el programa de inversiones proyecta invertir hacia el año 2020 alrededor de US \$2.200 millones para concluir embalses en ejecución e iniciar ejecución de nuevos embalses. Esta información se puede revisar en detalle en el informe sectorial MOP (2010).

El programa de inversión en canales va de la mano con el desafío de ser potencia agroalimentaria. No sólo basta con aumentar la capacidad de almacenamiento, sino que también es importante usarlos en forma eficiente. La política de inversión en infraestructura también ha considerado la modernización de los canales existentes, así como la construcción de nuevos canales requeridos para las nuevas obras de riego. La inversión total proyectada para el año 2020 asciende a US \$270 MM. La proyección de los lineamientos de inversión considera una inversión total proyectada para el año 2020 de US \$530.300 MM (MOP, 2010).

5.2.3 Definición de línea base

A continuación se presenta la línea base del subsector considerado en infraestructura hídrica en grandes y medianas obras de riego.

La construcción de la línea base para la infraestructura asociada a grandes y medianas obras de riego se hace a partir de la información otorgada por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Para el periodo 2007-2010 se utilizó la información contenida en los Balances de Gestión Integral de la DOH (2007-2010), los cuales son emitidos año a año. En ellos se describen los resultados de la gestión y las inversiones totales realizadas en riego, las cuales se desagregan por cada subtipo de inversión:

- Estudios obras de riego
- Construcción de obras de riego
- Explotación obras de riego
- Programa de fortalecimiento
- Inspección técnica de proyectos postulados a la Ley de Fomento al Riego
- Conservación obras de riego

Los balances describen cada iniciativa de inversión realizada, su costo total estimado y la ejecución en el año analizado, las cuales se clasifican dentro de un subtipo de inversión.

Para el periodo 2011-2030, la construcción de la línea base se realiza a base del documento MOP (2010). Este documento contiene una visión sobre los requerimientos en cuanto a obras hidráulicas del Chile 2020 que impulsa el estado. El plan 2010-2020, especificado en el documento, considera sólo el subtipo de inversión “Construcción de Obras de Riego” y presenta el Programa de Inversiones en Embalses para el periodo 2010-2020. También presenta el Programa de Canales 2010-2020. Basándose en estos planes, se pudo construir la línea base para el ítem de construcción de obras de riego.

Finalmente, para el periodo 2021-2030, se realizó una proyección a base de la tendencia observada en el periodo anterior. Los supuestos asociados a esta proyección se describen más adelante.

5.2.4 Supuestos

A continuación se describen los supuestos utilizados para el cálculo de la línea base.

Supuestos de inversión

En el caso de los embalses proyectados para el periodo 2010-2016 en el Plan 2010-2020, el monto total invertido en cada embalse se dividió en partes iguales dentro del periodo de construcción que contempla cada embalse.

Para los embalses proyectados para el periodo 2015-2020 en el Plan 2010-2020, dado que no se especifica la duración de la construcción de cada embalse, se dividió el monto total de la inversión de cada embalse en seis años (2015-2020).

El Plan 2010-2020 establece que los canales en ejecución se terminarán dentro del periodo 2010-2020. Dado que no se conoce el año exacto de término de cada canal, la inversión por ejecutar para cada canal se dividió en partes iguales para el periodo 2010-2020.

El monto de inversión en construcción de obras de riego se proyectó como un monto constante a partir del año 2020, ya que el Plan 2020 establece ese monto constante a partir del año 2017.

Se proyecta el revestimiento de 1.000 km de canales para el periodo 2010-2020, según el Plan 2020. Dado que no se especifican los kilómetros de revestimiento anual, se dividió el monto total proyectado en partes iguales para el periodo 2010-2020.

En el siguiente cuadro se resumen los valores de estas inversiones.

Cuadro 9. Embalses en el periodo 2010-2016 y revestimiento de canales al 2020

Región	Embalse	Volumen (millones m³)	Inversión estimada (MMUS\$)
XV	Chironta	17	80
III	Mejoramiento Lautaro	25	2
IV	Valle Hermoso	20	70
V	Chacillas	27	60
V	Puntilla el Viento	112	540
VII	Empedrado	3	14
VIII	Lonquén	31	30
VIII	Punilla	600	440
Total		835	1.236

	Programa (km)	Valor programa (MMS\$)	Valor programa (MMUS\$)
Programa al 2010-2020	1.000	100.000	200
Programa al 2012-2016	500	50.000	100

Fuente: MOP (2010).

Supuestos para operación y mantención

Para la proyección de los flujos de operación y mantención del ítem conservación obras de riego para el periodo 2010-2030, se calculó la fracción promedio histórica entre construcción y conservación de obras de riego. De este modo, se obtuvo que el 16,22% de la inversión anual en construcción de obras de riego corresponde a la conservación de obras de riego (PROGEA, 2011).

La proyección del ítem explotación de obras de riego para el periodo 2010-2030 se basa en el porcentaje que representa este ítem con respecto a la construcción de obras de riego. Los expertos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile

consideran que la explotación de obras de riego representa un 0,5% de la inversión anual en construcción de obras de riego.

En el cuadro siguiente se resumen los costos en grandes y medianas obras de riego para el periodo 2010-2030.

Cuadro 10. Costos anuales en grandes y medianas obras de riego, periodo 2010-2030 (Millones de USD, 2007)

Año	Conservación Obras de Riego	Construcción de Obras de Riego	Estudios Obras de Riego
2010	15.847	105.322	5.793
2011	24.042	159.787	8.788
2012	38.427	255.392	14.047
2013	35.737	237.511	13.063
2014	27.542	183.045	10.067
2015	50.689	336.882	18.529
2016	44.108	273.146	15.023
2017	26.713	177.541	9.765
2018	26.713	177.541	9.765
2019	26.713	177.541	9.765
2020	28.669	177.541	9.765
2021	28.669	177.541	9.765
2022	28.669	177.541	9.765
2023	28.669	177.541	9.765
2024	28.669	177.541	9.765
2025	28.669	177.541	9.765
2026	28.669	177.541	9.765
2027	28.669	177.541	9.765
2028	28.669	177.541	9.765
2029	28.669	177.541	9.765
2030	28.669	177.541	9.765

Fuente: Elaboración propia, basado en PROGEA (2011).

5.2.5 Escenarios de adaptación para el Sector Infraestructura Subsector Hídrico

Las consecuencias del cambio climático tienen un impacto directo sobre las infraestructuras relacionadas al subsector hídrico. La disminución de precipitación anual, la mayor intensidad de precipitaciones, la mayor ocurrencia de crecidas y la disminución del recurso hídrico en napas subterráneas y aguas superficiales, exigen un cambio en el diseño de las obras, o, en otras palabras, exige que las obras se adapten a este nuevo escenario. Esto tiene como objetivo mantener el nivel actual de servicio de la infraestructura hídrica en aquellas zonas que se vean afectadas por el cambio climático, principalmente en lo que respecta a

reducción de precipitaciones, siguiendo los lineamientos entregados por la política para el desarrollo agrícola nacional.

De esta forma, los actuales planes relacionados al subsector hídrico tendrían que modificarse, de manera de poder cumplir con los objetivos propuestos bajo un nuevo escenario.

A continuación se presenta la descripción de la medida de adaptación al cambio climático, con las aproximaciones realizadas para su evaluación (PROGEA, 2011).

Descripción de la medida “Construcción de nuevos embalses”

Para analizar la medida se han considerado los siguientes antecedentes:

- Los embalses contruidos no siempre podrán ser modificados para ampliar su capacidad de embalse. Es decir, el peraltamiento de los muros no siempre sería una solución factible.
- En caso de considerar la opción de peraltar, para poder dimensionar los costos asociados, se debiera contar con información más detallada y específica a cada embalse.
- En Chile existen antecedentes de sólo dos embalses donde se podría peraltar: El Bato y Corrales, cuyos dimensionamientos fueron superiores a los que realmente se construyeron. Se desconoce si esto sucedió por temas presupuestarios o si se estaba considerando la posibilidad de peraltarlo a futuro.
- Conforme a lo observado en línea base, el período que transcurre entre el diseño de un embalse y su construcción completa es entre 8 y 12 años. En los últimos 10 años se ha iniciado el proceso con al menos 10 embalses, algunos en etapa de estudio y otros en construcción.

Con todo lo anterior, y considerando que la proyección es hasta el año 2020, la medida que se ha considerado es proyectar la construcción de embalses nuevos en aquellas zonas donde, existiendo otro embalse o no, los caudales pasantes permitan la operación de un embalse nuevo que pueda provisionar el recurso para diversos usos.

Supuestos de penetración o cobertura

La evidencia de los estudios de variabilidad climática realizados en Chile muestra que las condiciones climáticas a futuro implicarán una disminución de la precipitación anual. Con ello, es esperable que, en algunas obras, la seguridad de riego se vea afectada. Para analizar esta medida se intentó revisar la capacidad de distintos embalses, con la intención de comparar el caudal afluente al embalse con la demanda de riego en la situación actual (sin cambio climático) y en la situación con cambio a futuro, considerando el escenario A2 (PROGEA, 2011) (CONAMA, 2007).

Sólo se logró conseguir la información relativa a cuatro embalses, a saber: Embalses de Chironta de la XV Región, Punilla y Lonquén de la VIII Región y La Paloma de la IV Región. A modo de ejemplo, para visualizar la ubicación de algunos de ellos, en el Anexo se presenta la ubicación geográfica de dos de ellos: Embalse Punilla y Embalse Paloma (PROGEA, 2011).

Para estos casos, se trabajó bajo el supuesto de que la relación de caudal-precipitación efectiva se mantiene constante en la situación con y sin cambio climático. Lo que, junto con la información de las precipitaciones proyectadas al 2030 con cambio climático, permite obtener el caudal afluente futuro, frente a esta variación climática.

A continuación se describen los cálculos realizados, de acuerdo a PROGEA (2011), para obtener el caudal afluente futuro bajo el escenario de cambio climático. De modo de facilitar la comprensión de los cálculos, se consideraron los valores del embalse Lonquén como ejemplo.

- Se calculó la precipitación efectiva promedio (470.7 mm/año), de acuerdo al registro de precipitaciones anuales para el periodo 1964-1990.
- A través de los cálculos registrados por el modelo PRECIS (mencionado anteriormente), se obtuvo la precipitación bruta regional promedio (2.150 mm/año).
- La relación entre los dos valores mencionados anteriormente permite obtener el porcentaje de PP_{efectiva} versus PP_{bruta} (22%).
- Del modelo PRECIS se obtuvo la precipitación bruta regional promedio con cambio climático (1.769,7 mm/año).

- Luego, se obtuvo la precipitación efectiva promedio con cambio climático, tras multiplicar la precipitación bruta regional promedio con cambio climático (1.769,7 mm/año) por el porcentaje $P_{efectiva}/P_{bruta}$ (22%), lo que arrojó un valor de 389,3 mm/año.
- Posteriormente, se obtuvo el volumen afluente, tras multiplicar la precipitación efectiva promedio con cambio climático (389,3 mm/año) por el área de la cuenca (299 km²).

El cuadro a continuación detalla los cálculos de precipitaciones y caudal bajo ambos escenarios para los cuatro embalses analizados.

Cuadro 11. Parámetros hídricos por embalse bajo el escenario sin y con cambio climático

	Embalse			
	Lonquén	Chironta	Punilla	Paloma
Escenario sin cambio climático				
Precipitación efectiva promedio (mm/año)	470,7	27,9	751,9	238,5
Precipitación bruta regional promedio (mm/año)	2150	80,2	2150	281,8
Porcentaje PP efectiva/PP bruta	22%	35%	35%	85%
Escenario con cambio climático				
Precipitación efectiva promedio (mm/año)	389,3	28,3	618,9	218,5
Precipitación bruta regional promedio (mm/año)	1769,7	81,5	1769,7	258,1
Porcentaje PP efectiva/PP bruta	22%	35%	35%	85%
Volumen Afluente (Hm ³ /año)	116,4	59,5	776,1	404,6

Fuente: Elaboración propia basado en PROGEA (2011).

Finalmente, se comparó el caudal afluente con cambio climático (116,41 Hm³/año) con el caudal de demanda (24,01 Hm³/año), y se obtuvo que el caudal afluente con cambio climático es mayor al caudal de demanda ($Q_a > Q_s$). La tabla a continuación detalla los cálculos del volumen afluente para cada embalse.

Cuadro 12. Relación entre caudal afluente con cambio climático y caudal de demanda

	Embalse			
	Lonquén	Chironta	Punilla	Paloma
Q_a (Hm ³ /año)	116,4	59,5	776,1	404,6
Q_s (Hm ³ /año)	24,0	38,9	600,0	397,4
Q_a v/S Q_s	$Q_a > Q_s$	$Q_a > Q_s$	$Q_a > Q_s$	$Q_a > Q_s$

Fuente: Elaboración propia basado en PROGEA (2011)

Del cuadro se concluye que, en los cuatro casos analizados en el estudio PROGEA (2011), el caudal afluente con cambio climático es mayor al caudal de demanda. Para poder definir si realmente se satisface la demanda, se debe analizar el modelo de operación con este nuevo caudal afluente, desagregado a nivel mensual. Esto permite hacer los supuestos gruesos sobre la disponibilidad de agua y la seguridad de riego, obteniéndose, para el caso del Embalse Lonquén, que en la situación con variabilidad climática (escenario A2) aún se satisface la demanda y que además existen rebalses. Lo anterior es una aproximación gruesa para hacer el análisis respecto de si existe o no. Como en este caso existe un recurso disponible para ser embalsado, se puede proponer, bajo el contexto de una aproximación, que éste sirve para construir un segundo embalse. Es importante resaltar que no se disponía de acceso a información adecuada de otros embalses, por lo que no se pudo hacer este mismo análisis y no se pudo definir un supuesto más robusto para la evaluación.

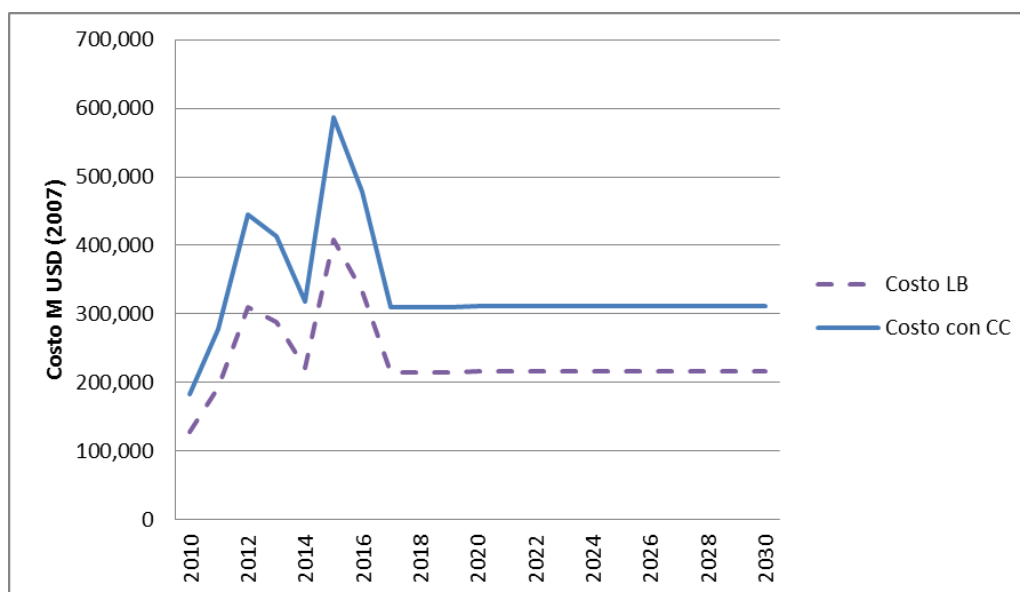
5.2.6 Estimación de costos de adaptación al cambio climático

En esta sección se presenta la aplicación de la metodología para proyectar las inversiones requeridas para la implementación de las medidas de adaptación. Éstas se hacen con supuestos de incremento en la inversión a modo de ejercicio, dado que no se logró fundamentar supuestos adecuados, debido a la falta de información y falta de estudios que se requieren en forma previa a la aplicación de la metodología.

La medida de adaptación propuesta apunta a embalsar el máximo del recurso disponible. Se propone construir nuevos embalses en aquellas zonas más vulnerables, siempre que el caudal pasante lo permita. Considerando que la entrada en operación de embalses observada en los últimos años es, en promedio, 1 embalse cada 5 años, se propone para el periodo 2011-2030 construir 4 embalses adicionales a los proyectados.

La figura a continuación resume las inversiones bajo el escenario de línea base y el escenario de medida de adaptación al cambio climático.

Figura 23. Resumen inversiones sin y con considerar el cambio climático



Fuente: Elaboración propia basado en PROGEA (2011).

A modo de ejemplo, la siguiente tabla presenta los flujos considerados para el año 2012.

Cuadro 13. Ejemplo de estimación del costo adicional para la medida

Subtipo Inversión	Año	Monto (Miles de USD, 2007)		
		Base	Medida	Adicional
Construcción de Obras de Riego	2012	255.392	383.088	127.696
Estudios Obras de Riego	2012	14.047	21.070	7.023
Explotación Obras de Riego: Manejo y Control	2012	1.185	1.777	592

Fuente: Elaboración propia basado en PROGEA (2011)

5.2.7 Resultados de la Evaluación

A partir de las evaluaciones, es posible obtener algunos indicadores financieros interesantes basados en los resultados de la evaluación de los flujos. En este caso, se estimará el valor presente neto de los costos, descontando los flujos a la tasa social de descuento (7%) y un análisis de sensibilidad de este indicador, sensibilizado a las tasas del 3% y 9%. Estos resultados se presentan en el siguiente cuadro para la situación base, el escenario con cambio climático y el diferencial entre ambas situaciones.

Cuadro 14. Análisis de sensibilidad costos actualizados situación base, con medidas y diferencial

Tasa de Descuento	Costo Actualizado Situación Base (Miles de USD, 2007)	Costo Actualizado con CC (Miles de USD, 2007)	Delta de Costos (Miles de USD, 2007)
7%	2.576.720	3.699.771	1.123.051
9%	2.214.156	3.179.508	965.352
3%	3.637.904	5.222.277	1.584.373

Fuente: Elaboración propia

A partir del cuadro anterior, se puede apreciar que sería necesario invertir del orden de US \$1.000 millones (actualizados al año 2007) para implementar las medidas propuestas en el ejercicio.

6. Conclusiones

Los resultados de la evaluación muestran que en la actualidad existen muchas brechas en términos de información y análisis. Para definir y evaluar las medidas, no sólo se debe contar con una línea base robusta, sino que también se debe tener una aproximación fundamentada respecto a los impactos sobre la infraestructura producto del cambio climático. Lo anterior es con el fin de identificar las medidas que tienen sentido y evaluarlas en función del impacto del cambio climático sobre estas obras.

Este último tema es clave en el caso de la infraestructura vial, donde existe literatura muy incipiente y poca experiencia a nivel de los países de la región para estimar el impacto de los aumentos de la temperatura y las precipitaciones sobre el pavimento.

Si bien existe información relevante, tanto en Chile como en Bolivia, respecto al stock de carreteras y los planes de desarrollo futuro, existe muy poca información acerca de las opciones de desarrollar dicha infraestructura en un estándar distinto, pensando en variables como los desastres naturales o la adaptación al cambio climático.

Existen además, variables políticas que dificultan el acceso a información validada de manera objetiva y consensuada, dada la competencia que existe actualmente en la industria entre el desarrollo de infraestructura vial basada en asfalto o concreto.

A pesar de lo anterior, se han estimado los costos incrementales del impacto del cambio climático en la infraestructura vial de ambos países, lográndose aumentos sobre el 100% del costo en Chile y en más de 5 veces en el caso de Bolivia.

En la infraestructura hídrica en Chile, la dificultad se ve aumentada por una combinación de dos elementos: (1) Diferencias geográficas, que implican variaciones espaciales y temporales en las condiciones climáticas y, por tanto, en el impacto del cambio climático y en la disponibilidad del recurso hídrico, así como en sus eventos extremos; y, (2) falta de información histórica sistematizada, que permita tener como referencia estudios que se han desarrollado en el país.

Como se expone en el análisis de las medidas de adaptación, se encontraron diversas dificultades, las cuales no permitieron llegar a supuestos robustos respecto a los requerimientos de inversión para una evaluación del costo de adaptación a nivel nacional. A continuación se resumen estas dificultades, incertidumbres y limitaciones:

- Embalses: se requería analizar un número representativo de embalses, con el fin de buscar los supuestos adecuados que permitieran extrapolar el análisis a un requerimiento de inversión a nivel nacional. Para ello, el estudio PROGEA (2011) intentó buscar la relación entre la operación de los embalses con el impacto asociado a la variabilidad climática futura y los requerimientos de inversión. Las dificultades encontradas en este proceso fueron:
 - No se cuenta con información hidro-climática que permita tener una referencia de los impactos producto del cambio climático.
 - No existe un registro centralizado de la información hidrológica y de operación de los embalses a nivel nacional. Cada administrador de embalse es el encargado de obtenerla y no tiene la obligación de transmitirla a un nivel central.
 - La DOH cuenta con la información de diseño de los embalses, pero en los estudios digitalizados o en papel, sin tener la información definitiva sistematizada. De todas maneras, la DOH facilitó los modelos de operación de seis embalses. No obstante, sólo uno tenía todos los antecedentes que permitían hacer el análisis adecuado.

El proceso de construcción de la línea base consta de una etapa de recopilación de información histórica, de ordenamiento de la información, de identificación de políticas del

sector y de proyección de la inversión en línea base. Cabe resaltar que para la proyección al año 2020, se contó con la información del estudio “Infraestructura Hidráulica del Chile 2020”, publicado en el año 2010 por la DOH. Este estudio sirve de base para la proyección hasta el año 2030, con algunos supuestos de desagregación.

A pesar de las dificultades, se ha estimado que el aumento del costo dado el impacto de la adaptación al cambio climático, en el caso de la infraestructura hídrica en Chile (embalses), es del orden de US \$1.000 millones, lo que corresponde a más de 50% del costo de la situación sin cambio climático.

Referencias

- Agrawala, S., y S. Fankhauser. 2008. *Economics aspects of adaptation to climate change. Costs, benefits and policy instrument*. Paris, Francia: OECD.
- Agrawala, S. et al. 2010. "Plan or react? Analysis of adaptation costs and benefits using integrated assessment models". OECD Environment Working Papers 23. Paris, Francia: OECD Publishing.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2008. *Manual Metodológico de Evaluación Multicriterio para Programas y Proyectos*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Chinowsky, P.S., A.E. Schweikert y N.L. Strzepek. 2010. "Costing and impact methodology development under climate change research project". Boulder, Estados Unidos: University of Colorado. Manuscrito no publicado. Disponible en: http://www.clislab.org/docs/costing_impact_methodology.pdf
- CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente). 2007. "Estudio de variabilidad climática en Chile para el siglo XXI". Santiago, Chile: Universidad de Chile, Departamento de Geofísica.
- Dannenbergh, A. et al. 2009. "The economics of adaptation to climate change: The case of Germany". Discussion Paper No. 09-057. Mannheim, Alemania: Center for European Economic Research.
- DOH (Dirección de Obras Hidráulicas). 2007-2010. "Balance de gestión integral". Santiago, Chile: DOH.
- European Commission. 2013. "Adapting infrastructure to climate change". SWD(2013) 137. Bruselas, Bélgica: European Commission.
- GIZ (Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). 2013. *Economic approaches for assessing climate change adaptation options under uncertainty: Excel tools for cost-benefit and multi-criteria analysis*. Bonn, Alemania: Competence Center for Climate Change.
- GSF (Global Climate Change Alliance Support Facility). 2011. *Costing, assessing and selecting, adaptation and mitigation, options and measures. Training workshop on mainstreaming climate change: Module 6*. Broomfield, Colorado, Estados Unidos: MWH.

- Hayhoe, K. et al. 2010. "An integrated framework for quantifying and valuing climate change impacts on urban energy and infrastructure: A Chicago case study". *Journal of Great Lakes Research* 36 (Supplement 2): 94-105.
- Middelbeek, L., K. Kolle and H. Verrest. 2014. "Built to last? Local climate change adaptation and governance in the Caribbean: The case of an informal urban settlement in Trinidad and Tobago". *Urban Climate* 8: 138-154.
- MOP (Ministerio de Obras Públicas) 2010. "Infraestructura hidráulica del Chile 2020". Santiago, Chile: Dirección de Obras Hidráulicas.
- . 2010. *Chile 2020: Obras Públicas para el Desarrollo*. Santiago, Chile: MOP, Gobierno de Chile.
- Neumann, J. 2009. "Adaptation to climate change: Revisiting infrastructure norms". Issue Brief 09-15. Washington, DC, Estados Unidos: Resources for the Future.
- Niang-Diop, I., y H. Bosch. 2011. "Formulating an adaptation strategy". Dakar, Senegal: University Cheikh Anta Diop.
- Nordhaus, W.D. 1991. "To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect". *Economic Journal* 101(407): 920-937.
- Oficina Española de Cambio Climático 2014. *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Tercer Programa de Trabajo 2014-2020*. Madrid, España: Oficina Española de Cambio Climático, Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Parry, M. et al. 2009a. *Assessing the costs of adaptation to climate change: A review of the UNFCCC and other recent estimates*. London, Reino Unido: International Institute for Environment and Development and Grantham Institute for Climate Change.
- Parry, M. et al. 2009b. "Adaptation to climate change: Assessing the costs: Investment and financial flows to address climate change". *Environment* 51(6): 29-36.
- Pelling, M. 2010. *Adaptation to climate change: From resilience to transformation*. London, Reino Unido: Routledge.
- Programa de Gestión y Economía Ambiental (PROGEA). 2011. "Estudio de estimación de flujos de inversión y financieros para la adaptación en el sector silvoagropecuario, la mitigación en el sector transporte y la adaptación en el subsector hídrico de la infraestructura". Santiago, Chile: Programa de las Naciones Unidas para el

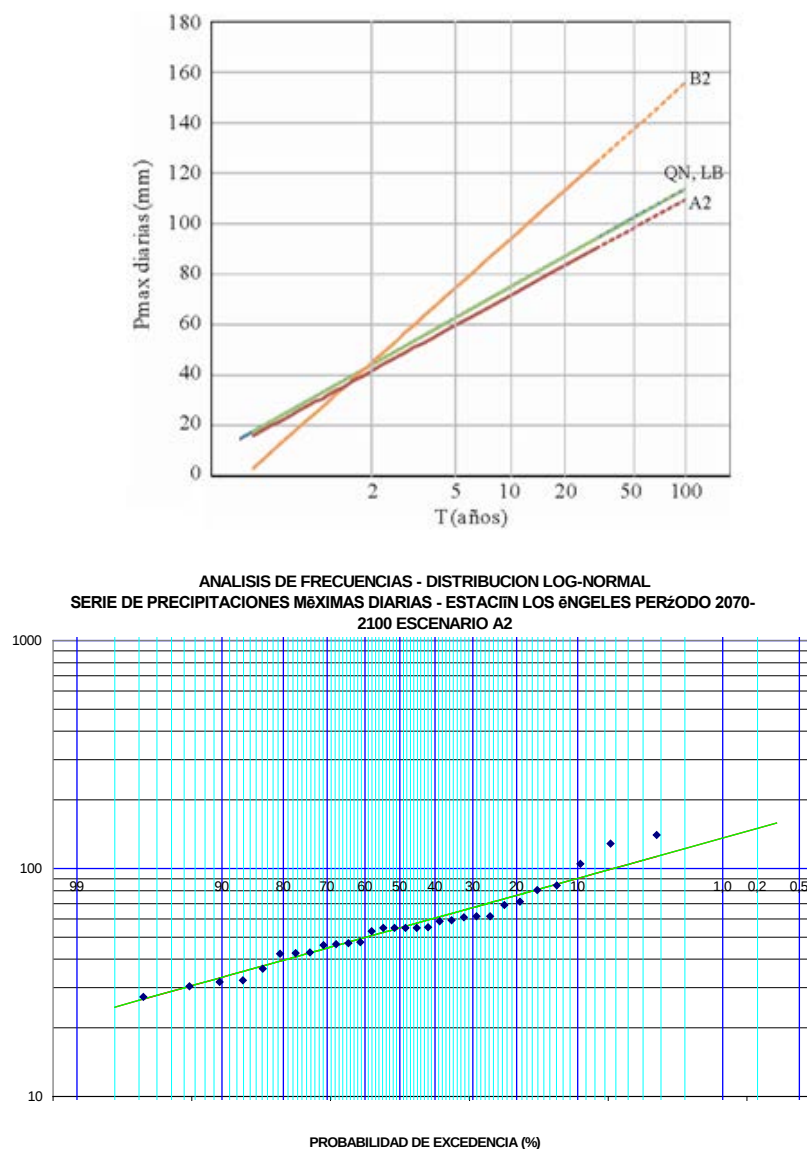
- Desarrollo, Ministerio del Medio Ambiente de Chile y Universidad de Chile.
Disponible en: http://www.sinia.cl/1292/articles-50188_evafludeinversion.pdf
- Rivera, C., y C. Wamsler. 2014. “Integrating climate change adaptation, disaster risk reduction and urban planning: A review of Nicaraguan policies and regulations”. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 7: 78–90.
- Rojas, M. 2013. “Consultoría para la elaboración de un estudio sobre estado del arte de modelos para la investigación del calentamiento global”. Reporte para el Proyecto MAPS-Chile. Santiago, Chile: Ministerio del Medio Ambiente.
- Sekimoto, T. et al. 2013. “A new criterion and probabilistic approach to the performance assessment of coastal facilities in relation to their adaptation to global climate change.” *Ocean Engineering* 71: 113-121.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2002. *Annotated guidelines for the preparation of national adaptation programs of action*. Bonn, Alemania: UNFCCC.
- . 2007a. Thirteenth session of the Conference of the Parties (COP 13), Bali, Indonesia. Documentos disponibles en: http://unfccc.int/meetings/bali_dec_2007/session/6265.php
- . 2007b. *Investment and financial flows to address climate change*. Bonn, Germany: UNFCCC. Available at: http://unfccc.int/resource/docs/publications/financial_flows.pdf
- Willems, P. 2013. “Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium”. *Journal of Hydrology* 496: 166–177.
- World Bank. 2010. *The costs to developing countries of adapting to climate change: New methods and estimates: The global report of the economics of adaptation to climate change study*. Washington, DC, Estados Unidos: World Bank.
- Yilmaz, B., y N. Harmancioglu, N. 2010. *Multi criteria decision making in water management: An indicator-based approach with application*. Saarbrücken, Alemania: Lambert Academic Publishing.

7. Anexos

7.1 Antecedentes caso infraestructura hídrica

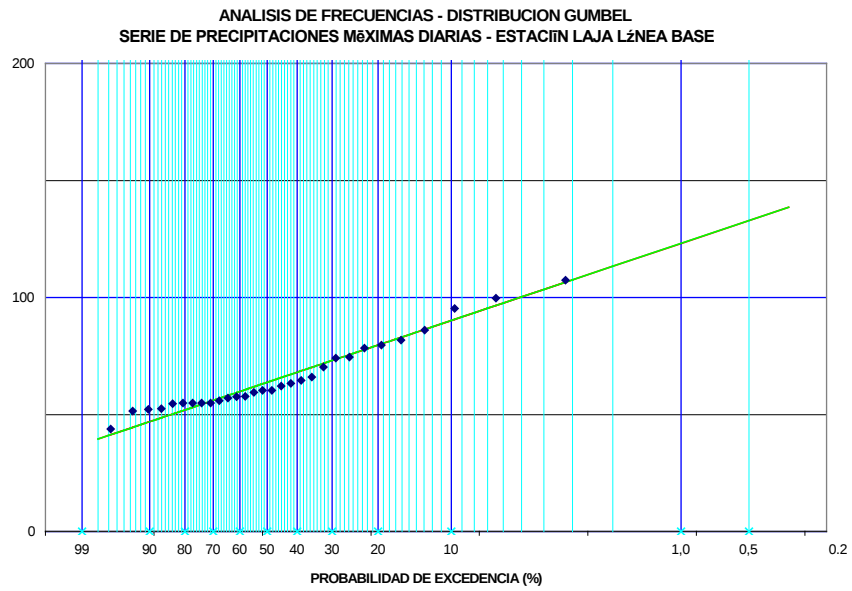
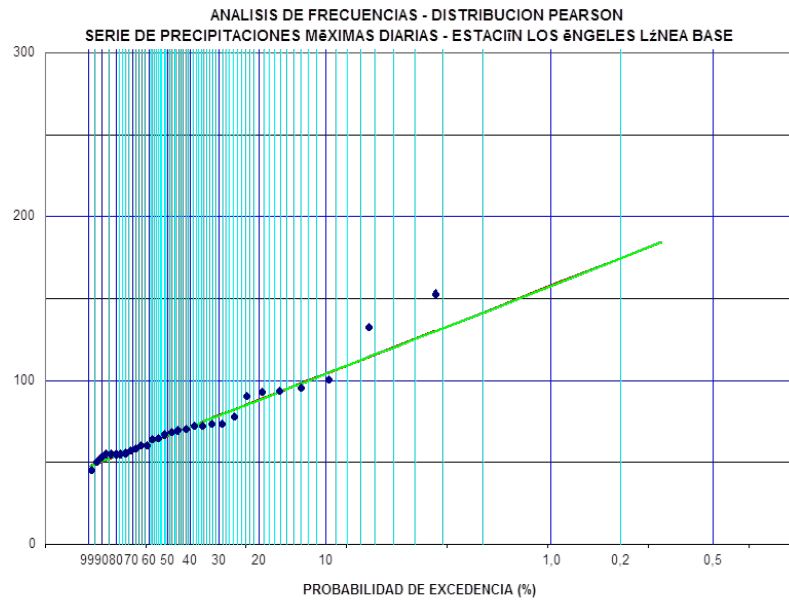
7.1.1 Gráficos de análisis de frecuencias y distribución⁷

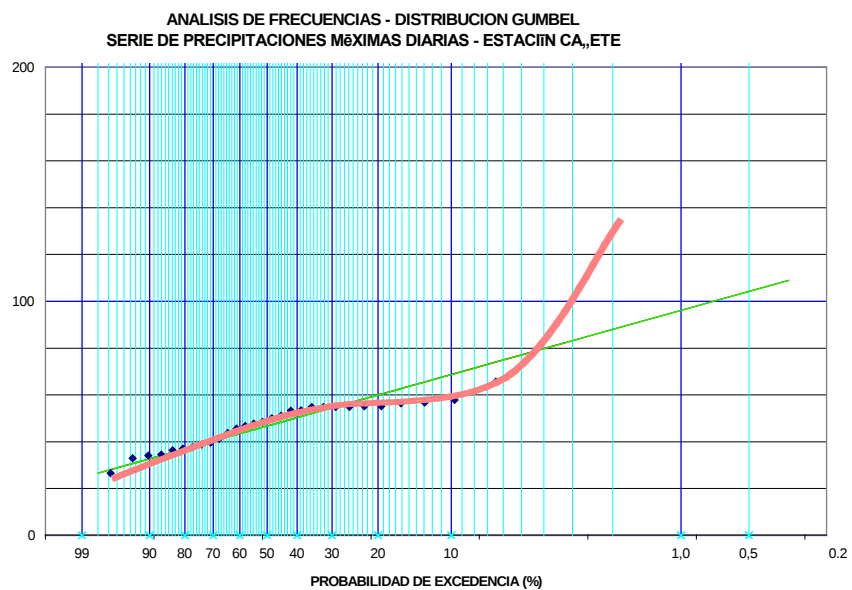
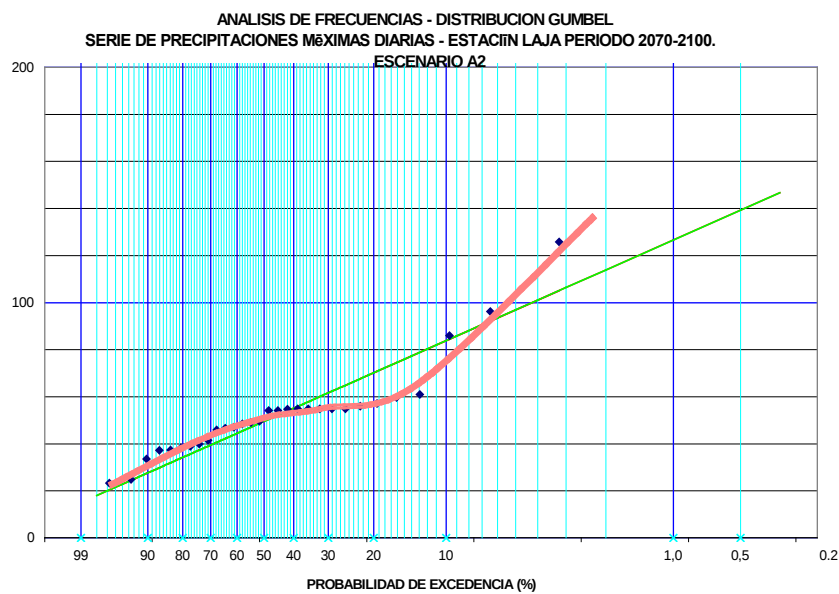
Figura 24. Análisis de frecuencia de P_{24} max para Q. Normal, Línea Base, A2 y B2, según ajuste a Distribución Gumbel⁸, resultados para series calibradas



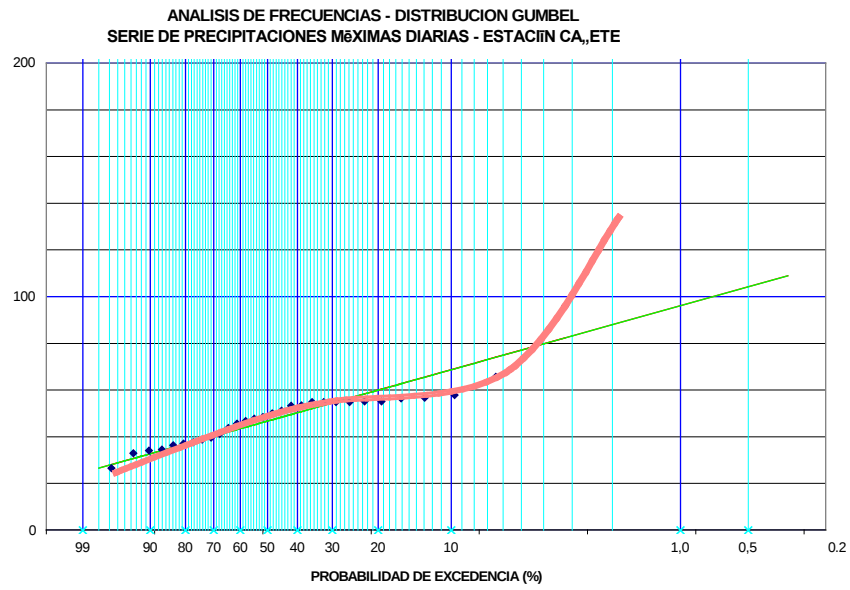
⁷ A partir de PROGEA (2011).

⁸ El eje de probabilidad (período de retorno) del gráfico se ha calculado en función de los coeficientes de frecuencia asociados a Quinta Normal. Las curvas de ajuste pueden no ser rectas para el resto de las series.

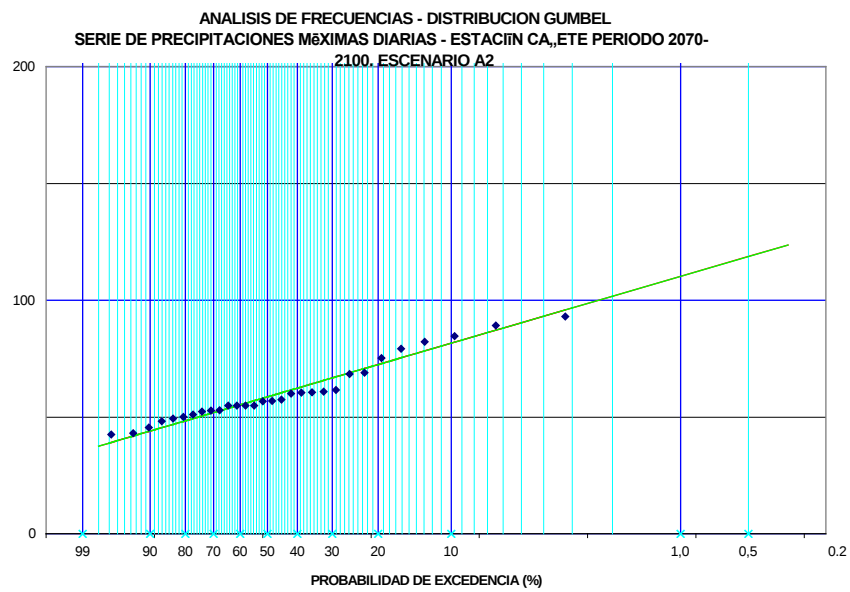




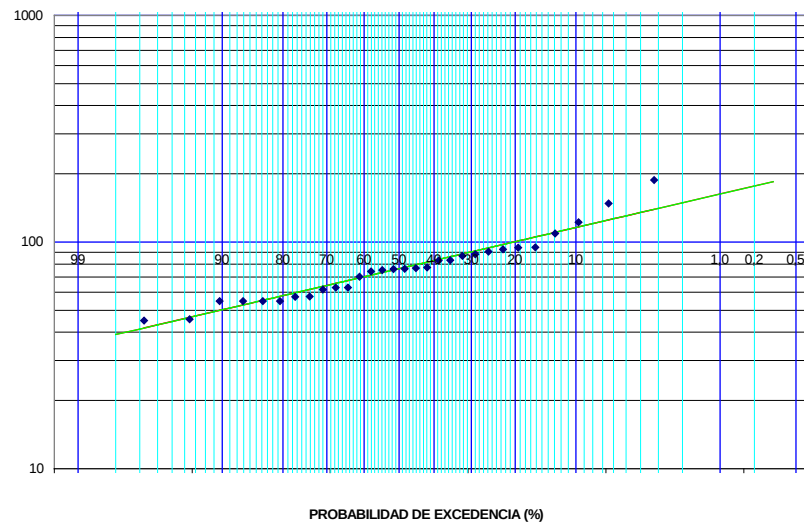
*Ninguna distribución se ajusta. Se adopta ajuste gráfico



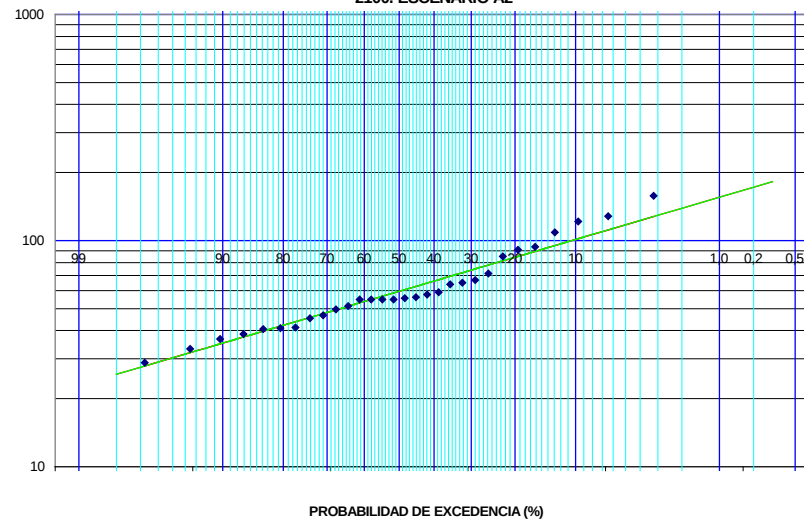
*Ninguna distribución se ajusta. Se adopta ajuste gráfico



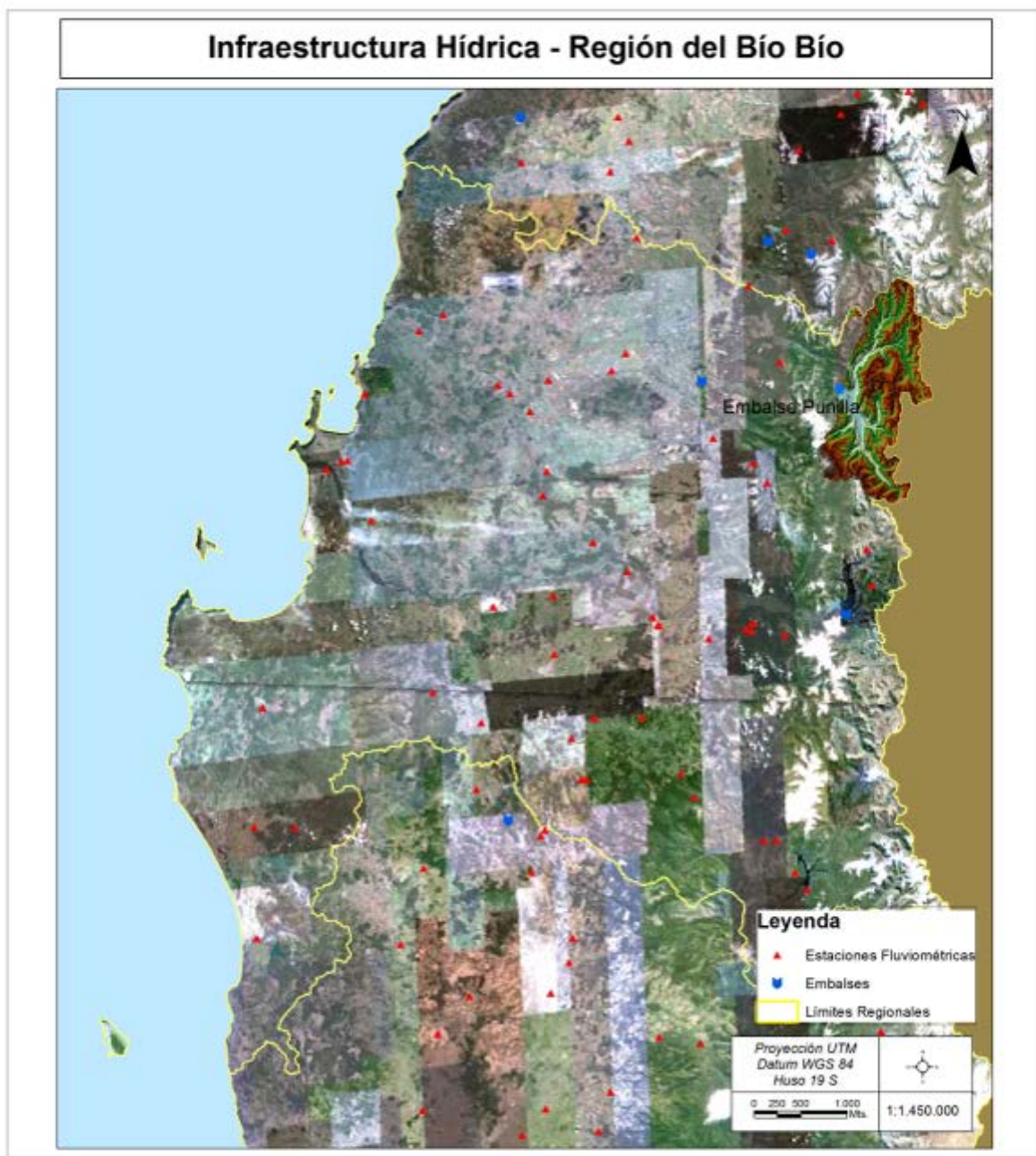
ANÁLISIS DE FRECUENCIAS - DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL
 SERIE DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS - ESTACIÓN CHILLANCITO LÍNEA BASE



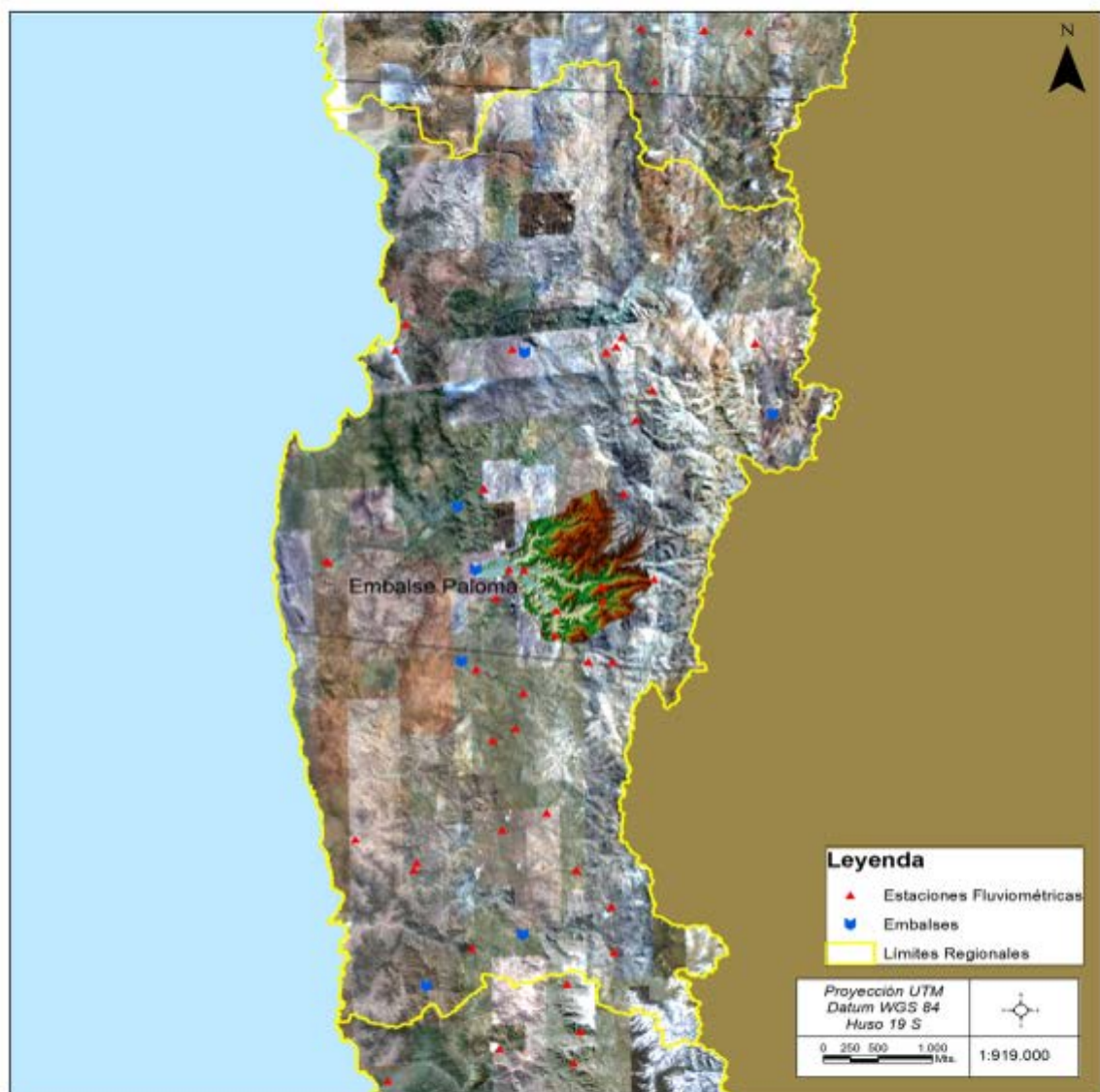
ANÁLISIS DE FRECUENCIAS - DISTRIBUCIÓN LOG-NORMAL
 SERIE DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS - ESTACIÓN CHILLANCITO PERÍODO 2070-2100, ESCENARIO A2



7.1.2 Infraestructura hídrica



Infraestructura Hídrica - Región de Coquimbo



7.2 Antecedentes caso infraestructura de carreteras

7.2.1 MODELO HDM-4 (Highway Development and Management System)

- 1. Modelos de deterioro, y efectos de las obras (RDWE por las siglas *Road Deterioration and Works Effects*.)** Estos modelos permiten predecir, para un periodo de análisis definido por el usuario, la evolución del estado físico de las carreteras en función de las solicitaciones impuestas por el tránsito, de las condiciones climatológicas, y del tipo de pavimento; asimismo, los modelos estiman los efectos de las obras de conservación y mejoramiento más usuales. El HDM-4 incorpora modelos para distintos tipos de pavimentos, tanto flexibles como rígidos.
- 2. Modelos de efectos para los usuarios (RUE por las siglas *Road User Effects*).** Son utilizados para calcular los efectos del estado físico y las condiciones de operación de las carreteras sobre los usuarios de las mismas, en términos de indicadores como los costos de operación vehicular y los tiempos de recorrido. A su vez, se emplean para obtener los beneficios derivados de las inversiones en proyectos carreteros.
- 3. Modelos de seguridad, energía y efectos ambientales (SEE por las siglas *Safety, Energy and Environmental Effects*).** Grupo de modelos destinados a determinar los efectos de la condición de los pavimentos en aspectos como la tasa de accidentalidad, consumo de energía asociado con la operación del tránsito, equipo de construcción y la emisión de contaminantes.

Causas de deterioro del pavimento

Factores climatológicos:

El HDM-4 incorpora al análisis los aspectos climatológicos mediante parámetros relacionados con la humedad y la temperatura, los cuales se establecen a partir de las Tablas 3.1 y 3.2. Para caracterizar las condiciones de humedad se utilizan variables que describen la precipitación y la humedad libre en la zona de estudio, mientras que las condiciones de temperatura se especifican con base en promedios anuales, rangos de variación mensual y número de días con temperaturas por arriba de un cierto límite.

Específicamente, el sistema considera los siguientes parámetros relacionados con la humedad, además de la precipitación media mensual.

Índice de humedad. Este parámetro está basado en el índice de Thornthwaite e indica qué tan seco o húmedo es una zona climática determinada.

Duración de la estación seca. Este indicador divide al año en dos estaciones y se indica como fracción del mismo.

En lo que se refiere a la temperatura, incluyendo a la temperatura media mensual, el HDM-4 utiliza las siguientes variables:

Rango promedio de temperaturas. Es el rango que comprende todas las temperaturas medias mensuales del año, o la diferencia entre la máxima y la mínima temperatura media mensual de cada uno de los meses del año.

Días con temperaturas mayores a 32° C. Número de días en el año en los cuales la temperatura ambiente excede los 32° C.

Tabla 3.1
Clasificación por humedad

Categoría	Precipitación media anual (mm)
Árido	< 300
Semiárido	De 300 a 800
Subhúmedo	De 800 a 1600
Húmedo	De 1500 a 3000
Muy húmedo	> 2400

Tabla 3.2
Clasificación por temperatura

Categoría	Promedio anual de rangos de temperatura (°C)
Tropical	20 a 35
Subtropical cálido	-5 a 45
Subtropical frío	-10 a 30
Templado frío	-20 a 25
Templado con congelamiento	-40 a 20

Características estructurales del pavimento

La capacidad estructural del pavimento se define mediante variables como número estructural, deflexiones, espesores de las capas, tipos de material y rigidez de la subrasante.

Tipos de pavimento considerados

Los modelos de deterioro del HDM-4 permiten analizar el comportamiento de una amplia gama de pavimentos asfálticos. Para ello, se utilizan variantes de los modelos específicos en la estimación de cada tipo de daño, o se modifican los coeficientes de los mismos. El HDM-4 clasifica los pavimentos asfálticos en función del tipo de superficie y del tipo de base, como puede apreciarse en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3
Clasificación de los pavimentos asfálticos en el HDM-4

Tipo de pavimento	Tipo de superficie	Tipo de Base	Descripción
AMGB	AM	GB	Mezcla asfáltica sobre base granular
AMAB		AB	Mezcla asfáltica sobre base asfáltica
AMSB		SB	Mezcla asfáltica sobre base estabilizada
AMAP		AP	Mezcla asfáltica sobre pavimento asfáltico
STGB	ST	GB	Tratamiento superficial sobre base granular
STAB		AB	Tratamiento superficial sobre base asfáltica
STSB		SB	Tratamiento superficial sobre base estabilizada
STAP		AP	Tratamiento superficial sobre pavimento asfáltico

Tipos de deterioro:

El HDM-4 modela el deterioro de pavimentos mediante los siguientes tipos:

Deterioros superficiales En esta categoría se incluyen:

- Agrietamiento
- Desprendimientos
- Baches
- Rotura de borde

De los deterioros anteriores, los tres primeros se caracterizan por dos fases, denominadas *de inicio* y *de progreso*. La fase de inicio se refiere al lapso de tiempo previo al desarrollo de un determinado tipo de deterioro. La fase de progreso comprende el periodo durante el cual se incrementa el área afectada y la magnitud del deterioro. La rotura de borde se modela considerando únicamente la fase de progreso.

Deterioros relacionados con la deformación del pavimento

En el HDM-4, la deformación de la estructura del pavimento se modela con:

- Roderas
- Irregularidad

Se considera que este tipo de deterioros varían en forma continua, por lo que sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso.

Deterioros relacionados con la textura superficial

Están relacionados con la capacidad del pavimento para evitar el deslizamiento de vehículos, particularmente en presencia de agua sobre la superficie. Para evaluar el estado del pavimento en este rubro, el HDM-4 utiliza los siguientes indicadores:

- Profundidad de la textura
- Resistencia al deslizamiento

Los parámetros anteriores también varían de forma continua, por lo que, como las roderas o la irregularidad, sólo se modelan mediante ecuaciones de progreso.

El HDM-4 modela cada uno de los deterioros anteriores en forma separada, sin embargo, en última instancia, combina los resultados para obtener un pronóstico de la irregularidad del pavimento.

La aplicación de los modelos de deterioro incluye, también, una estimación de la pérdida de capacidad estructural del pavimento en el tiempo y del deterioro del drenaje.

Componente debido a efectos ambientales

El incremento en el IRI debido a las condiciones ambientales es generado, entre otros factores, por variaciones en la humedad y temperatura de la zona de estudio, y se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta RI_e = m K_{gm} RI_a$$

donde:

ΔRI_e : Incremento de la irregularidad debido a los efectos climáticos durante el año de análisis

RI_a :Irregularidad al inicio del año de análisis

m :Coeficiente ambiental

K_{gm} : Factor de calibración para el componente de efectos ambientales

Incremento total de la rugosidad

El incremento total de la irregularidad del pavimento es:

$$\Delta RI = K_{gp} [\Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta RI_r + \Delta RI_t] + \Delta RI_e$$

La irregularidad al final del año de análisis está dado por:

$$RI_b = MIN[(RI_a + \Delta RI), a_0]$$

El promedio anual del IRI se obtiene como:

$$RI_{av} = 0.5(RI_a + RI_b)$$

donde:

ΔRI : Incremento total de la irregularidad durante el año de análisis

K_{gp} : Factor de calibración para el progreso de la irregularidad

RI_b : Irregularidad del pavimento al final del año de análisis

RI_a : Irregularidad del pavimento al inicio del año de análisis

RI_{av} : Promedio de la irregularidad para el año de análisis

a_0 : Límite máximo de irregularidad permitido por el HDM-4, (por omisión =16)

7.2.2 Valores referenciales m^2 de pavimento nuevo⁹

a)	Solución planteada en base a Carpeta Asfáltica sobre base estabilizada de 25 cm. de espesor y ejecución de soleras con zarpas para confinarla.	
	<u>Espesor Carpeta</u>	<u>Valor</u>
	e=0,06 m.	21.340 \$/m2.
b)	Solución en base a Carpeta Asfáltica sobre base estabilizada de 25 cm. de espesor y soleras con zarpas existentes.	
	<u>Espesor Carpeta</u>	<u>Valor</u>
	e=0,06 m.	17.910 \$/m2.
c)	Solución para Pasajes en base a Carpeta Asfáltica sobre base estabilizada de 20 cm., suministro y colocación de soleras tipo C para confinarla.	
	<u>Espesor Carpeta</u>	<u>Valor</u>
	e=0,04 m.	16.050 \$/m2.
d)	Solución en base a Carpeta de Hormigón sobre base estabilizada de 15 cm. de espesor, suministro y colocación de soleras.	
	<u>Espesor Carpeta</u>	<u>Valor</u>
	D1e=0,15 m.	28.170 \$/m2.
	D2e=0,18 m.	34.220 \$/m2.

⁹ Gobierno de Chile (2010).

e)	Solución en base a Carpeta de Hormigón sobre base estabilizada de 15 cm. de espesor, suministro y colocación de soleras.	<u>Espesor Carpeta</u> e=0,20 m.	<u>Valor</u> 37.030 \$/m2.
f)	Solución en base a Carpeta de Hormigón sobre base estabilizada de 15 cm. de espesor, con soleras existentes.	<u>Espesor Carpeta</u> F1e=0,15 m. F2e=0,18 m.	<u>Valor</u> 24.150 \$/m2. 29.790 \$/m2.
g)	Solución para Pasajes en base a Carpeta de Hormigón sobre base estabilizada de 15 cm. de espesor.	<u>Espesor Carpeta</u> e=0,12 m.	<u>Valor</u> 21.940 \$/m2.
h)	Construcción Ciclovía en base a carpeta asfáltica sobre base estabilizada de 20 cm espesor y colocación de soleras tipo "C" para confinamiento.	<u>Espesor Carpeta</u> e=0,03 m.	<u>Valor</u> 10.670 \$/m2.
i)	Construcción aceras en base a hormigón sobre base estabilizada de 7 cm. espesor.	<u>Espesor Carpeta</u> e=0,05 m.	<u>Valor</u> 9.097 \$/m2.
j)	Construcción de escaleras vía peatonal en pendiente elevada en hormigón de espesor medio 10.5 cm sobre base estabilizada de 0.10 m.	<u>Espesor Carpeta</u> e=0,105 m.	<u>Valor</u> 13.646 \$/m2.

VALORES REFERENCIALES M2 DE REPOSICION DE PAVIMENTO

a)	Solución planteada en base a Carpeta Asfáltica sobre base estabilizada de 25 cm. de espesor y ejecución de soleras con zarpas para confinarla.	<u>Espesor Carpeta</u> e=0,06 m.	<u>Valor</u> 24.230 \$/m2. Para reponer carpeta HCV existente. 22.940 \$/m2. Para reponer carpeta Asfalto existente
b)	Solución en base a Carpeta Asfáltica sobre base estabilizada de 25 cm. de espesor y soleras con zarpas existentes.	<u>Espesor Carpeta</u> e=0,06 m.	<u>Valor</u> 20.800 \$/m2. Para reponer carpeta HCV existente. 19.520 \$/m2. Para reponer carpeta Asfalto existente
c)	Solución para Pasajes en base a Carpeta Asfáltica sobre base estabilizada de 20 cm., suministro y colocación de soleras tipo C para confinarla.	<u>Espesor Carpeta</u> e=0,04 m.	<u>Valor</u> 18.940 \$/m2. Para reponer carpeta HCV existente. 17.660 \$/m2. Para reponer carpeta Asfalto existente

- d) Solución en base a Carpeta de Hormigón sobre base estabilizada de 15 cm. de espesor, suministro y colocación de soleras.

<u>Espesor Carpeta</u>	<u>Valor</u>
e=0,15 m.	31.060 \$/m2. Para reponer carpeta HCV existente.
	29.780 \$/m2. Para reponer carpeta Asfalto existente
e=0,18 m.	37.110 \$/m2. Para reponer carpeta HCV existente.
	35.820 \$/m2. Para reponer carpeta Asfalto existente

- e) Solución en base a Carpeta de Hormigón sobre base estabilizada de 15 cm. de espesor, suministro y colocación de soleras.

<u>Espesor Carpeta</u>	<u>Valor</u>
e=0,20 m.	39.920 \$/m2. Para reponer carpeta HCV existente.
	38.640 \$/m2. Para reponer carpeta Asfalto existente

- f) Solución en base a Carpeta de Hormigón sobre base estabilizada de 15 cm. de espesor, con soleras existentes.

<u>Espesor Carpeta</u>	<u>Valor</u>
e=0,15 m.	27.040 \$/m2. Para reponer carpeta HCV existente.
	25.750 \$/m2. Para reponer carpeta Asfalto existente
e=0,18 m.	32.680 \$/m2. Para reponer carpeta HCV existente.
	31.390 \$/m2. Para reponer carpeta Asfalto existente

- g) Solución para Pasajes en base a Carpeta de Hormigón sobre base estabilizada de 15 cm. de espesor.

<u>Espesor Carpeta</u>	<u>Valor</u>
e=0,12 m.	24.820 \$/m2. Para reponer carpeta HCV existente.
	23.540 \$/m2. Para reponer carpeta Asfalto existente

7.3 Costos de infraestructura en la región¹⁰

En esta sección se presentan las estimaciones de los costos de infraestructura de América Latina y el Caribe, los cuales sirven de sustento para la cuantificación monetaria de los flujos de inversiones requeridos que surgen de las metodologías empleadas en la sección siguiente. Además, se especifican ciertos montos porcentuales destinados al mantenimiento de los stocks.

En los esfuerzos por cuantificar la brecha de infraestructura — ya sea desde la dimensión horizontal o la vertical — resulta necesario contar con información referente a los costos de infraestructura sectoriales. Su proceso de obtención es complejo, en la medida en que intervienen diferentes factores en sus cálculos, tales como las tecnologías consideradas, y la estructura geográfica y demográfica, por citar algunos. A pesar de ello, lo que se ha buscado estimar, al igual que en los trabajos de Fay y Yepes (2003) y Fay (2001), son costos representativos o promedios, los cuales luego se utilizan como insumos para cuantificar monetariamente los requerimientos de flujos de inversión que surgen de las metodologías utilizadas.

Una preocupación importante del trabajo ha sido adecuar los costos de la manera más precisa posible a las características propias de la región. Con esta finalidad, se han consultado diferentes fuentes de información, incluyendo documentación oficial, fuentes privadas y especialistas sectoriales.

Por otra parte, y a los fines comparativos, los costos han sido valuados a dólares estadounidenses del año 2000.

7.3.1 Energía eléctrica

En la proyección del costo unitario de energía eléctrica se utilizó información de los siguientes países: Argentina, Brasil, Chile y México, que dan cuenta del 70% de la capacidad máxima de generación de energía eléctrica de América Latina y el Caribe en el año 2008. Los datos provinieron mayormente de fuentes oficiales, y contemplan programas de planificación energética a mediano plazo, que incluyen diferentes tecnologías asociadas a la generación eléctrica.

¹⁰ CEPAL (2007).

COSTO UNITARIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Pais	Costo en US\$ por kw adicional ^a	Fuente de Información
Argentina	2,103	"Elementos para el Diagnóstico y Desarrollo de la Planificación Energética Nacional 2008-2025", Ministerio de Planificación, 2009.
Brasil	2,452	"Plano Nacional de Eficiencia Energética", Ministerio de Minas y Energía, 2009.
Chile	2,069	"Balance de la Infraestructura en Chile", Cámara Chilena de la Construcción, 2010.
México	2,301	"Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024", Secretaría de Energía de México, 2009.
Promedio ^b	2,161	

Fuente: Elaboración de los autores.

^a El costo está valuado a US\$ de 2000 e incluye gastos en generación, transmisión y distribución.

^b Promedio ponderado por potencia máxima de generación de energía eléctrica en 2008.

7.3.2 Agua y saneamiento

Los costos de provisión de agua y saneamiento han sido obtenidos a base de la información del Banco Interamericano De Desarrollo, y toman en cuenta los costos de infraestructura en la provisión de accesos a aguas y saneamientos mejorados. La información disponible es específica para cada país e incluye la apertura por área geográfica urbana y rural.

COSTO DE PROVISIÓN DE ACCESOS A AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO

Costos per cápita en US\$ ^a

País	Agua Potable		Saneamiento	
	Urbano	Rural	Urbano	Rural
Argentina	184	186	278	73
Barbados	192	262	274	134
Belize	126	76	144	55
Bolivia (Est. Plur. Nac. de)	89	102	102	75
Brazil	152	130	210	74
Chile	184	184	278	208
Colombia	89	124	102	118
Costa Rica	126	81	144	57
Ecuador	89	109	102	85
El Salvador	126	72	144	55
Guatemala	126	72	144	83
Guyana	192	248	274	130
Haití	126	67	144	55
Honduras	126	81	144	55
Jamaica	192	197	274	202
México	172	170	139	52
Panamá	126	80	144	56
Paraguay	184	186	278	65
Perú	89	93	102	97
República Dominicana	126	59	144	55
Trinidad and Tobago	192	237	274	130
Uruguay	184	183	278	74
Venezuela (Rep. Bol. de)	89	115	102	112

Fuente: Elaboración de los autores, con datos de "Las metas del milenio y las necesidades de inversión en América Latina y el Caribe", Banco Interamericano de Desarrollo, 2003.

^a El costo está valuado a US\$ de 2000.

7.3.3 Transporte terrestre

El costo en transporte se divide en caminos pavimentados y vías férreas. En el primer caso, las erogaciones tienen en cuenta las necesidades de inversión de las autopistas de alto estándar y de carreteras secundarias. Las fuentes de información han sido: documentos de CEPAL, Ministerio de Obras Públicas de Chile, y especialistas del sector. Por su parte, los costos de un kilómetro de vías férreas fueron provistos por especialistas del sector y tienen en cuenta una topografía media e incluyen las erogaciones de los sistemas de control y señalización.

COSTOS UNITARIOS EN TRANSPORTE TERRESTRE

	Costo en US\$ por km ^a	Fuente de Información
Caminos Pavimentados	1 600 000	El costo de un kilómetro de carretera depende, al igual que para las vías férreas, de la topografía de la región. El valor presentado es una ponderación de costos promedios para caminos de autopista de alto estándar y de carreteras secundarias. Las fuentes de información corresponden a CEPAL, Ministerio de Obras Públicas de Chile, y especialistas del sector.
Vías Férreas	1 800 000	El costo de un kilómetro de vía férrea varía dependiendo de la topografía de la región (i.e.: gradientes, ríos y otros) y de las obras específicas a realizar en los sectores urbanos. En proyectos de pasajeros, especialmente suburbanos debe considerarse también la electrificación y, teniendo en cuenta la densidad de tráfico, los sistemas de señalización y control. El valor presentado es representativo de características medias de las consideraciones anteriores. La información ha sido provista por expertos del sector para América Latina y el Caribe.

Fuente: Elaboración de los autores.

^a El costo está valuado a US\$ de 2000.

7.3.4 Telecomunicaciones

La estructura de costos en telecomunicaciones de telefonía fija y móvil se obtuvo a base de trabajos previos del Banco Mundial, información de organismos públicos y privados y especialistas del sector. Por su parte, el costo de provisión de internet de banda ancha de acceso fijo fue obtenido con información proveniente del Ministerio de Comunicaciones de Brasil y datos de inversiones de empresas del sector, y contempla un mix tecnológico que incluye prestaciones con DSL, Cable Modem y Fibra Óptica al Hogar:

COSTOS UNITARIOS EN TELECOMUNICACIONES

(Costo en US\$)

	Costo en US\$ ^a	Fuente de Información
Líneas Fijas	381	El costo de una línea fija de teléfono ha sido obtenido en base a información proveniente del Banco Mundial y de organismos públicos y privados de Perú y Chile. Tiene en cuenta la participación entre población urbana y rural y sus diferentes costos asociados.
Líneas Móviles	338	El costo de un suscriptor de telefonía celular ha sido obtenido en base a fuentes de información de organismos públicos y privados de Perú y Chile.
Internet de Banda Ancha de acceso fijo	1 083	El costo de provisión de servicios de Internet de banda ancha ha sido obtenido con base a información proveniente del Ministerio de Comunicaciones del Gobierno de Brasil y de empresas del sector y contempla una canasta tecnológica de DSL, Cable Modem y Fibra óptica al hogar. Las ponderaciones de cada tecnología se realizaron en base a consultas con fuentes del sector.

Fuente: Elaboración de los autores.

^a El costo está valuado a US\$ de 2000.

7.3.5 Gastos relativos al mantenimiento

También han sido consideradas las necesidades de mantenimiento del stock de infraestructura. A estos fines se han utilizado los porcentajes propuestos por Fay y Yepes (2003), quienes señalaron que los mismos no buscan representar un monto óptimo para gastos en mantenimiento, sino un promedio mínimo de gasto anual debajo del cual el funcionamiento normal de las redes resultaría amenazado. Estos valores son los siguientes:

MANTENIMIENTO DEL STOCK DE INFRAESTRUCTURA	
Sector	Porcentaje del valor de stock asignado a mantenimiento
Capacidad de Generación Eléctrica	2
Telefonía Fija	8
Telefonía Móvil	8
Banda Ancha	20
Caminos Pavimentados	2
Rutas Férreas	2
Acceso a Aguas Mejoradas	3
Acceso a Mejoras Sanitarias	3

Fuente: Fay y Yepes, 2003 y especialistas del sector.

7.3.6 Sistema de conocimiento de costos de carretera (ROCKS - Road Costs Knowledge System)

Escenario: Latinoamérica

Costs per Km Statistics (2000 US\$/km)													
Work Category	Work Class	Work Type	Average	Minimum	Maximum	St Dev.	Count	Predominant Work Activity	Average	Minimum	Maximum	St Dev.	Count
Preservation	Routine	Routine Maintenance	2037	695	5193	1117	24	Routine Maintenance Earth Road	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Routine Maintenance Gravel Road	1356	1356	1356	#DIV/0!	1
								Routine Maintenance Block 2L Highway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Routine Maintenance Bituminous 2L Highway	2007	695	5193	1142	21
								Routine Maintenance Concrete 2L Highway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Routine Maintenance Bituminous > 2L Highway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Routine Maintenance Concrete > 2L Highway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Routine Maintenance Bituminous Expressway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Routine Maintenance Concrete Expressway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	Periodic	Grading	192	51	591	167	15	Light Grading	101	51	164	40	11
								Heavy Grading	441	323	591	111	4
								Gravel Resurfacing	14508	3182	31286	7058	36
								Concrete Pavement Preventive Treatment	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Bituminous Pavement Preventive Treatment	7818	2310	15346	5805	4

Costs per Km Statistics (2000 US\$/km)													
Work Category	Work Class	Work Type	Average	Minimum	Maximum	St Dev.	Count	Predominant Work Activity	Average	Minimum	Maximum	St Dev.	Count
		Resurfacing						Single Surface Treatment	19988	5917	38607	8160	22
							Double Surface Treatment	29874	11748	47912	9475	20	
							Triple Surface Treatment	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	
		Asphalt Mix	66763	17700	164202	27369	118	Asphalt Overlay < 40 mm	44523	24327	82320	18171	19
		Resurfacing						Asphalt Overlay 40 to 59 mm	77838	29175	164202	23630	71
	Rehabilitation	Strengthening	147426	31458	478158	75024	139	Asphalt Overlay 60 to 79 mm	129844	96296	180761	33224	6
								Asphalt Overlay 80 to 99 mm	125179	67592	300083	40521	47
								Asphalt Overlay > 99 mm	189083	68447	478158	86397	42
								Mill and Replace	158975	54458	353720	102537	16
								Bonded Concrete Overlay	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Unbounded Concrete Overlay	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		Concrete Pavement Restoration	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	Concrete Slab Replacement	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Concrete Slab Repair	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Concrete Diamond Grinding	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		Reconstruction	174450	14996	574952	100464	142	Reconstruction Earth	14996	14996	14996	#DIV/0!	1
								Reconstruction Gravel	38246	28866	47625	13265	2
					Reconstruction Block	78007	78007	78007	#DIV/0!	1			
					Reconstruction Bituminous	176010	36974	574952	99081	133			
					Reconstruction Concrete	310955	250466	371445	85545	2			
Development	Improvement	Partial Widening	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	Partial Widening to Gravel 2L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
							Partial Widening to Block 2L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	
							Partial Widening to Bituminous 2L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	
							Partial Widening to Concrete 2L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	
	Partial Widening and Reconstruction	160623	8219	400314	210117	3	Partial Widening and Reconstruction to Gravel 2L	40777	8219	73334	46043	2	
					Partial Widening and Reconstruction to Block 2L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A		

Costs per Km Statistics (2000 US\$/km)													
Work Category	Work Class	Work Type	Average	Minimum	Maximum	St Dev.	Count	Predominant Work Activity	Average	Minimum	Maximum	St Dev.	Count
								Partial Widening and Reconstruction to Bituminous 2L	400314	400314	400314	#DIV/0!	1
								Partial Widening and Reconstruction to Concrete 2L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		Widening	1977121	322375	5785612	1684686	12	Widening Adding Bituminous 1L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Widening Adding Bituminous 2L	1443879	322375	3497181	1132812	10
								Widening Adding Bituminous 4L	4643333	3501055	5785612	1615426	2
								Widening Adding Concrete 1L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Widening Adding Concrete 2L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Widening Adding Concrete 4L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		Widening and Reconstruction	1911880	262532	6532523	2600128	5	Widening and Reconstruction Adding Bituminous 1L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Widening and Reconstruction Adding Bituminous 2L	1911880	262532	6532523	2600128	5
								Widening and Reconstruction Adding Bituminous 4L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Widening and Reconstruction Adding Concrete 1L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Widening and Reconstruction Adding Concrete 2L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								Widening and Reconstruction Adding Concrete 4L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
	Upgrading	331061	58408	812265	193515	53	Upgrading to Earth 2L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	
							Upgrading to Gravel 2L	67736	58408	77064	13192	2	
							Upgrading to Block 2L	193738	153631	325644	50515	10	
							Upgrading to Bituminous 2L	377870	110037	812265	201505	38	
							Upgrading to Concrete 2L	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	
	New Construction	New 1L Road	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	New Earth 1L Road	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								New Gravel 1L Road	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								New Block 1L Road	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								New Bituminous 1L Road	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								New Concrete 1L Road	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		New 2L Highway	846613	359831	1985876	499379	8	New Earth 2L Highway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
							New Gravel 2L Highway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	

Costs per Km Statistics (2000 US\$/km)													
Work Category	Work Class	Work Type	Average	Minimum	Maximum	St Dev.	Count	Predominant Work Activity	Average	Minimum	Maximum	St Dev.	Count
								New Block 2L Highway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								New Bituminous 2L Highway	846,613	359,831	1,985,876	499,379	8
								New Concrete 2L Highway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		New 4L Highway	1151397	1012413	1414853	228275	3	New Bituminous 4L Highway	1151397	1012413	1414853	228275	3
								New Concrete 4L Highway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		New 6L Highway	1990155	1289094	2691215	991449	2	New Bituminous 6L Highway	1990155	1289094	2691215	991449	2
								New Concrete 6L Highway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		New 4L Expressway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	New Bituminous 4L Expressway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								New Concrete 4L Expressway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
		New 6L Expressway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	New Bituminous 6L Expressway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
								New Concrete 6L Expressway	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

Referencias

- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) 2011. *La brecha de infraestructura en América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Fay, M. 2001. “Financing the future: Infrastructure needs in Latin America, 2000-05.” Policy Research Working Paper Series 2545. Washington, DC, Estados Unidos: World Bank.
- Fay, M., y T. Yepes. 2003. “Investing in infrastructure: What is needed from 2000 to 2010?” Policy Research Working Paper 3102. Washington, DC, Estados Unidos: World Bank.
- Gobierno de Chile 2010. “Circular 9”. Santiago, Chile: Secretaria Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo Región O’Higgins. Disponible en:
http://www.serviuohiggins.cl/archivos/circular_9.pdf.