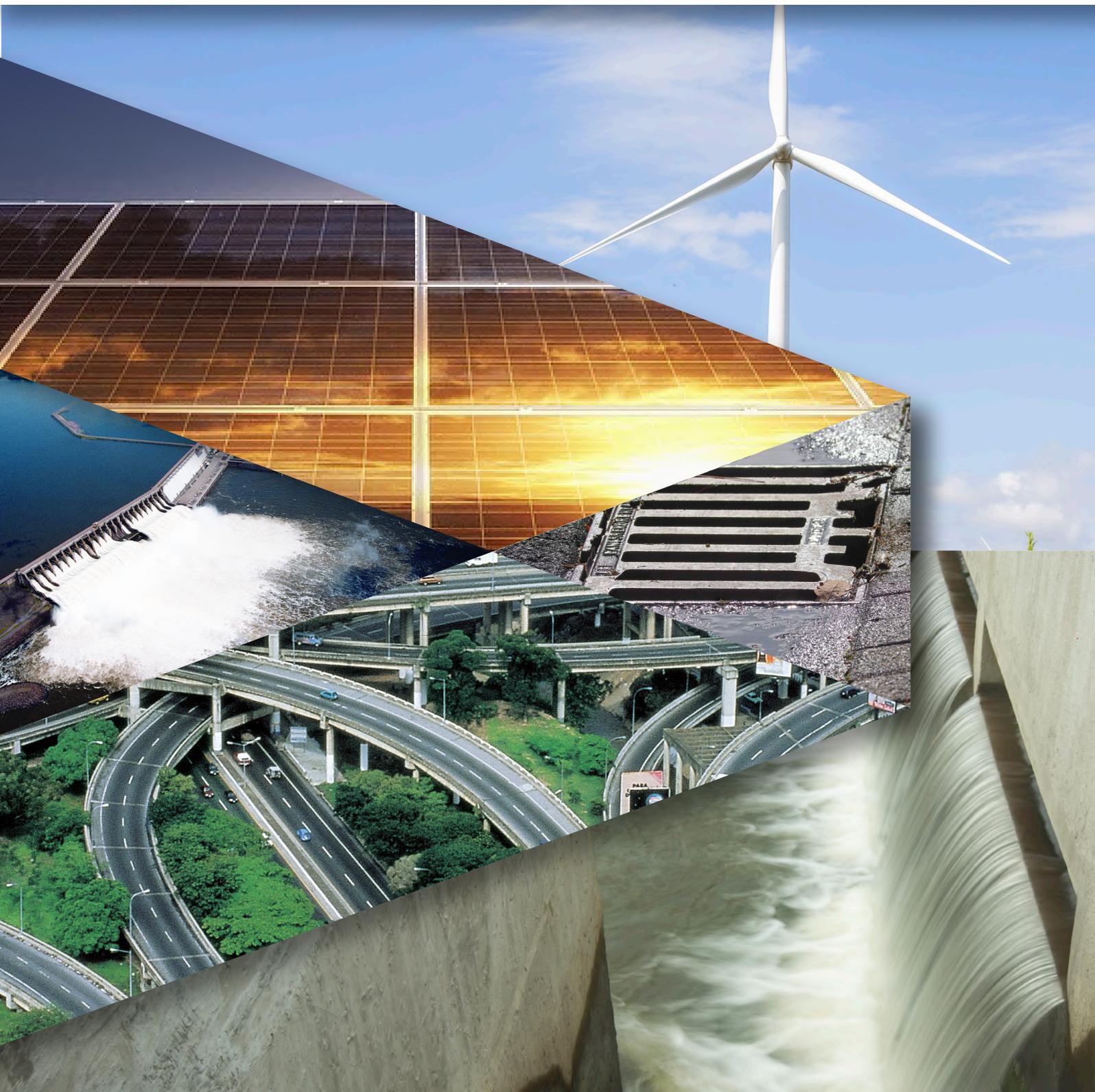


GUÍA PARA EL ANÁLISIS DETALLADO DE RIESGO CLIMÁTICO

Tomo 1



Guía para el Análisis Detallado de Riesgo Climático

Renny Lopez, CAF - Vicepresidente de Riesgos.
José Montoya, CAF - Jefe Unidad de Gestión
de Riesgos Ambientales y Sociales

Editor:
CAF

Equipo de trabajo:

- Edgar Salas, CAF.
- Sandra C. Mendoza, CAF.
- Tatiana Kucharsky, Consultora CAF.

Autores:
Consultora: consorcio Tecnalia - IH Cantabria:

- Jorge Paz
- Manuel del Jesus
- Elena Turienzo
- Salvador Navas
- Lexuri Yurrebaso
- José Antonio Martínez
- Nerea Tarrago
- Javier Díez
- Nieves Peña

Imágenes de las publicaciones:
CAF y Pixabay

Este documento ha sido producido con la ayuda financiera de la Unión Europea y CAF. Las opiniones expresadas en este documento no pueden considerarse de ninguna manera como un reflejo de la opinión oficial de dichas instituciones.
Diciembre, 2019.

Prólogo

CAF tiene como misión institucional promover el desarrollo sostenible y la integración regional de sus países accionistas; no obstante, los riesgos que el cambio climático presenta para la sociedad en su conjunto, especialmente para los países en desarrollo, suponen uno de los principales obstáculos para el desarrollo de infraestructura estratégica perdurable, que contribuya al desarrollo sostenible.

En un escenario en el que las consecuencias del Cambio Climático afectan a todo el planeta, CAF promueve entre sus países miembros el desarrollo sostenible como un mecanismo para desarrollar una mayor resiliencia al clima.

La literatura de hoy es profusa cuando se trata del análisis de riesgo desde el punto de vista territorial, lo cual no ocurre cuando se trata de aquel vinculado al desarrollo de infraestructura. CAF, como uno de los mayores financiadores de infraestructura de América Latina, ha asumido el reto de incluir transversalmente el cambio climático en el análisis y desarrollo de ese tipo de proyectos. Como aporte adicional ha desarrollado la *Guía para el Análisis Detallado de Riesgo Climático (ADRC)*, la cual analiza la incidencia del cambio y la variabilidad climática en el desarrollo de proyectos de infraestructura con el objetivo de plantear las medidas de adaptación necesarias para incrementar su resiliencia.

La guía, que está dirigida a los clientes de CAF, presenta una metodología de análisis detallado de riesgo climático (ADRC) para seis tipos de proyectos: energía solar fotovoltaica, energía eólica, hidroenergía, dotación de agua, infraestructura vial e infraestructura de drenaje urbano. En ella, se orienta al lector en la contextualización de los proyectos respecto al cambio climático, la identificación de las amenazas climáticas específicas para cada tipología de proyecto y la valoración de la exposición, el análisis de la vulnerabilidad y el riesgo y, finalmente, la identificación y selección de las medidas de adaptación más apropiadas en cada caso.

Asimismo, se incluye un apartado para facilitar la comprensión de la información climática, que proporciona herramientas para guiar el tratamiento de la información requerida para el análisis de los proyectos.

La guía ha sido dividida en tres tomos. El primero, titulado *Guía para el análisis detallado del riesgo climático* presenta la metodología a seguir para considerar el cambio climático en el diseño de un proyecto de infraestructura. El segundo tomo *Anexos: Glosario y Estado del Arte* ofrece un glosario de los términos empleados en la guía y una recopilación bibliográfica de las principales metodologías y herramientas usadas para el análisis de riesgo climático que puedan ser aplicables a proyectos de infraestructura. Por último, el tomo *Casos piloto* muestra la aplicación práctica de la metodología en cuatro casos de estudio: el impacto del cambio climático sobre proyectos de generación hidroeléctrica; la mejora y pavimentación de un tramo de carretera considerando las tendencias climáticas; la identificación de los principales peligros naturales que amenazan a un núcleo urbano y el análisis del riesgo de desastre asociado y el estudio del impacto del cambio climático sobre la operación de un parque eólico.

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de la asistencia técnica que otorgó la Unión Europea a través de su programa LAIF (*Latin America Investment Facility*) a KfW (*Kreditanstalt für Wiederaufbau*) y CAF bajo el programa de Cambio Climático, implementados en la región por ambas instituciones. Los recursos de este programa son administrados por KfW y ejecutados por CAF con el propósito de transferir conocimiento y generar capacidades en América Latina para mejorar la estructuración de proyectos de infraestructura. En ese sentido, agradecemos especialmente el apoyo de la Unión Europea, el KfW y de las entidades propietarias de los estudios que han servido como insumo para los ejemplos sectoriales que se brindan, así como a todos aquellos que, de una u otra manera, colaboraron con el desarrollo de la guía.

Renny López
Vicepresidente de Riesgos

Contenido

1. Contexto	11
2. Marco conceptual general de la metodología	15
3. Descripción general de la metodología propuesta	19
3.1 Pasos de la metodología general propuesta	20
3.1.1 Paso 1: Contextualización del proyecto respecto al cambio climático: establecimiento de los límites del sistema en estudio	20
3.1.2 Paso 2: Identificación de amenazas y valoración de la exposición	21
3.1.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad	22
3.1.4 Paso 4: Evaluación del riesgo	25
3.1.5 Paso 5: Identificación y priorización de opciones de adaptación	30
3.2 Planteamientos generales y recomendaciones para el análisis de riesgo y medidas de adaptación	30
4. Análisis de la variabilidad climática y el cambio climático	35
4.1 El clima y su variabilidad a corto y largo plazo	45
4.1.1 El clima	45
4.1.2 Variabilidad climática	47
4.1.3 Cambio climático	49
4.1.3.1 Línea base y periodos horizonte	49
4.1.3.2 Escenarios	50
4.1.3.3 Modelos	51
4.1.3.4 Actualización de series	54
4.1.3.5 Técnicas de corrección del sesgo y reducción de escala	55
4.1.3.6 Combinación de modelos (cadenas y conjuntos)	58
4.1.3.7 Evaluación de impactos	59
4.2 Análisis climático	60
4.2.1 Clima actual	60
4.2.2 Clima futuro	62
5. Evaluación de vulnerabilidad y riesgo por disciplinas transversales	67
5.1 Energía	68
5.1.1 Consideración dinámica del sistema eléctrico	68
5.1.2 Indicador para evaluar el riesgo frente al cambio climático sobre un sistema energético	69
5.2 Hidrología	70
5.3 Inundaciones	71
5.4 Socioeconómico	72
5.5 Ecológico	73
6. Evaluación de vulnerabilidad y riesgo por sectores	75
6.1 Energía solar fotovoltaica	77
6.1.1 Paso 1: Contextualización del proyecto respecto al CC	78
6.1.2 Paso 2: Identificación de amenazas y valoración de la exposición	79
6.1.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad	84
6.1.4 Paso 4: Evaluación del riesgo	86
6.1.5 Resumen de componentes de riesgo	87
6.2 Energía eólica	89
6.2.1 Paso 1: Contextualización del proyecto respecto al CC	89
6.2.2 Paso 2: Identificación de amenazas y valoración de la exposición	90
6.2.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad	99
6.2.4 Paso 4: Evaluación del riesgo	102
6.2.5 Resumen de componentes de riesgo	104
6.3 Hidroenergía	106
6.3.1 Paso 1: Contextualización del proyecto respecto al CC	106
6.3.2 Paso 2: Identificación de amenazas y valoración de la exposición	108
6.3.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad	117
6.3.4 Paso 4: Evaluación del riesgo	121
6.3.5 Resumen de componentes de riesgo	124
6.4 Dotación de agua	127
6.4.1 Paso 1: Contextualización del proyecto respecto al CC	127
6.4.2 Paso 2. Identificación de amenazas y valoración de la exposición	129
6.4.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad	134
6.4.4 Paso 4: Evaluación del riesgo	137
6.4.5 Resumen de componentes de riesgo	140

6.5 Vial	143
6.5.1 Paso 1: Contextualización del proyecto respecto al CC	143
6.5.2 Paso 2: Identificación de amenazas y valoración de la exposición	146
6.5.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad	153
6.5.4 Paso 4: Evaluación del riesgo	156
6.5.5 Resumen de componentes de riesgo	158
6.6 Áreas urbanas	160
6.6.1 Paso 1: Contextualización del proyecto respecto al CC	162
6.6.2 Paso 2: Identificación de amenazas y valoración de la exposición	163
6.6.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad	172
6.6.4 Paso 4: Evaluación del riesgo	175
6.6.5 Resumen de componentes de riesgo	178
7. Identificación y selección de opciones de adaptación	183
7.1 Descripción del planteamiento metodológico de la adaptación al cambio climático de proyectos de infraestructura	184
7.1.1 Tareas previas al análisis de riesgos climáticos y el análisis de opciones de adaptación	185
7.1.2 Desarrollo coordinado del análisis de riesgos climáticos y opciones de adaptación	186
7.1.3 Planificación de la adaptación a largo plazo	187
7.1.4 Tareas de implementación de la adaptación y seguimiento	188
7.2 Técnicas de valoración de las medidas de adaptación	188
7.2.1 Análisis costo-beneficio	191
7.2.2 Análisis costo-efectividad	191
7.2.3 Análisis de opciones reales	191
7.2.4 Toma de decisiones robustas	191
7.2.5 Gestión del riesgo iterativo/Gestión adaptativa	191
7.2.6 Análisis de cartera	191
7.2.7 Análisis multicriterio	191
7.3 Propuesta de medidas tipo	192
7.3.1 Energía solar	192
7.3.2 Energía eólica	192
7.3.3 Hidroenergía	193
7.3.4 Dotación de agua	194
7.3.5 Vial	195
7.3.6 Áreas urbanas	199
8. Referencias	200

Figuras

Figura 1	Sectores para los que se propone una metodología específica	13
Figura 2	Modelo conceptual para la evaluación de los efectos del cambio climático de acuerdo con el Quinto Informe de Evaluación del IPCC	16
Figura 3	Comparación entre los marcos metodológicos y los conceptos empleados para el análisis de la vulnerabilidad en el Cuarto y en el Quinto Informe de Seguimiento del IPCC y el análisis de riesgos tradicional	17
Figura 4	Concepciones de riesgo consideradas en diferentes documentos metodológicos acerca del análisis del riesgo climático y la adaptación	18
Figura 5	Fases o pasos de la metodología genérica en relación con la concepción de riesgo propuesta por IPCC	20
Figura 6	Componentes del riesgo y esquema de una cadena de impacto indicando sus diferentes elementos	21
Figura 7	Ejemplo de análisis cuantitativo de la sensibilidad basado en un modelo físico, en el que se establece una relación directa entre una variable climática y el funcionamiento de un proyecto	23
Figura 8	Ejemplo de análisis cuantitativo de la sensibilidad basado en un modelo estadístico	23
Figura 9	Ejemplo del planteamiento metodológico implementado para analizar cualitativamente el riesgo generado por el cambio climático en un conjunto de ciudades	26
Figura 10	Ejemplo del planteamiento metodológico implementado para analizar cualitativamente el riesgo de inundación	28
Figura 11	Ejemplo del planteamiento metodológico implementado para analizar cuantitativamente el riesgo de inundación	29
Figura 12	Representación gráfica de la evolución de la relación entre una variable climática y la operación de un proyecto, el rango de operación, la superación de umbrales críticos y la implementación de medidas de adaptación que los incrementan	31
Figura 13	Representación gráfica de la cascada de incertidumbres asociada a la evaluación de riesgos climáticos y medidas de adaptación	32

Figura 14	Caracterización de la precipitación media mensual para cuatro países andinos	45
Figura 15	Patrones sinópticos representativos de la anomalía de temperaturas superficiales del mar para la caracterización del fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur	47
Figura 16	Persistencias (como fracción del año) de patrones de El Niño (en rojo), La Niña (en azul) y el Niño Modoki (en verde)	48
Figura 17	Posible distribución de precipitación media mensual en función de la situación macroclimática	48
Figura 18	Series temporales de emisiones de gases de efectos invernadero (panel izquierdo) y concentraciones de CO ₂ atmosférico (panel derecho) en función de los escenarios RCP	50
Figura 19	Evolución histórica de la temperatura media global y posibles evoluciones de los diferentes escenarios, con sus valores medios sobre el periodo 2081-2100	51
Figura 20	Ejemplo de resolución espacial y dominio de un GCM (izquierda) y de un RCM (derecha)	52
Figura 21	Genealogía de modelos de circulación general	53
Figura 22	Mapa de precipitación media histórica, precipitación a medio plazo y cambios esperables derivados de un modelo climático	54
Figura 23	Representación gráfica de la aplicación del método de las deltas a la corrección de sesgo de una serie climática	56
Figura 24	Representación gráfica de la aplicación del método directo a la corrección de sesgo de una serie climática	57
Figura 25	Aplicación del método del mapeo de cuantiles	58
Figura 26	Reconstrucción espacial mediante técnicas de Kriging de la precipitación mensual en una cuenca andina	61
Figura 27	Relación teórica entre consumo de electricidad y temperatura	69
Figura 28	Resumen de las Rutas Socioeconómicas Compartidas o Shared Socioeconomic Pathways (SSP) y el reto que suponen desde la perspectiva de la mitigación y la adaptación	72
Figura 29	Flujo de diseño general de un proyecto e incorporación de consideraciones de cambio y variabilidad climática	76
Figura 30	Metodología general para la evaluación de vulnerabilidad y riesgo	77
Figura 31	Contexto de evaluación de un proyecto solar fotovoltaico: propuesta de límites del sistema objeto de estudio	78
Figura 32	Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos de energía fotovoltaica	79
Figura 33	Secuencia metodológica de diseño de un proyecto de infraestructura solar fotovoltaica con consideraciones de clima futuro	85
Figura 34	Contexto de evaluación de un proyecto eólico: propuesta de límites del sistema objeto de estudio	89
Figura 35	Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos eólicos	90
Figura 36	Secuencia metodológica de diseño de un proyecto de infraestructura eólica con consideraciones de clima futuro	101
Figura 37	Ejemplo de metodología de cálculo de la producción eólica en un único escenario climático	102
Figura 38	Contexto de evaluación de un proyecto hidroeléctrico: propuesta de límites del sistema objeto de estudio	107
Figura 39	Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos hidroeléctricos	109
Figura 40	Ejemplo para el cálculo de probabilidades de cambio de los usos del suelo	116
Figura 41	Pérdida de vida útil de la turbina como función del tiempo y de la pérdida de eficiencia (izquierda). Influencia en la planificación de su frecuencia de rehabilitación (derecha)	118
Figura 42	Componentes de riesgo para los proyectos hidroeléctricos	124
Figura 43	Contexto de evaluación de un proyecto de dotación de agua: propuesta de límites del sistema objeto de estudio	128
Figura 44	Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos de dotación de agua	129
Figura 45	Jerarquía en el uso del agua en función de su disponibilidad, expresada en litros/día	138
Figura 46	Componentes de riesgo para los proyectos de dotación de agua	140
Figura 47	Aspectos a considerar a la hora de evaluar los impactos del cambio climático en el transporte	143
Figura 48	Interdependencias en el sector del transporte	144
Figura 49	Contexto de evaluación: propuesta de límites del sistema objeto de estudio	145
Figura 50	Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos de infraestructura vial	150
Figura 51	Infraestructuras relacionadas con ámbitos de la protección de las áreas urbanas	161
Figura 52	Componentes típicos del sistema de drenaje urbano	162
Figura 53	Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos de drenaje urbano	164
Figura 54	Propuesta de niveles a ser estudiados en el análisis de la exposición	169
Figura 55	Ejemplo de valoración cualitativa	176
Figura 56	Planteamiento para el control del riesgo climático de la infraestructura a través de la implementación de medidas de adaptación	184
Figura 57	Marco general para el análisis económico de la adaptación climática	185
Figura 58	Representación gráfica del concepto de rutas de adaptación	187
Figura 59	Herramientas económicas y posibles usos	188
Figura 60	Comparativa de fortalezas y debilidades de diferentes métodos de valoración de medidas	189

Tablas

Tabla 1	Ejemplo de un tratamiento cualitativo de la sensibilidad para diferentes tipologías de infraestructura del sector energético	24
Tabla 2	Ejemplo de variables empleadas para generar un índice de amenaza para diferentes cadenas de impacto	27
Tabla 3	Principales drivers climáticos que inciden en las metodologías sectoriales	36
Tabla 4	Ejemplos de proyecciones climáticas desarrolladas por diferentes países	63
Tabla 5	Variables que inciden en los proyectos de infraestructura solar fotovoltaica y tipo de impacto	82
Tabla 6	Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura solar fotovoltaica y tipo de impacto	82
Tabla 7	Fases para la evaluación de las amenazas climáticas sobre el diseño de un proyecto fotovoltaico	83
Tabla 8	Fases para la evaluación de la sensibilidad de un proyecto fotovoltaico	84
Tabla 9	Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto fotovoltaico	86
Tabla 10	Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo en un proyecto de infraestructura solar fotovoltaica	88
Tabla 11	Variables que inciden en los proyectos de infraestructura eólica y tipo de impacto	93
Tabla 12	Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura eólica y tipo de impacto	94
Tabla 13	Fases para la evaluación de las amenazas climáticas sobre el diseño de un proyecto eólico	95
Tabla 14	Valores aproximados de pérdida anual de energía causada por heladas	98
Tabla 15	Fases para la evaluación de la sensibilidad de un proyecto eólico	99
Tabla 16	Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto eólico	103
Tabla 17	Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo climático en un proyecto de infraestructura eólica	105
Tabla 18	Variables que inciden en los proyectos de infraestructura hidroeléctrica y tipo de impacto	111
Tabla 19	Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura hidráulica y tipo de impacto	112
Tabla 20	Fases para la evaluación de las amenazas climáticas sobre el diseño de un proyecto hidroeléctrico	113
Tabla 21	Fases para la evaluación de la sensibilidad ante el cambio climático de un proyecto hidroeléctrico	117
Tabla 22	Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto hidroeléctrico	121
Tabla 23	Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo climático de un proyecto hidroeléctrico	125
Tabla 24	Variables que inciden en los proyectos de dotación de agua y tipo de impacto	132
Tabla 25	Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura hidráulica y tipo de impacto	133
Tabla 26	Fases para la evaluación de las amenazas climáticas sobre el diseño de un proyecto de dotación de agua	134
Tabla 27	Fases para la evaluación de la sensibilidad de un proyecto de dotación de agua	135
Tabla 28	Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto de dotación de agua	137
Tabla 29	Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo climático de un proyecto de dotación de agua	141
Tabla 30	Variables que inciden en los proyectos de infraestructura vial y tipo de impacto	147
Tabla 31	Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura vial y tipo de impacto	148
Tabla 32	Fases para la evaluación de las amenazas climáticas sobre el diseño de un proyecto de infraestructura vial	151
Tabla 33	Fases para la evaluación de la sensibilidad de un proyecto de infraestructura vial	154
Tabla 34	Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto de infraestructura vial	157
Tabla 35	Ejemplo de estimación cualitativa del riesgo de cada uno de los escenarios considerados en el análisis	158
Tabla 36	Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo en un proyecto de infraestructura vial	158
Tabla 37	Variables que inciden en los proyectos de drenaje urbano y tipo de impacto	166
Tabla 38	Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de drenaje urbano y tipo de impacto	167
Tabla 39	Métodos/herramientas para el análisis de las amenazas climáticas en el área urbana	168
Tabla 40	Posibles indicadores de exposición sobre un sistema de drenaje urbano	170
Tabla 41	Cambios directos y posibles respuestas de estabilidad de taludes al cambio climático	171
Tabla 42	Análisis de vulnerabilidad sobre el medio construido (sensibilidad)	173
Tabla 43	Análisis de vulnerabilidad sobre el medio construido (capacidad adaptativa)	174
Tabla 44	Análisis de vulnerabilidad sobre el medio natural (sensibilidad)	175
Tabla 45	Análisis de vulnerabilidad sobre el medio natural (capacidad adaptativa)	175
Tabla 46	Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto de drenaje urbano	177
Tabla 47	Ejemplo de estimación cualitativa del riesgo de cada uno de los escenarios considerados en el análisis	178
Tabla 48	Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo climático de un proyecto vinculado a sistema de drenaje urbano	179
Tabla 49	Métodos de toma de decisiones de adaptación	190
Tabla 50	Medidas de adaptación al cambio climático en infraestructura vial	196





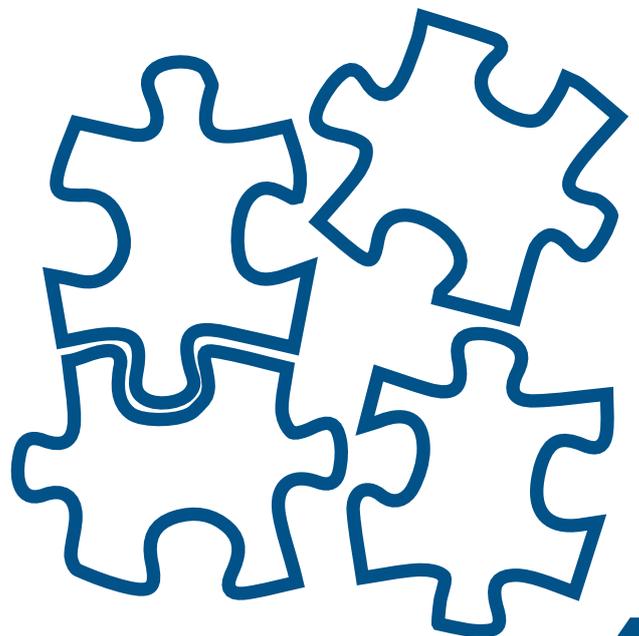
TOMO 1: GUÍA PARA EL ANÁLISIS DETALLADO DEL RIESGO CLIMÁTICO

1. Contexto	11
2. Marco conceptual general de la metodología	15
3. Descripción general de la metodología propuesta	19
4. Análisis de la variabilidad climática y el cambio climático	35
5. Evaluación de vulnerabilidad y riesgo por disciplinas transversales	67
6. Evaluación de vulnerabilidad y riesgo por sectores	75
7. Identificación y selección de opciones de adaptación	183
8. Referencias	200

Listado de Acrónimos

BBDD	Base de datos, es decir, conjunto de datos almacenados sistemáticamente.
CAPEX	Acrónimo de los términos ingleses “Capital expenditure”, hace referencia a las inversiones en bienes de capital y el valor de las mismas (p. ej. el valor de los equipos que forman parte de un proyecto de infraestructura).
CBA	Cost-Benefit Analysis o análisis coste-beneficio o costo -beneficio. También se emplean las siglas ACB.
CC	Cambio climático.
CEA	Coste-Effectiveness Analysis o Análisis de coste-efectividad o costo-efectividad. También se emplean las siglas ACE.
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, o Fase 5 del Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados, el principal marco internacional para el desarrollo de modelos de circulación general (GCMs) acoplados océano-atmósfera.
CMIP6	Fase 6 del proyecto CMIP.
DRR	Disaster risk reduction o Reducción del riesgo de desastres.
PTAR	Planta de Tratamientos de Aguas Residuales.
GCM	General Circulation Model o Modelo de circulación general.
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales (entidad del Gobierno de Colombia dependiente del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático.
MCA	Multi-criteria analysis o análisis multicriterio.
OPEX	Acrónimo inglés de “Operational expenditures” que hace referencia a un costo permanente para el funcionamiento de un producto, negocio o sistema. Ha de entenderse como gasto de funcionamiento, gastos operativos, o gastos operacionales.
RCM	Modelo Climático Regional, que se diferencia de los GCM en que analiza una región concreta del planeta.
RCP	Representative Concentration Pathway o Ruta de concentración representativa.
GIS	Sistema de información geográfica. También se emplean las siglas SIG.
SNI	Sistema Nacional de Información de Ecuador.
SUIA	Sistema Único de Información Ambiental de Ecuador.
SSP	Shared Socioeconomic Pathway o Ruta compartida socioeconómica.
TCN	Tercera Comunicación Nacional.
UE	Unión Europea.

1 > Contexto



Tal y como se recoge en el glosario (ver Tomo 2), el cambio climático se define como una variación estadística en el estado medio del clima, que persiste durante un período prolongado. Los efectos del cambio climático (véase definición de impacto) se están observando ya hoy en medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructura.

Los **IMPACTOS** son entendidos como las consecuencias de ese cambio climático tanto en sistemas naturales (impactos físicos) como en sistemas humanos, (impactos agregados), es decir, los impactos totales acumulados en sectores y/o regiones. Según la implementación o no de medidas de adaptación, se pueden distinguir impactos potenciales e impactos residuales.

- Impactos potenciales: Todos los impactos que podrían suceder dado un cambio proyectado en el clima, sin tener en cuenta las medidas de adaptación.
- Impactos residuales: Los impactos del cambio climático que pueden ocurrir después de la implementación de medidas de adaptación.

Por otro lado, los impactos del cambio climático en los sistemas geofísicos, incluidas las inundaciones, las sequías y el aumento del nivel del mar pueden causar:

- Impactos agregados: Los impactos totales acumulados en sectores y/o regiones. La suma de los impactos precisa un conocimiento (o hipótesis) sobre la importancia relativa de los impactos en diferentes sectores y regiones.

Para frenar estos efectos/impactos del cambio climático, la comunidad internacional, en el acuerdo de Paris (COP21 2015), ha establecido una medida sin precedentes para la estabilización mundial: limitar el aumento de la temperatura entre 1,5 °C y 2°C a 2100. Para ello, se ha comprometido a movilizar recursos con el fin de implementar **MEDIDAS PARA ADAPTAR** la infraestructura y la sociedad en general a los efectos del cambio climático.

Por lo tanto, esta guía responde a la necesidad de orientar y definir una metodología de **ANÁLISIS DETALLADO DE RIESGO CLIMÁTICO** de proyectos de infraestructura, y cuyo objetivo principal es el de aumentar la **RESILIENCIA CLIMÁTICA** de los proyectos financiados por CAF.

Tal y como se ha definido en el glosario, resiliencia es la capacidad de un sistema socio-ecológico para hacer frente a un evento o perturbación peligrosa. Por tanto, la resiliencia climática de un proyecto de infraestructura es la capacidad de dicho proyecto o infraestructura para absorber las tensiones impuestas por el cambio climático. Por ello, los proyectos diseñados conforme a esta guía considerarán el rango de posibles cambios en el clima y los potenciales desastres naturales inducidos, así como las posibilidades de adaptación hacia un estado futuro menos vulnerable.

La metodología recoge una serie de aspectos generales, de aplicación a cualquier proyecto de infraestructura, como son el **ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO**, donde se analizarán las tendencias históricas, así como las proyecciones climáticas en la zona geográfica donde se ubique el proyecto. Pero incluye además una segunda parte con componentes específicos para cada uno de los sectores contemplados que se resumen en la Figura 1.



> **Figura 1:** Sectores para los que se propone una metodología específica



> **Fuente:** Elaboración propia.

Como norma general, los grandes proyectos de infraestructura se diseñan y planifican considerando una visión estacionaria del clima (considerando que los valores históricos representan el clima futuro). Sin embargo, la vida útil de estos proyectos (varias décadas) incrementa su susceptibilidad a los impactos del cambio climático, lo que hace que sea indispensable una mirada al clima futuro tanto en el diseño, operación y mantenimiento, como en la rehabilitación de los mismos.

Por ello, esta guía realiza una identificación de los *drivers* o amenazas climáticas más importantes y sus impactos asociados para cada uno de los sectores implicados y describe los métodos y herramientas más adecuados para llegar a determinar el riesgo originado. Con ello se pretende hacer explícito este conocimiento climático inoculándolo directamente en los parámetros de diseño, operación y mantenimiento que gestionan y emplean los expertos de cada sector, con el objetivo principal de hacer más resiliente al clima sus proyectos de infraestructura.

El foco de esta guía son los riesgos asociados a los *drivers* climáticos, pero teniendo también presente los impactos agregados de otros *drivers* no climáticos, entendidos estos como aquellas amenazas no climáticas que también podrían afectar al proyecto de infraestructura (incremento de consumo de agua, incremento de la demanda energética, cambios en los usos del suelo, incremento de la población, etc.).

Por último, esta guía contempla asimismo la metodología de identificación y selección de las posibles opciones de adaptación sobre los parámetros de diseño de la infraestructura o sobre el entorno de la misma, tomando como base los resultados que se han obtenido en los pasos anteriores de evaluación del riesgo.



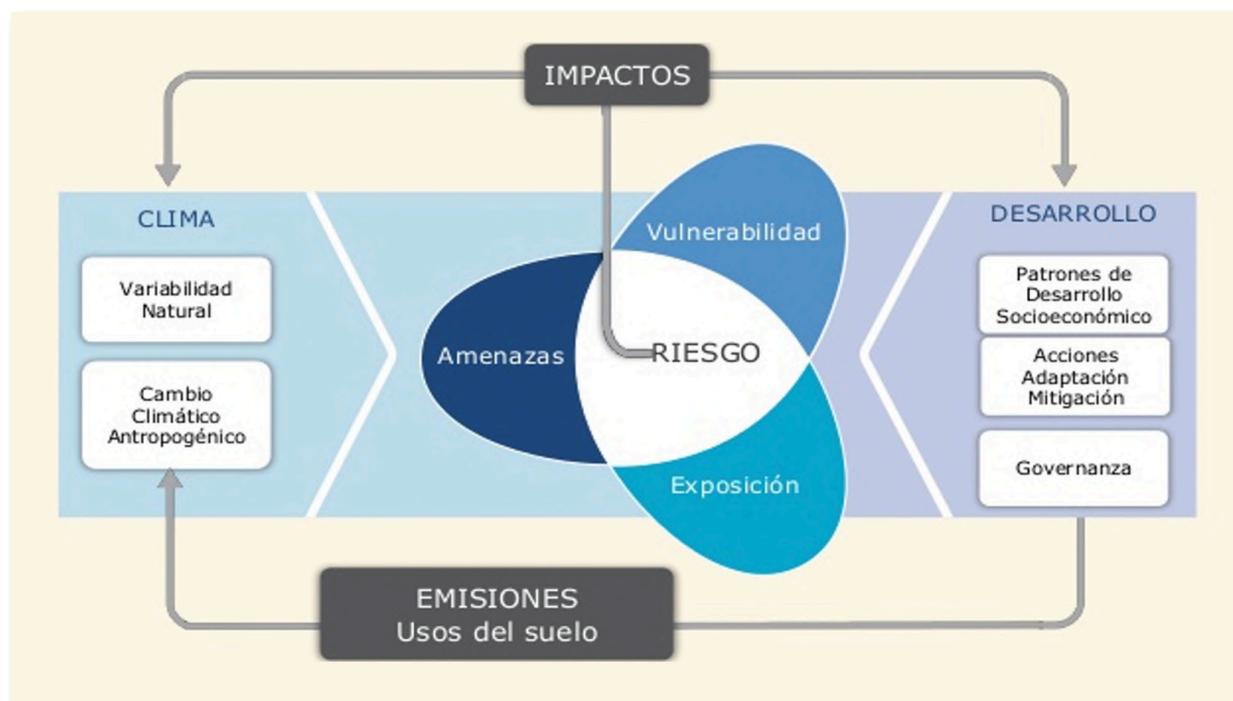


2 > Marco conceptual general de la metodología



En este apartado se realiza una introducción conceptual de la metodología planteada para analizar el riesgo climático evaluando todos los aspectos que integran este término. Es en el quinto Informe de evaluación del IPCC (AR5) donde este concepto de “riesgo” adquiere un papel protagonista a la hora de evaluar los retos asociados al cambio climático y definir una respuesta para prepararnos frente a los mismos. En la metodología de análisis propuesta en esta guía, el concepto de “riesgo”, integra las componentes de la vulnerabilidad, la exposición y la amenaza de la forma que se ilustra en el gráfico siguiente (Figura 2).

➤ **Figura 2:** Modelo conceptual para la evaluación de los efectos del cambio climático de acuerdo con el quinto Informe de evaluación del IPCC



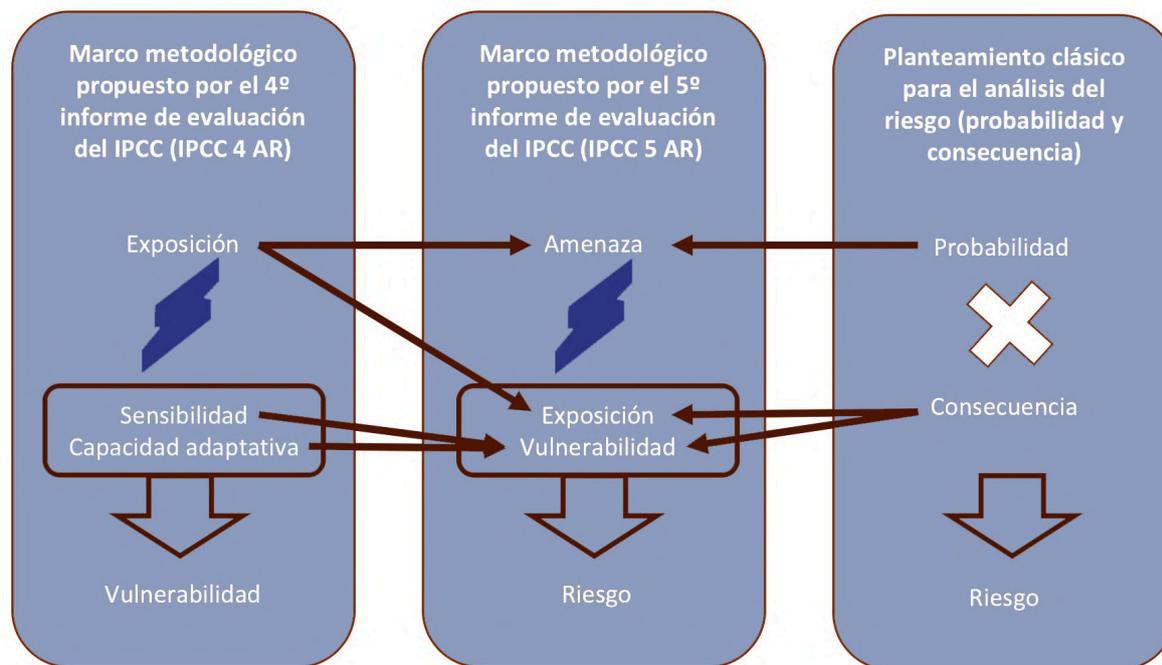
➤ **Fuente:** IPCC

En el mismo informe, el IPCC destaca también que el concepto de vulnerabilidad está caracterizado por las componentes de sensibilidad y capacidad adaptativa.

Cabe destacar que el planteamiento del quinto Informe de evaluación del IPCC presenta claras diferencias con el considerado en su anterior informe de evaluación (Ver Figura 3), y se aproxima a la concepción tradicional del riesgo (por ejemplo, a la recogida en la Guía 73:2009 de ISO (2)), que entiende que dicho término valora tanto la probabilidad de un suceso (concepto que es análogo al periodo de retorno de la amenaza) como la intensidad del suceso, que establece la magnitud de las consecuencias de dicho suceso (concepto que viene determinado, fundamentalmente, por la combinación de las componentes de exposición y vulnerabilidad, aunque depende también de la amenaza).

Este nuevo marco metodológico propuesto por IPCC ha sido revisado en diferentes documentos (3)(4). En ellos, las relaciones entre los diferentes componentes que integran el concepto de riesgo son matizadas, aunque en todos se coincide en asignar a este concepto un papel central y una visión probabilística. Es decir, en todos ellos se afronta el cálculo del riesgo considerando no solo la magnitud de los posibles impactos y efectos del cambio climático sobre los sistemas, también se considera que el clima se está viendo alterado y, por tanto, la frecuencia de los eventos climáticos, valores medios, etc. se están viendo alteradas, siendo necesario considerar su previsible evolución en los próximos años para poder evaluar el riesgo real al que harán frente los proyectos. Igualmente, en todos los marcos metodológicos planteados se considera el potencial efecto de la adaptación (Figura 4), y como la implementación de medidas adaptativas puede contribuir a controlar y reducir los riesgos asociados al clima.

Figura 3: Comparación entre los marcos metodológicos y los conceptos empleados para el análisis de la vulnerabilidad en el cuarto y en el quinto Informe de seguimiento del IPCC del IPCC y el análisis de riesgos tradicional

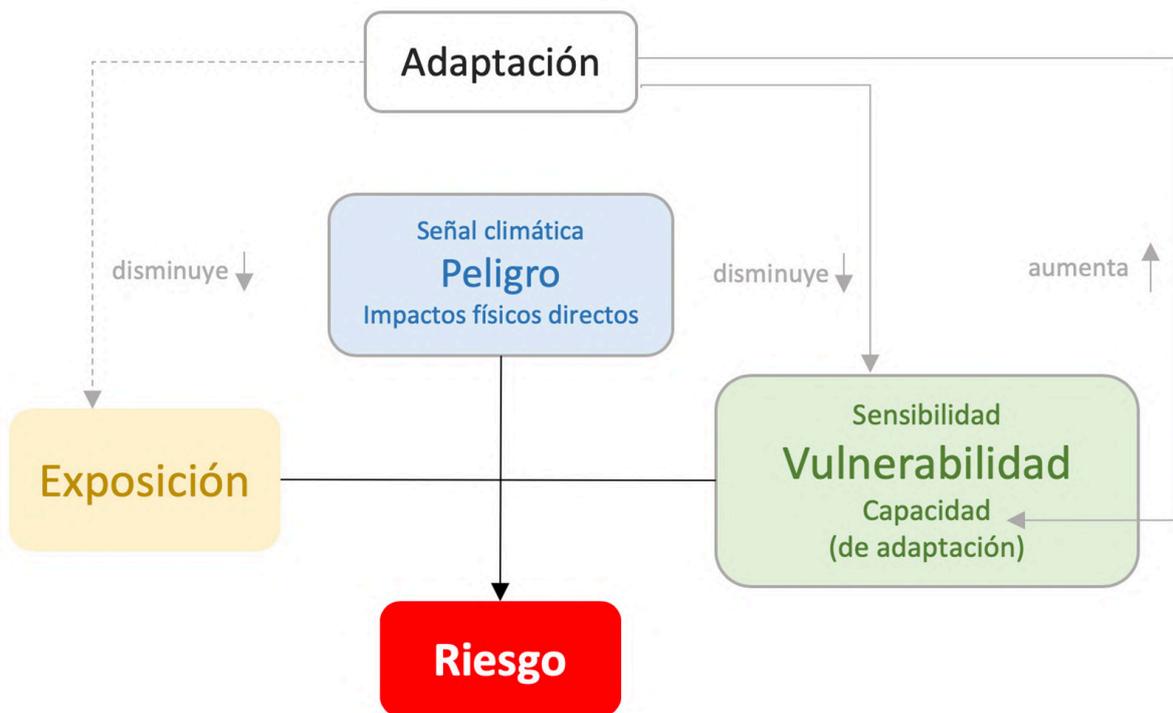
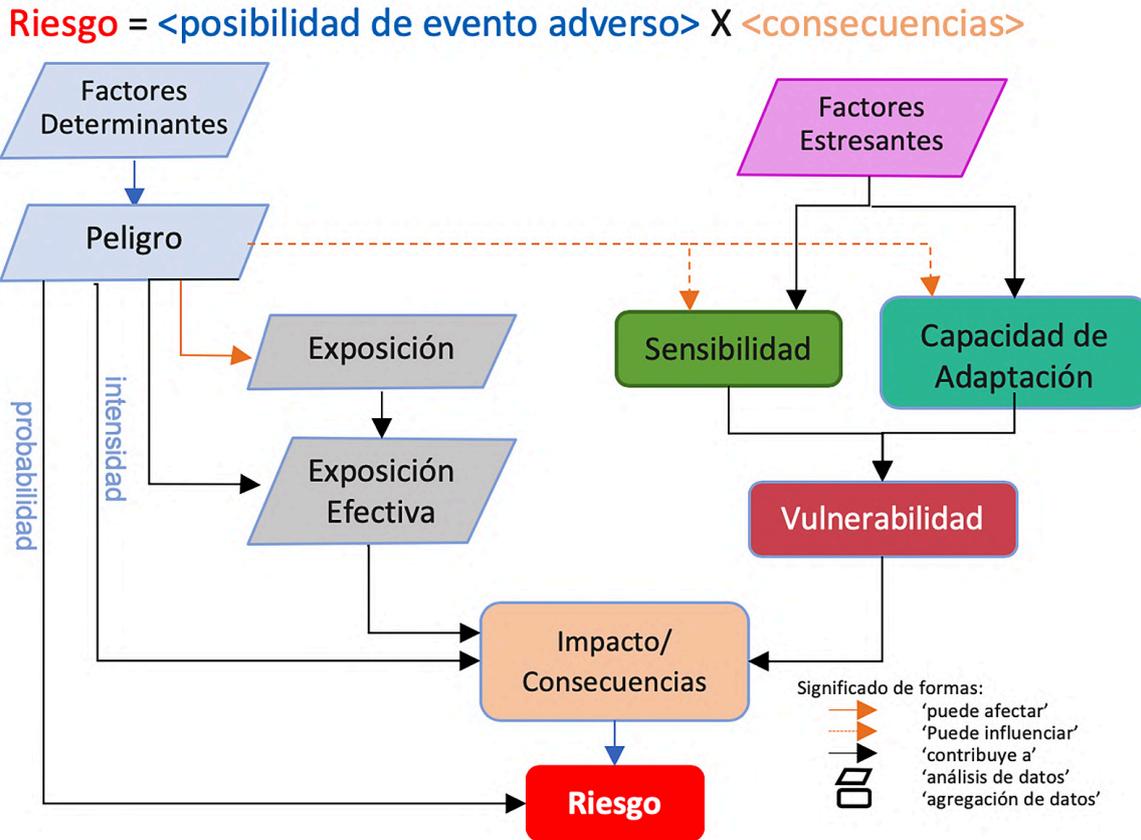


Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo las pautas del AR5, la Figura 4 muestra la caracterización de las componentes del riesgo bajo dos metodologías recientemente desarrolladas. IVAVIA (figura superior) describe con más detalle las interrelaciones entre las componentes del riesgo e integra claramente en la metodología los términos clásicos del análisis del riesgo, mientras que el documento *“The Vulnerability Sourcebook. Risk Supplement”* (figura inferior) resalta la importancia de la adaptación para minimizar el riesgo e incluye la influencia de la misma para modificar las componentes de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa. En todo caso ambas aproximaciones son complementarias y pertinentes.



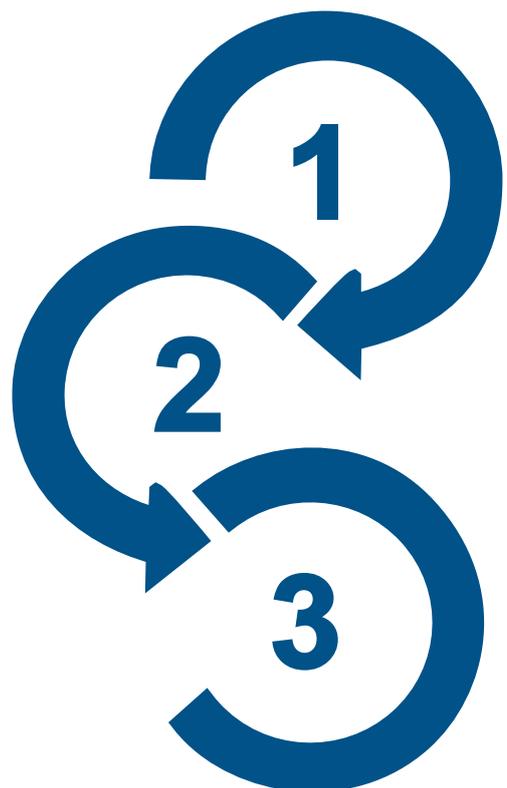
➤ **Figura 4:** Concepciones de riesgo consideradas en diferentes documentos metodológicos acerca del análisis del riesgo climático y la adaptación



➤ **Elaboración propia basada en:** "IVAVIA. Guideline Impact and Vulnerability Analysis of Vital Infrastructures and built-up Areas" ((4)) y "The Vulnerability Sourcebook. Risk Supplement" ((3))

3 > Descripción general de la metodología propuesta

3.1 Pasos de la metodología general propuesta	20
3.1.1 Paso 1: Contextualización del proyecto respecto al cambio climático: establecimiento de los límites del sistema en estudio	20
3.1.2 Paso 2: Identificación de amenazas y valoración de la exposición	21
3.1.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad	22
3.1.4 Paso 4: Evaluación del riesgo	25
3.1.5 Paso 5: Identificación y priorización de opciones de adaptación	30
3.2 Planteamientos generales y recomendaciones para el análisis de riesgo y medidas de adaptación	30

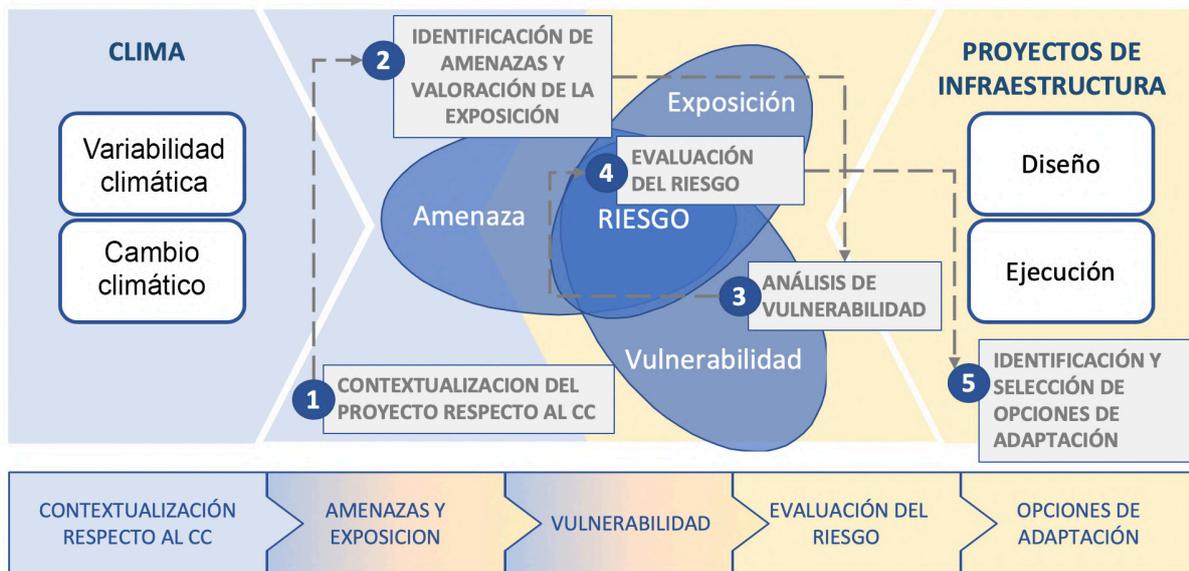


En los siguientes apartados se exponen los pasos propuestos para desarrollar la metodología, así como una serie de planteamientos y recomendaciones aplicables al conjunto del proceso.

3.1 Pasos de la metodología general propuesta

A continuación, y tomando como base la bibliografía comentada en el Estado del Arte del Tomo 2 y los apartados anteriores, se describe brevemente la perspectiva general de la metodología para el análisis detallado del riesgo climático. Esta metodología es aplicable a todos los sectores considerados en esta Guía y es desarrollada con mayor grado de detalle y concreción para cada uno de los sectores, en el apartado 6 (Evaluación de vulnerabilidad y riesgo por sectores). La metodología planteada se estructura en una serie de etapas o fases que quedan recogidas de forma visual en la Figura 5 y se describen a continuación.

Figura 5: Fases o pasos de la metodología genérica en relación con la concepción de riesgo propuesta por IPCC



Fuente: Elaboración propia.

3.1.1 Paso 1: Contextualización del proyecto respecto al cambio climático: establecimiento de los límites del sistema en estudio

En el primer paso del análisis, se identifica el sistema en estudio, delimitando claramente el ámbito que se podrá abarcar, incluyendo no solo el proyecto de infraestructura concreto que se está analizando/evaluando, sino también aquellos elementos que tengan relación con dicho proyecto.

En estas tareas se propone aplicar el concepto conocido como “pensamiento sistémico” (o “*Systems Thinking*”), que es la aproximación que se plantea en algunos estándares como los borradores de la futura ISO/DIS 14090:2018. Según Peter Senge (5), el pensamiento sistémico a nivel empresarial nos ayuda a comprender la complejidad de los procesos y descubrir la forma para mejorarlos, por tanto se trata de considerar el conjunto completo de interacciones e interdependencias que afectan al sistema, incluyendo influencias internas y externas al contexto en el que opera.

Este planteamiento permite considerar, para cada proyecto concreto, aquellos elementos que determinan su riesgo climático, independientemente de que algunos de ellos formen parte de las actuaciones contempladas en el proyecto estudiado. Esto es así, porque muchos de los impactos del cambio climático pueden tener un efecto indirecto. Un ejemplo de un proyecto que sufrirá efectos indirectos del cambio climático son aquellas centrales hidroeléctricas que aprovechan cauces provenientes de glaciares. Los proyectos de construcción y renovación de este tipo de centrales generalmente no incluirán ninguna intervención en el glaciar pero, si se quieren valorar los riesgos climáticos de manera adecuada, se debe incluir el mismo dentro del sistema de estudio ya que los glaciares se están viendo afectados de manera dramática por el cambio climático. En otros casos, los límites del sistema estudiado y los límites del proyecto pueden coincidir. Por ejemplo, en el caso de analizar un proyecto fotovoltaico aislado de la red de transporte y distribución de energía eléctrica, puede ser suficiente evaluar la incidencia del cambio climático en la ubicación concreta del mismo. El efecto del cambio y variabilidad climática sobre elementos externos al proyecto tendría un reducido o nulo impacto en la operativa del mismo, por lo que, en principio, no parece de interés considerar otros elementos y ubicaciones.

Al margen de contribuir a un análisis acertado del riesgo climático, esta aproximación sistémica también permitirá establecer “límites” en torno a la actividad de adaptación, filtrando y priorizando los elementos más relevantes para el proyecto en todo su ámbito de influencia e identificando aquellos que podrían realmente controlarse mediante diferentes intervenciones. De nuevo, estas intervenciones pueden superar los límites físicos del proyecto objeto de estudio.

3.1.2 Paso 2: Identificación de amenazas y valoración de la exposición

En este segundo paso, se identifican y seleccionan las amenazas potenciales a las que está expuesto el sistema y se recoge toda la información disponible (históricos y proyecciones).

En este paso deberán tenerse en cuenta en la valoración todas las etapas de los proyectos de infraestructura, considerando desde su planificación y construcción hasta su desmantelamiento y/o eliminación o reemplazo, pasando por la financiación y ciclos de vida operacional y de diseño.

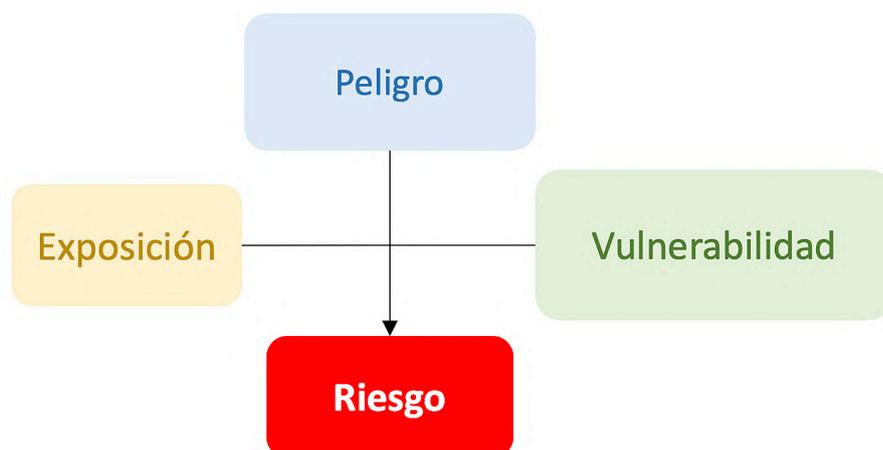
Con base en el nivel de información disponible y su calidad, se definirá el alcance de la evaluación de las amenazas climáticas, definiendo aspectos como los escenarios y horizontes temporales considerados en el análisis (también condicionados por la vida útil prevista de los activos o sistemas que se financian), resolución y marco metodológico a aplicar (cualitativo, cuantitativo o mezcla de ambos, análisis de sensibilidad a determinadas variables, etc.).

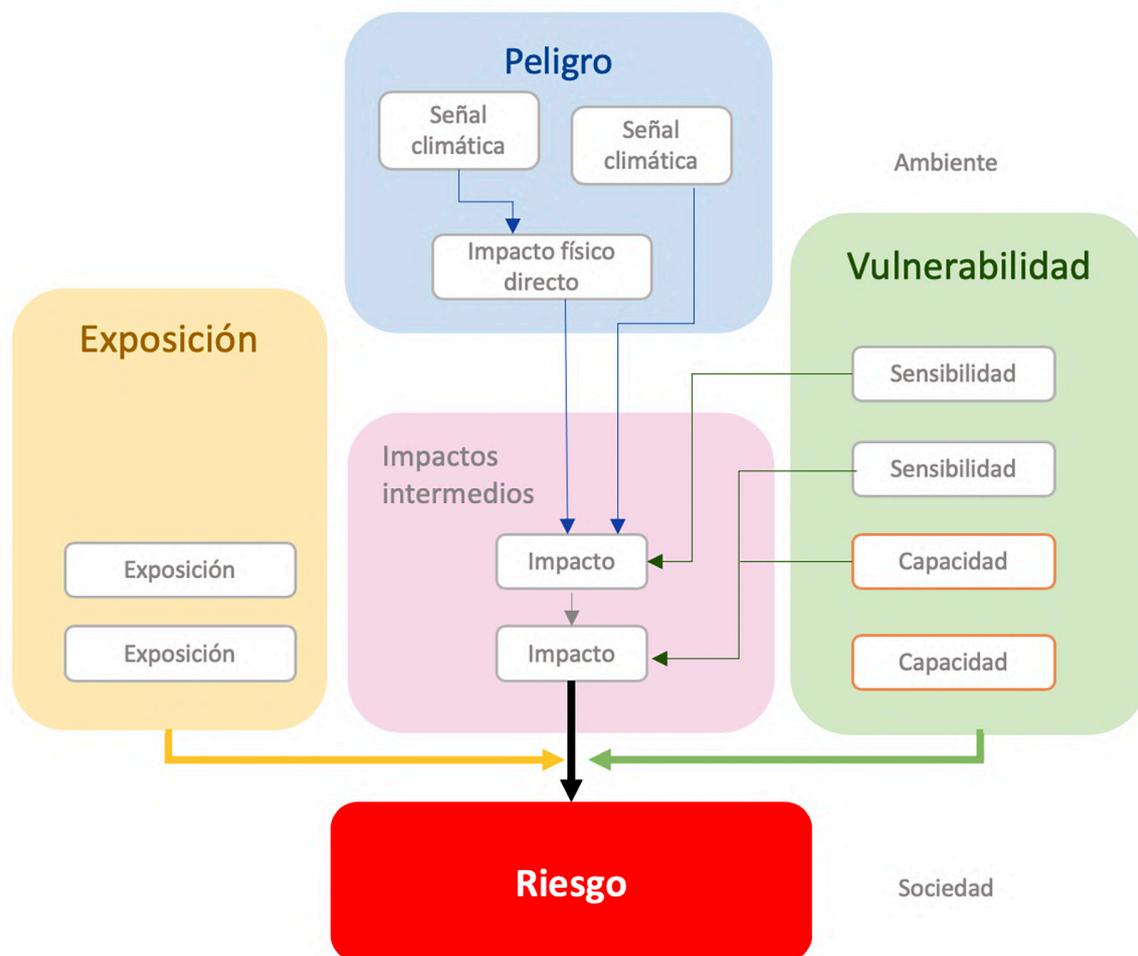
Para caracterizar el clima, tanto en su situación actual como considerando escenarios futuros, se deben evaluar períodos de tiempo suficientemente amplios para capturar la variabilidad inter e intraanual. Generalmente se considera que estos periodos han de ser de, al menos, 20 o 30 años. De cara a contemplar las implicaciones de varios periodos, puede ser apropiado considerar, por ejemplo, un futuro cercano (2021-2050) y un futuro lejano (2070-2099). Hay que destacar que a la hora de describir el clima cuanto más lejano sea el periodo con respecto al presente mayor será la incertidumbre asociada. En general, como criterio de selección, cuanto más larga es la vida útil del proyecto, más amplio será el rango de escenarios que se deben usar. Asimismo, con el fin de poder realizar comparaciones del sistema se debe utilizar un escenario de referencia (histórico).

Una vez identificadas las amenazas, se identificarán las cadenas de impacto relevantes. La generación y caracterización de cadenas de impacto para analizar cada uno de los riesgos climáticos es otro planteamiento clave de la metodología propuesta. Esta herramienta analítica está destinada a entender, sistematizar y priorizar los factores que determinan el riesgo climático del sistema estudiado (6). En la misma se identifican todos los elementos que integran el concepto de riesgo incluyendo relaciones causa-efecto. Una señal climática puede generar un impacto físico directo (p.ej. una lluvia torrencial puede incrementar la escorrentía en un área), así como una secuencia de impactos intermedios que finalmente conducen a que se materialice un riesgo. Continuando con el ejemplo anterior, el incremento de la escorrentía causado por la lluvia torrencial incrementaría el nivel de un río que, a su vez, a varios kilómetros de distancia, podría causar una inundación que dañe un elemento de la infraestructura sensible al agua (p.ej. un equipo eléctrico). De este modo, este elemento, por su ubicación y características, se encuentra expuesto a las lluvias torrenciales que puedan caer aguas arriba de su localización.

A continuación, se muestra un ejemplo de los elementos de caracterización de una cadena de impacto de este tipo (Figura 6). Junto con las cadenas de impacto, se determinarán qué elementos del sistema están expuestos para cada cadena de impacto, y se evaluará el grado de impacto sobre ellos (considerando impactos directos e indirectos sobre el proyecto).

➤ **Figura 6:** Componentes del riesgo y esquema de una cadena de impacto indicando sus diferentes elementos





➤ **Fuente:** Elaboración propia basada en la fuente: *Suplemento de riesgo el libro de la vulnerabilidad. Guía sobre cómo aplicar el enfoque del libro de la vulnerabilidad con el nuevo concepto de riesgo climático del IE5 del IPCC.*(6)

Para la caracterización de las cadenas de impacto, junto con la información climática, puede requerirse información sobre otros factores no climáticos, como p.ej. la evolución de los usos del suelo, demografía, factores socioeconómicos, etc., que incidan sobre la intensidad de los impactos asociados a las amenazas climáticas estudiadas. Esta información permitirá realizar una identificación/priorización de los impactos más relevantes para posteriores fases. Esta evaluación de impactos puede requerir la definición de indicadores que permiten trabajar con información cualitativa y/o semi-cuantitativa, observando la manera en que éstos se ven modificados con respecto a unas determinadas escalas y umbrales críticos definidos en base a información histórica y estimaciones. El volumen de datos para la valoración de las cadenas de impacto puede ser importante por lo que es conveniente gestionar adecuadamente toda esta información mediante su almacenamiento en bases de datos estructuradas, la definición de metadatos, etc.

3.1.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad

Para comprender este paso, en primer lugar, es importante aclarar uno de los conceptos clave en la adaptación al cambio climático: el concepto de **vulnerabilidad**. Tal y como se refleja en el Glosario del Tomo 2 de esta guía, se refiere a la propensión o predisposición de un sistema dado a verse afectado por una amenaza y depende de la sensibilidad o susceptibilidad al daño y de la capacidad para hacerle frente y adaptarse. Es decir:

$$\text{Vulnerabilidad} = f(\text{sensibilidad, capacidad adaptativa})$$

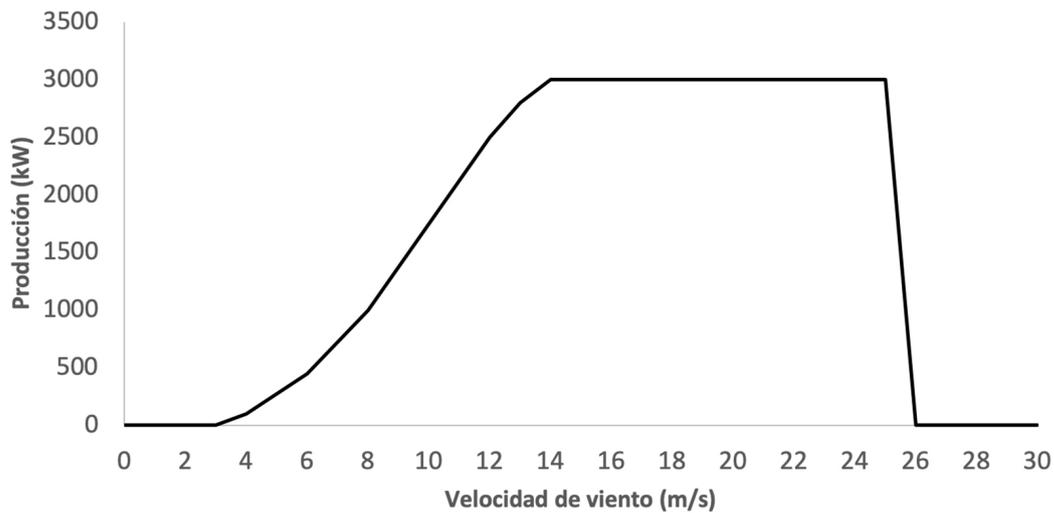
Recordemos que la sensibilidad es el grado en que el sistema de estudio se ve afectado de forma positiva o negativa por la variabilidad de las variables climáticas. La capacidad de adaptación, por su parte, hace referencia a la capacidad de los sistemas para adaptarse a los daños potenciales del cambio climático, aprovechar oportunidades o responder a sus consecuencias.

En este marco, el análisis de vulnerabilidad comprende el proceso por el cual se determina el grado de predisposición del sistema definido en la cadena de impacto a verse afectado por la amenaza y es sumamente específico de la actividad o proyecto estudiado, ya que se ve influenciado por sus características concretas, ubicación, posibilidades de intervención y modificación del mismo, etc.

De los dos conceptos que contempla, la sensibilidad puede en muchas ocasiones tratarse de manera cuantitativa, ya que, para muchas actividades, es posible establecer una relación directa entre las variables climáticas (y su cambio)

y el comportamiento de una instalación o proyecto. Esta relación se puede analizar empleando modelos físicos (Figura 7) o modelos generados con técnicas estadísticas (Figura 8).

Figura 7: Ejemplo de análisis cuantitativo de la sensibilidad basado en un modelo físico, en el que se establece una relación directa entre una variable climática y el funcionamiento de un proyecto

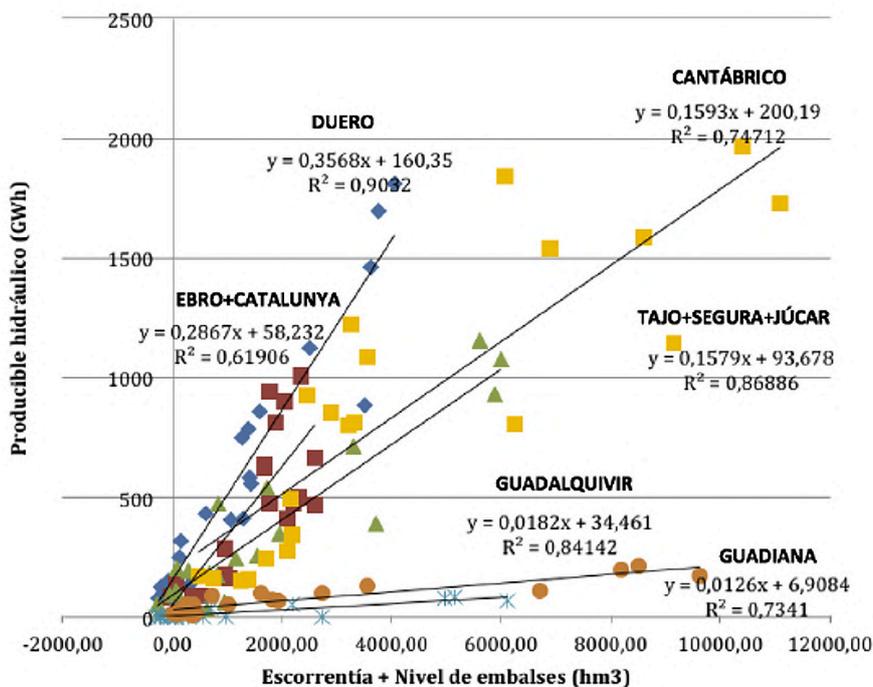


Nota: La imagen muestra una relación directa entre una variable climática (velocidad del viento) y el funcionamiento de un proyecto (generación eólica) en función de las características del aerogenerador estudiado.

Fuente: "Preliminary Assessment of Climate Change Impacts on the UK Onshore Wind Energy Resource" ((7))

En este tipo de planteamientos cuantitativos, la capacidad adaptativa se consideraría a través del efecto que tiene en esta relación diferentes medidas (por ejemplo, en caso de poder optar por otro modelo de aerogenerador, se podría considerar una relación diferente entre producción y velocidad del viento).

Figura 8: Ejemplo de análisis cuantitativo de la sensibilidad basado en un modelo estadístico



Nota: La imagen sintetiza las relaciones calculadas estadísticamente entre variables climáticas y físicas (escorrentía y nivel de embalses) y la producción hidroeléctrica de un conjunto de aprovechamientos situados en diferentes cuencas hidrográficas españolas.

Fuente: "Agua, energía y cambio climático. Tecnologías de generación eléctrica a partir de la disponibilidad de recursos hídricos en escenarios de cambio climático" ((8)).

En cambio, en otras ocasiones, por la complejidad o heterogeneidad del sistema que estamos analizando, la falta de datos detallados, etc. no es posible realizar una vinculación tan directa entre las amenazas climáticas (o cambios de las mismas) y la afección al proyecto o infraestructura analizada. En estos casos se pueden adoptar enfoques consistentes en la definición de una clasificación cualitativa de la sensibilidad y la capacidad adaptativa, integrando ambos conceptos. Un ejemplo de este tipo se observa a continuación, donde se muestra un ejemplo de herramienta cualitativa tipo matriz en la que se determina la sensibilidad para diferentes tipologías de infraestructura energética. En este caso se ha establecido que la sensibilidad varía en una escala que va desde el valor nulo (no significativa) hasta el 3 (crítica). Las técnicas para establecer este tipo de clasificaciones incluyen juicio experto, revisión bibliográfica, etc.

Tabla 1: Ejemplo de un tratamiento cualitativo de la sensibilidad para diferentes tipologías de infraestructura del sector energético

Tecnología	Δ temp. Aire	Δ temp. Agua	Δ precip.	Δ vel. Viento	Δ nivel mar	Inundación	Ola de calor	Tormentas
Nuclear	1	2		-	-	3	1	-
Hidro	-	-	2	-		3	-	1
Eólica terrestre	-	-	-	1	-	-	-	1
Eólica marina	-	-	-	1	3	-	-	1
Biomasa	1	2	-	-	-	3	1	-
Solar fotovoltaica	-	-	-	-	-		1	1
Solar térmica	-	-	-	-	-	1	-	1
Geotermal	-	-	-	-	-	1	-	-
Gas natural	1	2	-	-	-	3	1	-
Carbón	1	2	-	-	-	3	1	-
aceite	1	2	-	-	-	3	1	-
Red eléctrica	3	-	-	-		1	1	3

Nota: En la tabla superior se valora la sensibilidad de diferentes tipologías de instalaciones energéticas (filas) ante diferentes amenazas asociadas al cambio climático (columnas). Los valores incluidos han sido elaborados por juicio experto y permiten una cuantificación cualitativa de los impactos. El valor “3” corresponde a un impacto severo, el “2” a un impacto medio, el “1” a impacto pequeño y el “-” a un impacto no significativo.

Fuente: Elaboración propia basada en *“Investment needs for future adaptation measures in EU nuclear power plants and other electricity generation technologies due to effects of climate change”* ((9)).

Ante estas situaciones, para caracterizar la vulnerabilidad, se suele seguir el siguiente procedimiento:

- Definición del modelo de datos e indicadores de selección para la evaluación de sensibilidad y la capacidad de adaptación.
- Agregación de indicadores y resultados de la evaluación de vulnerabilidad por cada amenaza (opcional).
- Formulación de vulnerabilidad ante cada una de las amenazas estudiadas.

1.3.4 Paso 4: Evaluación del riesgo

La evaluación del riesgo es a menudo representada como la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos o tendencias climáticas (vinculadas a las amenazas), multiplicada por la consecuencia de los mismos en caso de producirse (derivadas de la exposición que puede depender de la intensidad de la amenaza y vulnerabilidad). Es decir:

$$\text{Riesgo} = \text{probabilidad (amenaza)} \times \text{consecuencia (amenaza/impacto, exposición, vulnerabilidad)}$$

Donde, la probabilidad de ocurrencia de una amenaza se deriva del análisis de escenarios climáticos y la modelización de la consecuencia se deriva del análisis de la intensidad del evento (que puede determinar el grado de exposición) y la vulnerabilidad.

Por lo tanto, de acuerdo con la definición más reciente del IPCC 2014, el riesgo se podría expresar como una función de amenaza, exposición y vulnerabilidad.

$$\text{Riesgo} = f(\text{amenaza, exposición, vulnerabilidad})$$

Tradicionalmente, en la evaluación de riesgos, las consecuencias se han valorado de acuerdo con estimaciones económicas de daños y pérdidas por un evento extremo/variabilidad climática. Sin embargo, la evaluación no monetaria de las consecuencias debe considerarse de acuerdo con el informe más reciente del IPCC dedicado a la adaptación. Esta evaluación cualitativa del riesgo puede ser muy útil, especialmente cuando la información resultante de los pasos anteriores puede no estar completa o no ser suficiente.

Por tanto, en esta evaluación del riesgo, serán necesarias las siguientes actividades:

- Descripción de los componentes de riesgo y generación de información. La primera tarea en la evaluación de riesgos es la generación de información sobre las **componentes de los riesgos potenciales y su descripción**. Ello implica identificar amenazas, áreas potencialmente impactadas y sus posibles causas y consecuencias. Toda esta información se obtiene de las fases descritas anteriormente.
- **Construcción del modelo y análisis de riesgo**. Existen diferentes enfoques o metodologías (cuantitativa y / o cualitativa) para el análisis de riesgos, que incluso se pueden combinar. Independientemente de cuál se adopte, es importante considerar la incertidumbre asociada con la calidad de los datos utilizados e inherente a los métodos en sí. Tener en cuenta el nivel de confianza en nuestro análisis de riesgos, e incorporarlo como atributo adicional de nuestro análisis, podría ser una forma de hacer explícito el manejo de la incertidumbre.

Análisis de riesgos con un planteamiento cualitativo. Con el fin de proporcionar una forma sistemática de resumir, comparar y priorizar los riesgos, los resultados de un análisis de riesgos a menudo se clasifican de acuerdo con una escala (por ejemplo, un valor numérico de 1 a 5 o bajo, medio, alto). Después de analizar los riesgos y estimar su importancia, el siguiente paso es evaluar la necesidad de acción, dónde y con qué urgencia. Es probable que esta evaluación no se tome únicamente sobre la base de la evaluación de riesgos, sino que dependa de cómo los riesgos se relacionan con otras prioridades dentro de una organización, sus requisitos legales y reglamentarios, y los recursos disponibles para la acción.

EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA VALORACIÓN CUALITATIVA DEL RIESGO CLIMÁTICO

El análisis de riesgo que se expone a continuación es un ejemplo de análisis cualitativo basado en el marco conceptual propuesto por el IPCC en el WGII AR5 (IPCC, 2014). Como se ha indicado anteriormente, en función de la información disponible, será posible abordar un análisis de tipo cuantitativo o cualitativo. El análisis cuantitativo aporta generalmente información más útil para la toma de decisiones vinculadas al diseño y gestión de infraestructura, pero cuando no es posible, no deja de ser interesante realizar análisis de tipo cualitativo que permitan priorizar riesgos, acciones, etc. De hecho, en muchos sectores de actividad como la definición de estrategias de lucha contra el cambio climático nacionales, regionales, locales, etc. es generalmente una de las primeras etapas.

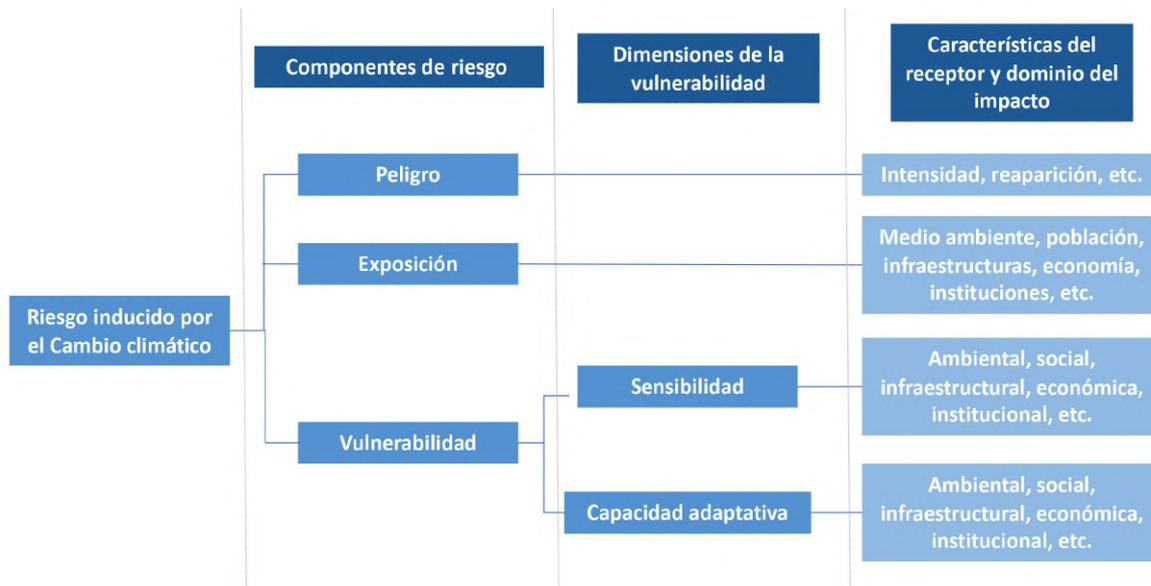
A continuación, se expone un análisis cualitativo basado en la generación y agregación de indicadores realizado en el marco del proyecto RAMSES, recogido en el informe “*High level quantified assessment of key vulnerabilities and priority risks for urban areas in the EU*” (10). Su objetivo es desarrollar una metodología de evaluación de riesgos climáticos aplicable a todas las ciudades de la Unión Europea para identificar prioridades para las inversiones de adaptación. Estamos por tanto ante un estudio de alto nivel y muy condicionado por la existencia de información homogénea para todas las ciudades estudiadas. El análisis realizado debe ser coherente, flexible, estable, escalable, transparente e integrado.

En este estudio, se definen diferentes indicadores de riesgo, exposición y vulnerabilidad, que se combinan para informar sobre el **nivel relativo de riesgo que enfrenta una determinada ciudad en cada cadena de impacto** (Figura 9). La puntuación de riesgo, R_{ct} , para cada ciudad, c , y la amenaza del cambio climático, t , se calcula como:

$$R_{ct} = \sqrt[3]{H'_{ct} \times V'_{ct} \times E'_{ct}}$$

donde el puntaje de amenaza estandarizado H'_{ct} , el puntaje de exposición estandarizado, E'_{ct} , y el puntaje de vulnerabilidad estandarizado V'_{ct} , son agregados como un puntaje de riesgo R_{ct} . R_{ct} está estandarizado y se vuelve a escalar para su visualización como R'_{ct} . Por lo tanto, los índices de riesgo se han generado como la intersección de las puntuaciones de peligro, exposición y vulnerabilidad.

➤ **Figura 9:** Ejemplo del planteamiento metodológico implementado para analizar cualitativamente el riesgo generado por el cambio climático en un conjunto de ciudades



➤ **Fuente:** Elaboración propia basada en “*High level quantified assessment of key vulnerabilities and priority risks for urban areas in the EU*” (10).

A continuación, se muestran, a modo de ejemplo, las variables consideradas para generar los índices de amenaza (H'_{ct}). Esta tabla también muestra el método de transformación empleado y el peso relativo que se ha dado a cada variable dentro de la cadena de impacto. Por ejemplo, para la cadena de impacto HW (olas de calor), se consideran tres indicadores. Cada uno tiene un peso del 33% en la generación del índice global.

➤ **Tabla 2:** Ejemplo de variables empleadas para generar un índice de amenaza para diferentes cadenas de impacto

Código	Descripción	Número de ciudades	Pesos dentro de cada cadena de impacto					Método de transformación
			HW (Olas de calor)	DR (sequías)	FLP (Inundaciones pluviales)	FLF (inundaciones fluviales)	FLC (Inundaciones costeras)	
HWDAYSUNEWI	Cambio relativo del porcentaje de días clasificados como "ola de calor" entre 195-2000 y 2051-2100 para escenarios climáticos bajo, medio y alto	571	0.33					No transformado
HWMAXUNEWI	Cambio en la temperatura máxima diaria máxima entre 1951-2000 y 2051-2100 (unidades: °C) para escenarios de impacto bajo, medio y alto	571	0.33					No transformado
UHIPIKI	La intensidad del efecto "isla de calor" se basa en datos de la temperatura media diaria de la superficie terrestre durante los meses de verano (junio-agosto) de 2006-2013. Datos de conjuntos de datos MODIS (MOD11A2, MYD11A2)	571	0.33					Método de cuadrados
...

➤ **Fuente:** "High level quantified assessment of key vulnerabilities and priority risks for urban areas in the EU" (10).

Los indicadores han sido preparados siguiendo una secuencia que incluye las siguientes etapas:

- Control de calidad de los datos brutos en búsqueda de valores atípicos.
- Transformación de las variables originales (temperaturas, % de días, etc.): para normalizar las variables asociadas a cada indicador se aplican diferentes métodos de transformación (método logarítmico, método de raíces cuadradas, etc.), seleccionando aquel que reduce en mayor medida la oblicuidad de la variable.
- Estandarización de las variables: para hacer estadísticamente consistente la integración de diferentes variables, expresadas en diferentes unidades y escalas, todas ellas son estandarizadas como "Z-scores" o "puntuaciones Z": Puntuación Z = (valor original – media de la población) /desviación estándar de la población).
- Reescalado de las variables: todas ellas fueron reescaladas a una nueva escala entre 1 y 2.
- Imputación de los valores faltantes: para tener en todas las variables que se van a combinar el mismo número de valores, los valores faltantes fueron imputados por imputación simple.

Este documento es un ejemplo de cómo a partir de diferentes datos y aplicando una combinación de técnicas es posible generar indicadores agregados que nos permitan comparar el riesgo de diferentes ciudades. El mismo planteamiento podría ser aplicado a diferentes barrios de una ciudad, elementos de un sistema, etc.

Es preciso tener presente que, aunque algunos de los componentes que determinan el riesgo hayan sido valorados de manera cuantitativa, en esta etapa final de valoración del riesgo es posible combinar todos ellos con planteamientos cualitativos, como podría ser la generación de índices. Estos índices pueden desarrollarse para cada componente del proyecto, cada cuadrícula del ámbito territorial estudiado, etc. A continuación (Figura 10), se muestra un ejemplo en el que se aplica sobre la extensión total de una red de transporte público, aplicando para ello un sistema de información geográfica.

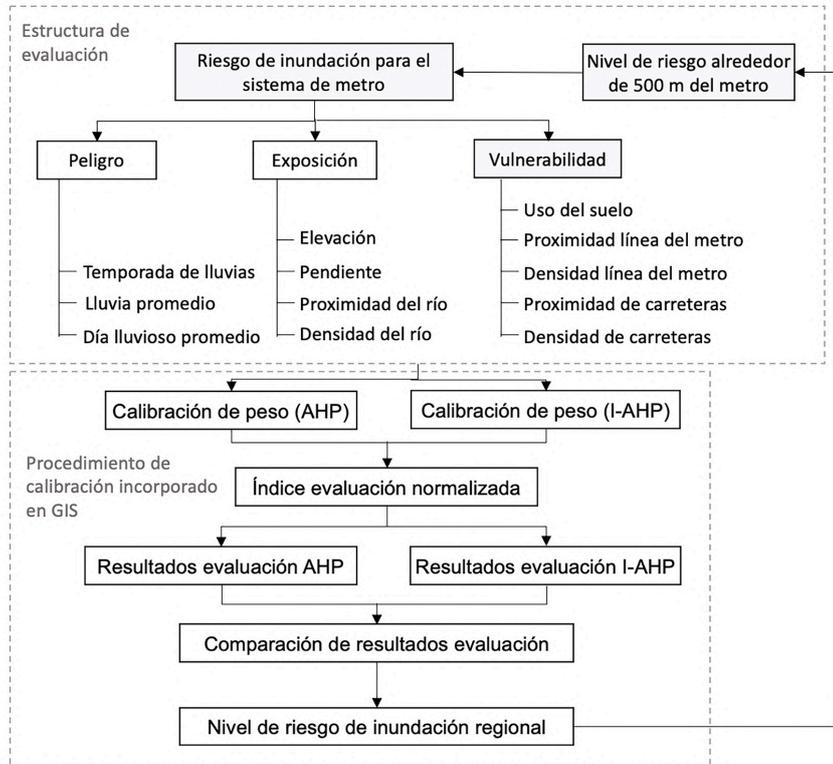
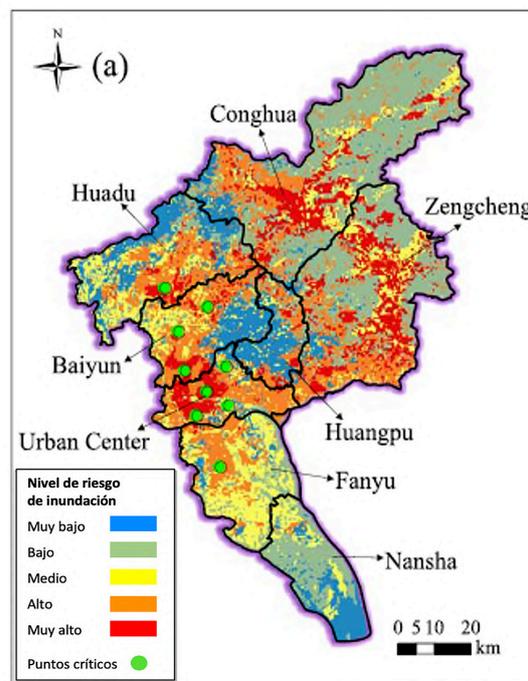


Figura 10: Ejemplo del planteamiento metodológico implementado para analizar cualitativamente el riesgo de inundación

Nota: La imagen izquierda sintetiza el planteamiento metodológico implementado para analizar cualitativamente el riesgo de inundación. Aplicando esta metodología se obtienen los resultados mostrados a la derecha, en la que se aprecia que el riesgo de inundación está expresado como un índice comparativo con valores entre "muy bajo" y "muy alto".

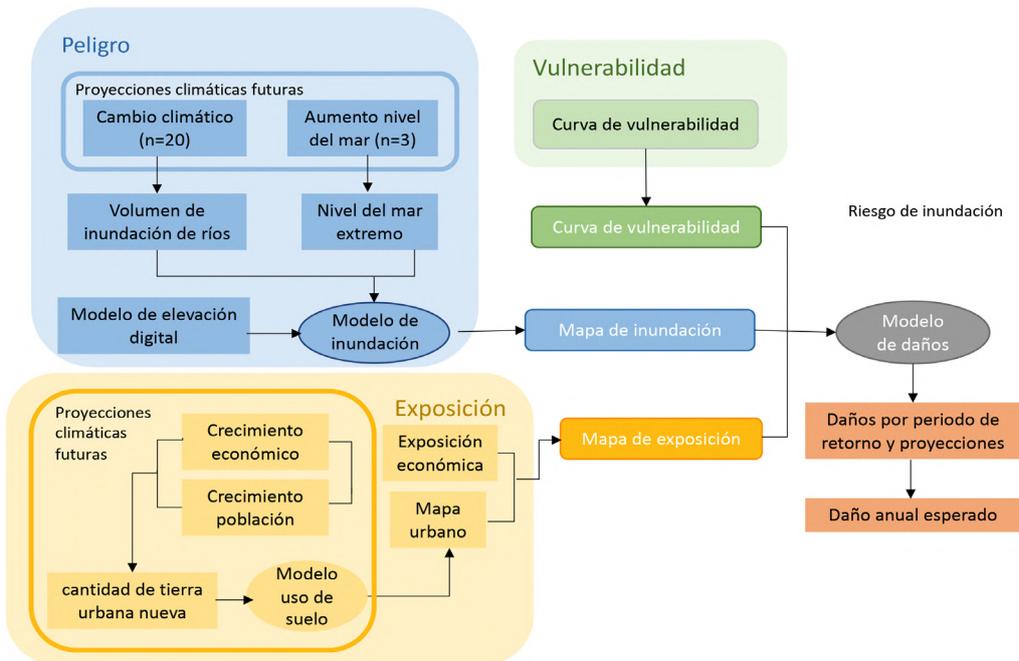
Fuente: Elaboración propia basada en "Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach" ((11)).



Análisis de riesgo con un planteamiento cuantitativo: La valoración del riesgo climático puede abordarse con planteamientos cuantitativos cuando se dispone de los datos y recursos necesarios para ello. Este planteamiento supone el acoplamiento de uno o varios modelos que son ejecutados bajo diferentes escenarios climáticos. En su conjunto, estos modelos permiten considerar todos los aspectos que determinan los componentes del riesgo climático del sistema estudiado. La diferencia entre los resultados obtenidos empleando cada uno de los escenarios nos da una valoración cualitativa del cambio en el riesgo climático.

EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA VALORACIÓN CUANTITATIVA DEL RIESGO CLIMÁTICO

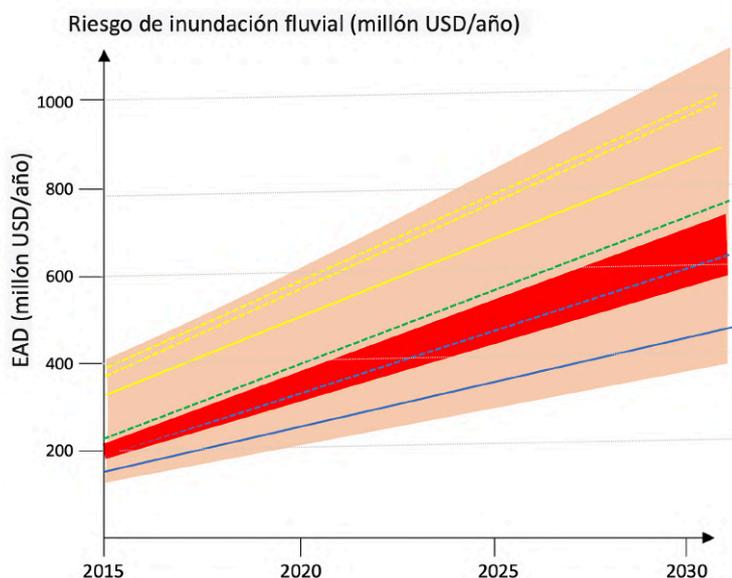
Para valorar el riesgo de inundaciones de manera cuantitativa es posible analizar las inundaciones que cabe esperar ante diferentes niveles de precipitación (ver Figura 11) Analizando el daño que causarían dichas inundaciones en la zona estudiada tendríamos una valoración en términos económicos. Si consideramos diferentes escenarios climáticos en los que estos eventos tengan diferente frecuencia, intensidad o periodo de retorno podríamos valorar el riesgo en cada uno de ellos.(12)



➤ **Figura 11:** Ejemplo del planteamiento metodológico implementado para analizar cuantitativamente el riesgo de inundación

Nota: En la parte izquierda se sintetiza el proceso seguido para combinar el análisis de la exposición, riesgo y vulnerabilidad, mientras que en la derecha los resultados obtenidos en términos de Daño Anual Esperado o EAD (expresado en USD 106/año).

Fuente: Elaboración propia basada en "Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban areas: A probabilistic analysis using global data" (12).



A la hora de realizar estas simulaciones, es interesante no solo considerar diferentes escenarios climáticos, sino también escenarios de otro tipo como pueden ser sociales o económicos. Por ejemplo, en el estudio anterior, los escenarios futuros deberían tener presente que el clima evoluciona, pero, al mismo tiempo, las ciudades se expanden y el valor económico de los daños que las inundaciones causen en las mismas se incrementará por el creciente valor de la infraestructura urbana expuesta.

El análisis cualitativo del riesgo, por ejemplo, generando una valoración en términos económicos, supone unos elevados requerimientos de datos y recursos. Por ello, parece recomendable no aplicar este planteamiento a todos los riesgos climáticos a los que se ha de enfrentar un proyecto, y aplicarlo exclusivamente a aquellos riesgos que, por las características y ubicación del proyecto, sean considerados más significativos.

3.1.5 Paso 5: Identificación y priorización de opciones de adaptación

Una vez identificados los riesgos de un sistema, el objetivo es tratar de identificar y priorizar qué acciones son más necesarias/urgentes y su factibilidad mediante el análisis de una gama de posibles medidas (tanto estructurales como no estructurales) para abordar los riesgos climáticos identificados. Dichas medidas serán lo más específicas posible (componentes, equipos o atributos específicos que sean críticos para la resiliencia climática) y, siempre que sea posible, se definirán parámetros de referencia cuantificables (estándares, umbrales de eficiencia) que permitan su monitorización y supervisión en el tiempo.

Generalmente, el primer paso para abordar el análisis de selección de medidas es su identificación y recopilación para posteriormente caracterizarlas y así seleccionar e implementar las más adecuadas de forma efectiva evitando la “mala-adaptación”. En este sentido cabe destacar algunos aspectos que no siempre son evidentes:

- Muchas de las medidas de adaptación pueden estar previstas desde un primer momento en el proyecto y no haber sido identificadas como tales. Este puede ser el caso de acciones, inversiones o procedimientos destinados a garantizar la operación del proyecto ante situaciones imprevistas, fallos de algunos equipos, etc.
- No necesariamente todas las medidas se identifican en esta etapa final. En el análisis de vulnerabilidad, que como se ha indicado anteriormente considera la capacidad adaptativa, es posible que se identifiquen algunas medidas ya previstas, potenciales, etc.
- Se recomienda, asimismo, evidenciar en el análisis aquellos casos en que la acción más razonable sea no adoptar medidas de adaptación específicas sino, simplemente, aceptar algunos daños o pérdidas, o alternativamente, asegurar contra tales daños o pérdidas. Este puede ser el caso de ciertos activos con una vida útil corta.

Todas las medidas propuestas tendrán que ser dimensionadas (preliminarmente) y se acompañarán de su costo y beneficio esperado (criterio de caracterización de medidas ampliamente utilizado para la selección de la infraestructura más adecuada), incluyendo cuando corresponda, los costos sociales o institucionales asociados (cambios de comportamiento, impacto en grupos particulares de personas, impacto ambiental (13), etc.). Se presentarán, siempre que sea posible y apropiado, en términos monetarios y, en la medida de lo posible, los resultados deben mostrarse de modo que los riesgos no mitigados (antes de cualquier adaptación adicional) se puedan comparar con los riesgos mitigados (después de las acciones de adaptación). Para ello, se emplearán plazos razonables e indicadores financieros adecuados a las características del proyecto (como podría ser el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) o la relación costo-beneficio (RBC)) siempre que sea posible. En apartados posteriores de la guía se indican las metodologías más recomendables para realizar la valoración de las medidas.

3.2 Planteamientos generales y recomendaciones para el análisis de riesgo y medidas de adaptación

Una vez que se ha expuesto cada uno de los pasos de la metodología, es conveniente destacar algunos planteamientos generales interesantes para optimizar la coherencia y eficiencia de la aplicación de la metodología propuesta.

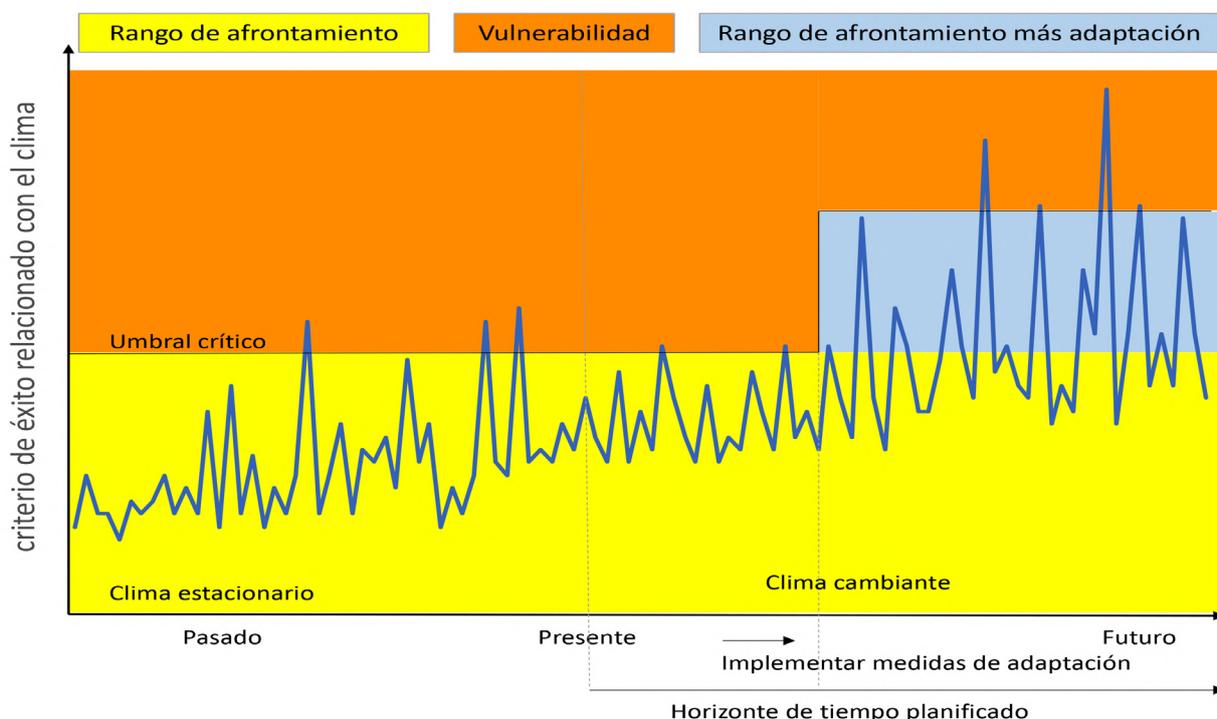
Enfoque de riesgo: En los apartados anteriores se ha expuesto como el riesgo constituye el aspecto central de la metodología planteada, y este concepto integra a su vez diferentes conceptos como amenaza, exposición y vulnerabilidad. El primer paso para analizar cada riesgo es conceptualizar el mismo empleando las cadenas de impacto, anteriormente comentadas. En ellas se recogerán las relaciones causa efecto y será posible ajustar la metodología a las características concretas del proyecto analizado.

Enfoque sistémico: como se ha comentado en el primero de los pasos propuestos, uno de los primeros puntos del proceso es delimitar los límites del sistema sobre el cual se está evaluando el riesgo climático. Para ello, es conveniente adoptar un planteamiento sistémico considerando que el efecto del cambio climático sobre un proyecto puede ser tanto directo como indirecto. Por ello, conviene mapear todos los elementos a los cuales el proyecto está interconectado o es interdependiente. A modo de ejemplo, puede que algunos proyectos analizados de manera individual en un primer análisis parezcan poco expuestos al cambio climático, pero puede que sí se vean afectadas sus cadenas de suministro, por lo que, aunque sea de manera indirecta, se verán afectados. En estos casos es muy conveniente plantear un sistema adecuado. En los apartados siguientes se proponen los límites del mismo para diferentes tipologías de proyectos.

Enfoque de ciclo de vida: los proyectos de infraestructura han de ser entendidos como proyectos a largo plazo que comprenden:

- Diferentes etapas de planificación, concreción, y diseño: en cada una de ellas será de interés analizar ciertos aspectos o tomar ciertas decisiones que podrán verse informadas por el análisis de riesgos climáticos. La evaluación del riesgo y la adaptación al cambio climático puede suponer una serie de acciones secuenciales desarrolladas durante cada una de las etapas que comprende el ciclo de desarrollo de proyectos (14) (p.ej. desarrollando un primer análisis durante la etapa de definición estratégica y planificación del proyecto, incrementando la concreción de los análisis durante los estudios de pre-factibilidad y factibilidad, y completando el análisis durante las evaluaciones de riesgos o diligencia ambiental y social). En algunas de las metodologías sectoriales se proponen análisis específicos para cada una de las etapas que suelen comprender los proyectos de ese tipo. En todo caso, con carácter general, el estudio de riesgos climáticos es generalmente mucho más valioso cuando se desarrolla desde las primeras etapas de desarrollo del proyecto.
- Diferentes etapas de ejecución, operación y abandono. La vida útil del proyecto habrá de ser tenida en cuenta para establecer los escenarios temporales de estudio, el efecto de las medidas, etc. Igualmente, a la hora de plantear medidas es conveniente tener presente que el cambio climático es un proceso gradual, y que si bien el análisis de riesgo puede determinar que un determinado proyecto ha de implementar medidas para hacer frente a importantes amenazas que acontecerán en el futuro, es posible que las mismas no sean necesarias desde el primer momento. El establecimiento de un planteamiento adaptativo del proyecto, según el cual el mismo puede verse modificado a medida que cambia el clima, puede reducir el costo de adaptación y garantizar la eficiencia del proceso (15). En la imagen siguiente (Figura 12) se muestra como para un proyecto concreto, la implementación de medidas de adaptación para incrementar los umbrales críticos del proyecto (en color azul) puede no ser necesaria hasta que trascurren unos años desde el inicio del proyecto.

➤ **Figura 12:** Representación gráfica de la evolución de la relación entre una variable climática y la operación de un proyecto, el rango de operación, la superación de umbrales críticos y la implementación de medidas de adaptación que los incrementan



Nota: La imagen muestra la evolución del éxito de la adaptación y su relación con diferentes conceptos. Este éxito de la adaptación estará vinculado a la evolución de una variable o amenaza climática (p.ej. el nivel de un río que puede causar una inundación) que determina la operación de un proyecto o actividad (que se vería inundado cuando se supera un umbral crítico o "critical threshold"). El proyecto cuenta inicialmente con un rango de operación o de afrontamiento (p. ej. cuenta con un dique protector). Este rango de operación es superado por el río ocasionalmente y de manera leve en el pasado. Esta altura del dique podría denominarse como umbral crítico. Siguiendo con el ejemplo, analizando los datos pasados, se decide que en un determinado momento del futuro será interesante implementar una medida de adaptación (p.ej. elevar la altura del muro) porque de no ser así las inundaciones serían muy frecuentes y graves. Gracias al incremento del umbral crítico, la vulnerabilidad del futuro se mantendrá en niveles aceptables.

➤ **Fuente:** adaptado de "Guidelines for Project Managers Making vulnerable investments climate resilient" ((16))

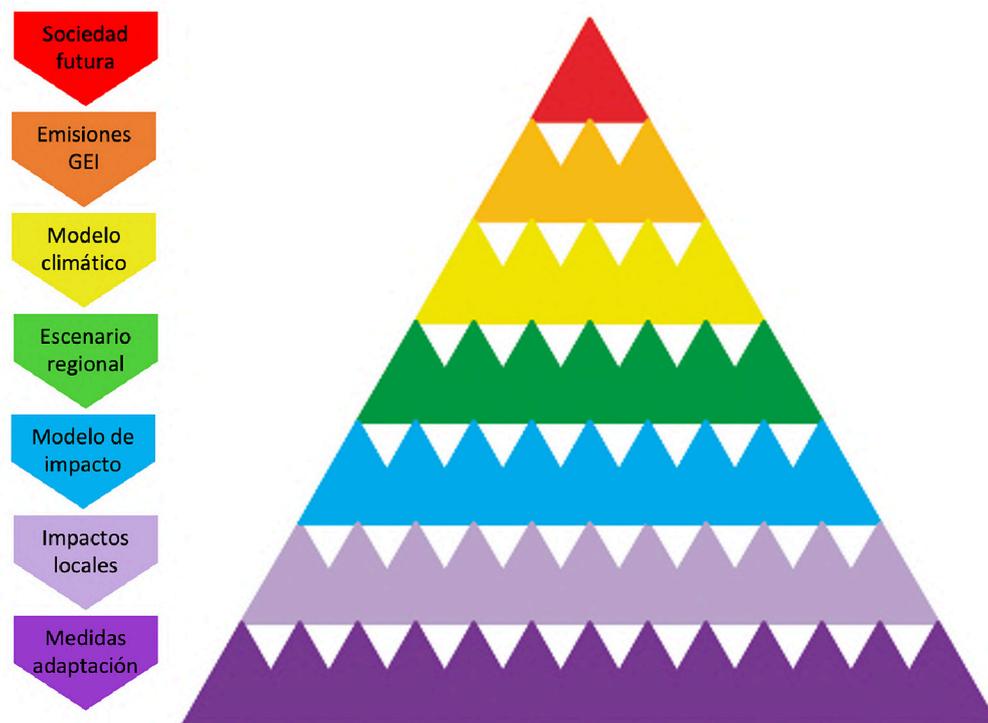
Concepción integral de la metodología: si bien cada paso ha sido presentado anteriormente como una etapa relativamente independiente, cabe destacar la necesidad de plantear una metodología homogénea en todos los pasos, ya que no solo puede hacer la misma más coherente, sino que permite economizar esfuerzos. Por ejemplo, para evaluar el efecto de las medidas, es conveniente hacer uso de las metodologías, modelos y otras herramientas desarrolladas en la secuencia de análisis de riesgo climático. En ocasiones, será posible utilizar toda esta maquinaria modificando en la misma ciertas hipótesis o parámetros de entrada para reflejar el efecto de cada una de las medidas estudiadas. Para poder aplicar este planteamiento es, por tanto, recomendable plantear todo el proceso de manera integrada desde un principio (por ejemplo, realizando un análisis preliminar de las medidas que pueden ser aplicadas y asegurándonos que las mismas pueden valorarse con la metodología de análisis de riesgo que se diseñe). Como se ha discutido, la metodología global puede suponer la aplicación de técnicas cuantitativas, cualitativas o una combinación de ambas.

Consideración de la incertidumbre en todas las etapas del proceso: Otro aspecto en el que conviene insistir es en la necesidad de gestionar en todo el proceso ciertas limitaciones y brechas de conocimiento existentes en la actualidad que podrían requerir aproximaciones cualitativas y/o el empleo de escenarios e hipótesis de trabajo o la aplicación de varios métodos en paralelo. Actualmente no se conoce cómo evolucionará socioeconómicamente el planeta durante el siglo XXI, cuál será la presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera en el futuro, si las proyecciones climáticas y el análisis de amenazas extremas del que disponemos es suficientemente preciso, etc. Igualmente, la falta de información completa sobre la sensibilidad de nuestro proyecto o de capacidad para determinar con precisión los efectos directos e indirectos del cambio climático sobre el sistema estudiado pueden afectar a la valoración del riesgo.

Es relevante, por tanto, ser consciente de estas incertidumbres y presentarlas e interpretarlas de manera transparente(14). Para ello es preciso analizar y gestionar las incertidumbres de los modelos, hipótesis y planteamientos aplicados, la debilidad de los datos empleados, o las limitaciones en cuanto a resolución espacial, etc. El aportar un abanico de posibles valoraciones del riesgo no ha de ser considerado como una debilidad del estudio. Al contrario, permite valorar las incertidumbres existentes y, en algunos casos, incluso analizar cuáles son los *drivers* que influirán más en el rendimiento del proyecto, de cara a centrar en ellos las medidas de adaptación.

A continuación (Figura 13), se muestra una simplificación de la incertidumbre asociada a cada etapa del proceso de análisis de riesgo climático y selección de medidas de mitigación. El proceso parte de la definición de unos escenarios socioeconómicos que determinan los escenarios de emisiones, que son empleados por los modelos globales para simular la evolución global del clima. Acoplados a los mismos, los modelos regionales aportan datos de mayor resolución que permiten evaluar el impacto del cambio climático con diferentes modelos (hidrológicos, hidráulicos, energéticos, etc.). Por último, se puede valorar el efecto local y simular el efecto que tendrán las medidas en comparación con un escenario tendencial, para lo cual seguramente será posible aplicar varias metodologías o planteamientos.

➤ **Figura 13:** Representación gráfica de la cascada de incertidumbres asociada a la evaluación de riesgos climáticos y medidas de adaptación



Nota: La imagen sintetiza cómo en cada etapa del proceso de análisis del riesgo climático y definición de medidas de adaptación (en la parte izquierda de la imagen), se trabaja con diferentes escenarios, hipótesis, técnicas, modelos, etc. que incrementan la incertidumbre acerca de cuál serán los impactos reales del cambio climático y el efecto de las opciones de adaptación.

Para introducir en el análisis de riesgos las incertidumbres existentes, en cada una de estas etapas es posible considerar varios modelos e hipótesis. Por ejemplo, para proyectos o planes con una vida útil prolongada donde la incertidumbre acerca de la evolución de las emisiones y el impacto de las mismas en el cambio climático puede ser importante, la evaluación de riesgos debe considerar las consecuencias sobre el proyecto de una amplia gama de modelos de circulación general de cambio climático y, cuando estén disponibles, también modelos de escala reducida (RCM) conforme a los resultados probables de la política climática internacional (por ejemplo considerando resultados generados conforme a las rutas de concentración representativa RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5).

Según vamos aplicando este planteamiento de considerar varias hipótesis, datos, modelos, etc. a lo largo de la cadena de análisis, el número de opciones que son analizadas se multiplica exponencialmente, pudiendo originar una carga de trabajo que supere los recursos disponibles. Por ello, es conveniente valorar qué incertidumbres son clave y requieren considerar varios escenarios e hipótesis para evaluarlas (p.ej. no sabemos cómo evolucionará la sociedad y las emisiones en el siglo XXI y generalmente es interesante considerar datos de varios RCP) y en cuales podemos aplicar un proceso único (p.ej. en la simulación de la sensibilidad de algunas instalaciones energéticas la relación climaproducción energética puede ser estimada con un único modelo, ya que es un proceso físico fácilmente parametrizable).

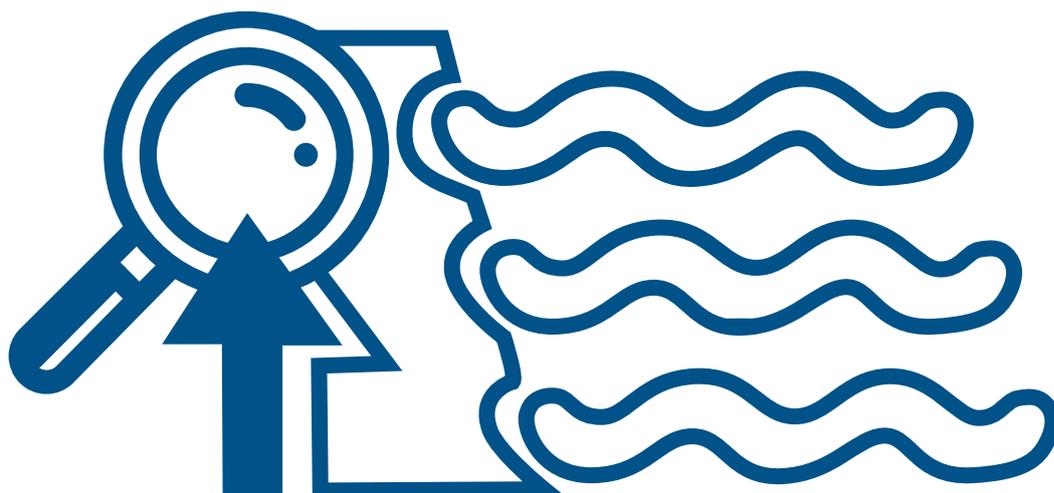
Principio de precaución:

El objetivo final del análisis de riesgos debe ser ajustar el desarrollo de los proyectos a la evolución de las tendencias climáticas que se espera en los próximos años o complementar el mismo con acciones que mitiguen los riesgos identificados. Pese a identificar las incertidumbres e intentar gestionarlas, en muchas ocasiones, no será posible establecer con precisión la valoración de algunos riesgos climáticos o esta requerirá de unos recursos que no están disponibles. Igualmente, es posible que la cuantificación del efecto de las medidas no pueda realizarse más que de una manera cualitativa o tentativa. Estas situaciones pueden conducir a una errónea interpretación de que los riesgos son desconocidos o poco importantes. Igualmente pueden conducir hacia la decisión de que, bajo esta situación, es preferible no tomar decisiones acerca de la implementación de medidas. Al contrario, en caso de que el análisis de riesgos o la valoración no pueda aportar datos precisos, no quiere indicar que no se deban implantar acciones, sino que debe tomarse como una oportunidad. La etapa de diseño y definición de los proyectos es una oportunidad irreplicable para incluir acciones de adaptación, ya que su consideración posterior puede ser más costosa o incluso inviable. Por ello se recomienda en todos los casos la identificación de las tendencias y riesgos climáticos, así como de las medidas y actuaciones destinadas a controlarlos, priorizando aquellas que muestren beneficios adicionales, que sean de interés bajo un amplio abanico de escenarios, etc.



4 > **Análisis de la variabilidad climática y el cambio climático**

4.1 El clima y su variabilidad a corto y largo plazo	45
4.1.1 El clima	45
4.1.2 Variabilidad climática	47
4.1.3 Cambio climático	49
4.1.3.1 Línea base y periodos horizonte	49
4.1.3.2 Escenarios	50
4.1.3.3 Modelos	51
4.1.3.4 Actualización de series	54
4.1.3.5 Técnicas de corrección del sesgo y reducción de escala	55
4.1.3.6 Combinación de modelos (cadenas y conjuntos)	58
4.1.3.7 Evaluación de impactos	59
4.2 Análisis climático	60
4.2.1 Clima actual	60
4.2.2 Clima futuro	62



En el apartado anterior se ha descrito la metodología general aplicable para el análisis del riesgo climático, concepto que incluye varios aspectos como son la amenaza, vulnerabilidad y exposición. En relación con el primero de ellos, la amenaza climática, en el presente apartado se expone la metodología para abordar su análisis, que es aplicable al análisis de riesgos de cualquier proyecto. Esta metodología se complementa con indicaciones específicas que se incluyen en cada una de las metodologías sectoriales incluidas en los próximos apartados. En dichos apartados se exponen las variables de mayor interés para cada uno de los sectores en los que se focaliza esta guía. En los mismos también se indican otras variables que son de interés, pero sobre las cuales habría que centrar solo los esfuerzos en caso de que las características del proyecto así lo recomienden (por ejemplo, el cambio de la humedad relativa puede afectar a la durabilidad de los paneles solares especialmente en ambientes salinos, con elevadas temperaturas, etc.)

➤ **Tabla 3:** Principales drivers climáticos que inciden en las metodologías sectoriales

Sector	Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/ Consecuencia	Resolución temporal recomendada	Resolución espacial recomendada
Energía solar fotovoltaica	Radiación solar	Relación directa con la producción fotovoltaica.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto.	Media Es interesante conseguir al menos información diaria, siendo recomendable la recopilación de algunas series horarias que permitan analizar algo más en detalle los procesos de interés.	Media La radiación y temperatura se extrapolan con relativa facilidad al punto del proyecto. El viento es un aspecto que depende las condiciones locales y se ha de extrapolar con técnicas específicas (aunque sin llegar a la complejidad de lo propuesto para la energía eólica).
	Temperatura ambiente	Determina el rendimiento de las células fotovoltaicas.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto.		
	Viento	Determina el rendimiento de las células fotovoltaicas (al refrigerar las mismas).	Cambios en el rendimiento económico del proyecto.		
	Eventos extremos (viento, granizo, ...)	Determina la carga mecánica a soportar por la infraestructura. Define las necesidades de mantenimiento y operación.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX – rentabilidad del proyecto.	Media – Alta El análisis de extremos requiere de una serie temporal lo más extensa posible. En general, el ideal sería información horaria. Como poco, información diaria.	Depende del evento Los fenómenos extremos son en ocasiones muy locales. Es importante no extrapolar conclusiones a partir de ubicaciones cercanas en la medida de lo posible

Sector	Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/ Consecuencia	Resolución temporal recomendada	Resolución espacial recomendada
Energía eólica	Cambio en el régimen de viento (incluye velocidad, dirección y duración de las rachas, etc.)	Cambios en la generación eólica.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto.	Alta o muy alta La relación entre viento y generación es superlineal. Se ha de intentar trabajar en la medida de lo posible a resolución subdiaria.	Alta o muy alta Para ganar resolución, el viento se ha de extrapolar a la ubicación de interés con técnicas específicas (MCP). La temperatura puede ser extrapolada con técnicas convencionales.
	Temperatura ambiente	Cambio en la densidad del aire y por tanto en la generación de energía eólica.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto. Afección a accesos – OPEX – rentabilidad del proyecto.	Alta o muy alta La relación entre viento y generación es superlineal. Se ha de intentar trabajar en la medida de lo posible a resolución subdiaria.	Alta o muy alta Para ganar resolución, el viento se ha de extrapolar a la ubicación de interés con técnicas específicas (MCP). La temperatura puede ser extrapolada con técnicas convencionales.
	Humedad del aire (*)	Formación de hielo en accesos y palas.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX – rentabilidad del proyecto. Puede afectar al servicio.		
	Eventos de viento extremo	Carga de las turbinas y daños a infraestructura (palas).	Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX – rentabilidad del proyecto. Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta dañada.	Media – Alta El análisis de extremos requiere de una serie temporal lo más extensa posible. En general, el ideal sería información horaria. Como poco, información diaria.	Alta – Muy alta Los fenómenos extremos son en ocasiones muy locales. Es importante no extrapolar conclusiones a partir de ubicaciones cercanas en la medida de lo posible.

Sector	Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/ Consecuencia	Resolución temporal recomendada	Resolución espacial recomendada
Energía hidro-eléctrica	Precipitación	Cambio en el régimen de caudales.	Cambios en la generación de energía.	Media La producción hidroeléctrica puede estimarse con mucha precisión a partir de información diaria. También podría estimarse, de forma grosera, con información mensual.	Media – Alta Aunque es más importante la correcta cobertura, que la resolución, es importante contar con información detallada para capturar adecuadamente los gradientes dentro del área de estudio.
	Temperatura			Media La normalmente suave variación de la temperatura permite trabajar con ella a nivel diario, e incluso mensual.	Media Aunque es más importante la correcta cobertura, que la resolución, es importante contar con información detallada para capturar adecuadamente los gradientes dentro del área de estudio.
	Cambio en el régimen de caudales	Cambio en el recurso hídrico disponible.	Cambios en la generación de energía y en el rendimiento económico del proyecto.	Media El cambio en el régimen de caudales puede analizarse con precisión a partir de información diaria. También podría utilizarse información mensual para la cuantificación.	Baja Contando con la información en un punto cercano al punto de interés puede llevarse a cabo el análisis de forma precisa.
	Caudales sólidos	Cambio en la capacidad de generación hidroeléctrica por pérdida de capacidad de reservorio (colmatación). Incremento de las necesidades de mantenimiento y operación de elementos sometidos a desgaste por sedimentos (Turbinas, etc.).	Cambio en la capacidad de embalse y por tanto en su valor. Cambios en el rendimiento económico del proyecto. Necesidad de mayor frecuencia de sustitución y tareas de O&M y, por tanto, en la rentabilidad del proyecto. Puede afectar al servicio.	Baja Los aportes sólidos suelen estar muy ligados a eventos extremos por lo que con información mensual puede realizarse una caracterización precisa. Podría incluso utilizarse información anual.	Baja Contando con la información en un punto cercano al punto de interés puede llevarse a cabo el análisis de forma precisa.
	Eventos extremos (caudales intensos)	Modificación y condicionamiento de la operativa de los proyectos (especialmente de aquellos con objetivos de control de inundaciones aguas abajo).	Cambios en el rendimiento económico del proyecto. Puede afectar al servicio.	Media – Alta El análisis de extremos requiere de una serie temporal lo más extensa posible. En general, el ideal sería información horaria. Como poco, información diaria.	Baja Contando con la información en un punto cercano al punto de interés puede llevarse a cabo el análisis de forma precisa.

Sector	Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/ Consecuencia	Resolución temporal recomendada	Resolución espacial recomendada
Dotación de agua	Precipitación	Cambio en el régimen de caudales líquidos y sólidos	Ver líneas siguientes	Similar a lo indicado para hidroenergía en las líneas anteriores.	
	Temperatura				
	Cambio en el régimen de caudales líquidos	Cambio en el recurso hídrico disponible y, por tanto, en la capacidad de atender la demanda de recurso.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto.		
	Cambio en el régimen de caudales sólidos	Cambio en la capacidad de embalse y, por tanto, en la capacidad de atender la demanda de recurso (colmatación o pérdida de capacidad de reservorio). Define las necesidades de mantenimiento y operación (frecuencia de sustitución y necesidades de mantenimiento y operación de elementos sometidos a desgaste por sedimentos (bombas, etc.)).	Cambio en la capacidad de embalse y por tanto en su valor. Cambios en el rendimiento económico del proyecto/viabilidad. Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX – rentabilidad del proyecto. Puede afectar al servicio.		
Eventos extremos (caudales intensos)	Modificación y condicionamiento de la operativa de los proyectos (especialmente de aquellos con objetivos de control de inundaciones aguas abajo).	Cambios en el rendimiento económico del proyecto. Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX (posibles cambios en los daños evitados o no evitados aguas abajo). Puede afectar al servicio.			

Sector	Driver climático	Efecto/ Impactos Intermedio	Impacto económico/ Consecuencia	Resolución temporal recomendada	Resolución espacial recomendada
Vial	Precipitación (cambios de patrones / aumento de la torrencialidad)	Inundación de la calzada por avenidas extraordinarias de ríos, saturación del sistema de drenaje y elementos de desagüe de la calzada, sedimentación acumulada u obstrucción del sistema de drenaje.	<p>Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX – rentabilidad del proyecto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la inversión inicial por mayor dimensionamiento requerido para el drenaje. • Aumento del gasto en reparaciones/sustitución de elementos del sistema de drenaje. • Parada de operación debido a precipitación intensa: aquaplaning, bloqueo por arrastre de obstáculos, inundación... <p>- Incremento del mantenimiento del sistema de drenaje debido al aumento de intensidad de la precipitación.</p>	<p>Alta o muy alta Recomendable disponer de datos horarios al menos. Es deseable poder generar una curva de intensidad duración y frecuencia con mayor resolución temporal.</p> <p>Alta o muy alta Recomendable disponer de datos horarios al menos. Es deseable poder generar una curva de intensidad duración y frecuencia con mayor resolución temporal. Ídem</p> <p>Media Contando con la información en un punto cercano al punto de interés puede llevarse a cabo el análisis de forma precisa si este punto es representativo (igual altitud, orientación en las pendientes, etc.).</p>	
		Deterioro de la superficie del pavimento.	Integridad de la infraestructura – OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del mantenimiento del pavimento debido al aumento de intensidad de la precipitación. Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta seriamente dañada.		
		Erosión e inestabilidad de taludes y terraplenes.	Integridad de la infraestructura – OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del mantenimiento de los taludes y sistema de drenaje debido al aumento de intensidad de la precipitación. Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta dañada.		
		Socavación de la cimentación por avenidas extraordinarias en corrientes de agua.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – rentabilidad del proyecto. Aumento de la inversión inicial en cimentaciones (de pilas y estribos de puentes), taludes o terraplenes paralelos a cauces de ríos. Aumento de la inversión inicial en obras de protección. Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta dañada.		

Sector	Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/ Consecuencia	Resolución temporal recomendada	Resolución espacial recomendada
Vial		Variaciones del nivel freático. Asientos de la calzada. Desperfectos en la calzada por efecto de la retracción/hinchamiento del terreno.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX – rentabilidad del proyecto: • Aumento de la inversión inicial para drenaje subterráneo. • Aumento del gasto en reparaciones de calzada Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta dañada.		
	Temperatura ambiente	Cambios en el ritmo de deterioro de la superficie del pavimento (aparición de roderas y fisuras no estructurales por oxidación prematura del ligante).	Integridad de la infraestructura – OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del mantenimiento del pavimento debido al aumento de la temperatura.	Medio Es posible trabajar con valores promedios diarios o máximas diarias.	Medio Generalmente la temperatura es más fácilmente extrapolable desde ubicaciones cercanas que otros parámetros como precipitaciones, vientos, etc
		Ritmo de envejecimiento (envejecimiento acelerado de marcas viales por aumento de temperatura).	Integridad de la infraestructura – OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del gasto en mantenimiento por repintado de marcas viales.		
		Ritmo de envejecimiento (rotura de elementos de unión por dilatación excesiva en barreras de seguridad metálicas (tramos largos)).	Integridad de la infraestructura – OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del gasto en mantenimiento por reposición de elementos de unión.		
	Sequías y olas de calor	Afección sobre especies vegetales en medianas o márgenes.	OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del gasto en mantenimiento por reposición de plantaciones en caso de aumento de la amenaza.	Baja En su mayoría sería posible valorar estos aspectos con resolución mensual, estacional, etc.	Baja
Estabilidad de taludes por afección sobre especies vegetales plantadas.		Integridad de la infraestructura – OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento de la inversión para estabilizar taludes en caso de aumento de la amenaza.			
	Afección sobre el riesgo de incendio en los márgenes de la carretera.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX – rentabilidad del proyecto. En caso de aumento de la amenaza: • Incremento del gasto de mantenimiento en control de la vegetación en los márgenes. • Aumento de la inversión en sistemas de control de incendios.			

Sector	Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/ Consecuencia	Resolución temporal recomendada	Resolución espacial recomendada
Vial		Colmatación del sistema de drenaje por arrastre de finos en caso de desertificación.	Integridad de la infraestructura – OPEX – rentabilidad del proyecto. Aumento del gasto en mantenimiento para limpieza del sistema de drenaje.		
		Calzadas y pavimentos con presencia de arrastres, calzadas deslizantes.	Afección a la circulación.		
	Soleamiento (insolación o radiación incidente)	Deterioro de pavimento y elementos de señalización afectados por la incidencia de rayos ultravioleta.	Integridad de la infraestructura – OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del gasto en mantenimiento por reposición de señales en caso de mayor soleamiento.	(**)	Baja Si no hay efectos locales de sombras, etc. se puede extrapolar desde ubicaciones cercanas.
	Nivel medio del mar	Sumergencia del terraplén.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento de la inversión de capital inicial debido al aumento del nivel medio del mar. Puede afectar al servicio.	Baja Las proyecciones de subida media se generan para décadas o periodos futuros amplios.	Baja
	Nivel freático	Escombros en la carretera, sistema de drenaje y condiciones de seguridad.	Reducción del nivel de servicio o parada de operación debido a vientos fuertes.	(**)	(**)
	Viento (intensidad)	Poca visibilidad, arena en la carretera, condiciones de seguridad.	Reducción del nivel de servicio o parada de operación debido a tormentas de arena. OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del mantenimiento debido a tormentas de arena.	(**)	(**)
		Daños en barreras acústicas, paneles, pórticos y señales.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento de la inversión de capital inicial debido a daños provocados por vientos fuertes. Afecciones al nivel del servicio o interrupciones para reparar los daños.	(**)	(**)
		Inundación costera.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – rentabilidad del proyecto. Aumento de la inversión de capital inicial debido a daños provocados por inundación costera. Puede afectar al servicio.	(**)	(**)

Sector	Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/ Consecuencia	Resolución temporal recomendada	Resolución espacial recomendada
Vial	Eventos extremos (mar, vientos, tormentas eléctricas, nieve)	Daños puntuales en instalaciones de iluminación y gestión del tráfico. Daños puntuales en sistemas de ventilación en túneles.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX – rentabilidad del proyecto: • Aumento de la inversión inicial en seguridad de sistemas eléctricos en previsión de eventos de tormenta eléctrica. • Aumento del gasto en reparación de sistemas eléctricos en caso de aumento de frecuencia/intensidad de eventos de tormenta eléctrica.	(**)	(**)
		Acumulación de nieve.	Perdida de nivel de servicio o parada de operación de la vía debido a la nieve acumulada. Integridad de la infraestructura – OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del mantenimiento invernal debido a la acumulación de nieve/hielo y torrencialidad de precipitación en zonas frías.		
		Afección sobre especies vegetales en medianas o márgenes.	OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del gasto en mantenimiento por reposición de plantaciones en caso de aumento de la amenaza.	(**)	Baja Si no hay efectos locales de sombras, etc. se puede extrapolar desde ubicaciones cercanas.
		Estabilidad de taludes por afección sobre especies vegetales plantadas.	I Integridad de la infraestructura – OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento de la inversión para estabilizar taludes en caso de aumento de la amenaza.	Baja Las proyecciones de subida media se generan para décadas o periodos futuros amplios.	Baja
		E Afección sobre el riesgo de incendio en los márgenes de la carretera.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX – rentabilidad del proyecto. En caso de aumento de la amenaza: • Incremento del gasto de mantenimiento en control de la vegetación en los márgenes. • Aumento de la inversión en sistemas de control de incendios.	(**)	(**)

Sector	Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/ Consecuencia	Resolución temporal recomendada	Resolución espacial recomendada
Áreas Urbanas (Drenaje urbano)	Subida del nivel mar / oleaje	Inundación por oleaje y mareas. Inundación Costeras.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por oleajes /golpes de mar / mareas. Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por subida del nivel del mar.	Baja	Baja desde el punto de vista de las proyecciones, pero se precisa de información a un nivel muy local para valorar la situación actual.
	Precipitaciones extremas/ tormentas	Saturación del suelo.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por inundaciones pluviales (embalsamientos).		
		Escorrentía superficial.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por inundaciones pluviales (avenidas de agua).		
		Colapso de alcantarillas.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por saturación de la red de alcantarillado.		
		Inundaciones pluviales.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por inundaciones pluviales.		
		Caudales Elevados.	Parada/mal funcionamiento de la red de drenaje debido a caudales elevados.		
		Desbordamiento de ríos.	Mal funcionamiento de las Estaciones Depuradoras de Agua (Caudales elevados).	(**)	(**)
		Inundaciones fluviales.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por inundación fluvial.	(**)	(**)

(*): la humedad del aire (en combinación con otros factores como salinidad, etc.) también influye en la corrosión, pero no se considera un aspecto a ser estudiado prioritariamente o "driver". Sí se considera relevante, sin embargo, su efecto sobre la formación de hielo.

(**) para estos aspectos no se suele emplear consideraciones de cambio climático en el diseño y se ha optado por no realizar recomendaciones concretas en cuanto a la resolución temporal y/o espacial.

4.1 El clima y su variabilidad a corto y largo plazo

En la presente guía se apuesta por integrar en el diseño de los proyectos una concepción no estacionaria del clima, entendiendo que el mismo cuenta con una variabilidad intrínseca que puede ser detectada en las series históricas, pero que, al mismo tiempo, se está viendo modificado por el efecto del cambio climático. A continuación, se exponen los principales conceptos y técnicas para aplicar este planteamiento en el diseño de proyectos climáticamente resilientes.

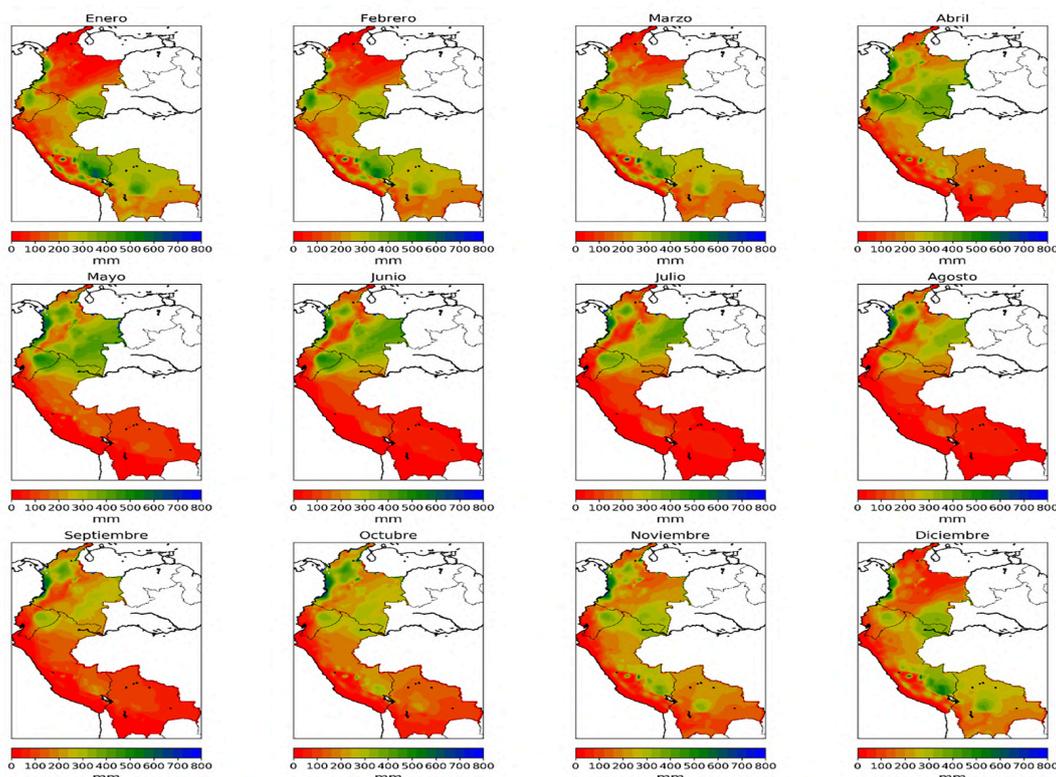
4.1.1 El clima

El término clima se utiliza para referirse a las características que describen la atmósfera como un sistema estacionario, asumiendo que el valor medio de estas propiedades tiende a largo plazo a un valor dado y estable. La atmósfera es un sistema caótico, lo que implica que sus distintas propiedades quedan adecuadamente representadas cuando se consideran como variables aleatorias. Una variable aleatoria es aquella que puede adquirir diferentes valores cada vez que se mide y que por tanto requiere del uso de la estadística para su correcta caracterización. La hipótesis de estacionariedad viene a imponer la condición de que existe una población que puede ser caracterizada por una función de distribución invariante en el tiempo. De hecho, gran parte de la práctica de ingeniería y de caracterización de riesgo se basa precisamente en esta hipótesis de estacionariedad o inmutabilidad del clima, bajo la cual, el clima futuro puede caracterizarse con precisión a partir de la observación del clima pasado puesto que, en ausencia de cambio climático, observaciones de suficiente longitud permiten determinar los valores de largo plazo que alcanzarán las propiedades de interés.

El clima es una colección, o agregación, de estados de tiempo atmosférico, que normalmente se representa mediante los **valores medios** de estos últimos. Debido a ello, las variaciones climáticas suelen presentar valores relativamente reducidos, frente a las variaciones que pueden esperarse en los estados de tiempo atmosférico. Sin embargo, estos pequeños cambios, por afectar a estadísticos del estado de la atmósfera (valores medios, varianzas y correlaciones), suponen variaciones de importancia, ya que pequeños cambios en los valores medios de una distribución pueden suponer cambios importantes en sus colas, y por tanto en sus valores extremos. También pueden ser importantes puesto que, pequeños cambios en los valores medios pueden alterar los equilibrios reinantes y cambiar los regímenes de forma drástica debido a las no linealidades de los sistemas naturales. La Figura 14 muestra un ejemplo de la variación estacional del clima de un mes a otro a través de la representación de la precipitación media mensual para cuatro países andinos.

El clima se caracteriza principalmente a través de **observaciones directas**, siendo la precipitación y la temperatura las dos variables de mayor relevancia para el análisis de riesgos climáticos debido a los impactos que de ellas se derivan. El viento sería una variable relevante también, aunque más complicada de tratar. La radiación solar, la presión atmosférica o la humedad atmosférica, entre otras, son variables que también caracterizan el estado de la atmósfera y que, por tanto, constituyen una caracterización del clima, pero que podrían tener menor relevancia en el tipo de análisis cubiertos en el presente documento.

➤ **Figura 14:** Caracterización de la precipitación media mensual para cuatro países andinos



➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Es importante destacar que las observaciones atmosféricas puntuales normalmente presentan correlaciones, mayores cuanto más cercanas están dichas observaciones en el tiempo y el espacio, y muy dependientes de la variable analizada. Estas correlaciones aparecen debido a que existen patrones espaciales y temporales de comportamiento de la atmósfera. Estos patrones analizados en su conjunto proporcionan una información mucho más relevante sobre el estado y el comportamiento de la atmósfera de lo que lo hacen las observaciones puntuales.

Normalmente, la caracterización del clima se hace sobre **periodos de 30 años (o 20 años** en algunos casos). Estos periodos de tiempo se consideran lo suficientemente cortos para que se cumpla la hipótesis de estacionariedad, pero son lo suficientemente largos como para poder definir unos estadísticos representativos del periodo. Bajo un clima completamente estacionario, y aceptando un comportamiento Gaussiano de las variables atmosféricas, un periodo de 30 años debería contener suficiente variabilidad de estados de tiempo atmosférico como para representar la variabilidad climática, sin embargo, esto no siempre es así.

Para el análisis detallado del riesgo climático, la caracterización más útil de cualquier variable climática se llevará a cabo a **escala diaria**. La escala diaria supone una escala de compromiso entre la disponibilidad de la información necesaria (información de casi cualquier variable puede conseguirse a escala diaria) y el detalle en la representación de los fenómenos estudiados. Además, gran parte de los modelos de impacto requieren información climática de detalle, lo que supone trabajar a escala diaria e incluso horaria. La caracterización estacionaria del clima a nivel diario a partir de observaciones es equivalente al ajuste de una distribución estadística, procedimiento básico que puede consultarse en cualquier manual de Estadística básica (18).

Es importante comentar aquí que, si bien la hipótesis de estacionariedad se cumple para periodos de 20 o 30 años, el cambio climático va a modificar las estadísticas del clima a futuro, provocando un cambio desde un estado estacionario inicial (caracterizado por unos valores de las variables) hasta un estado estacionario final (caracterizado por otros valores de las variables). El trabajar de esta manera permite utilizar técnicas estadísticas clásicas para caracterizar el clima en cualquier periodo temporal de referencia, sin más que actualizar los estadísticos de referencia. La hipótesis es que los cambios son lo suficientemente lentos como para que no sea aprecien efectos de la no estacionariedad, más allá del cambio de los parámetros representativos.

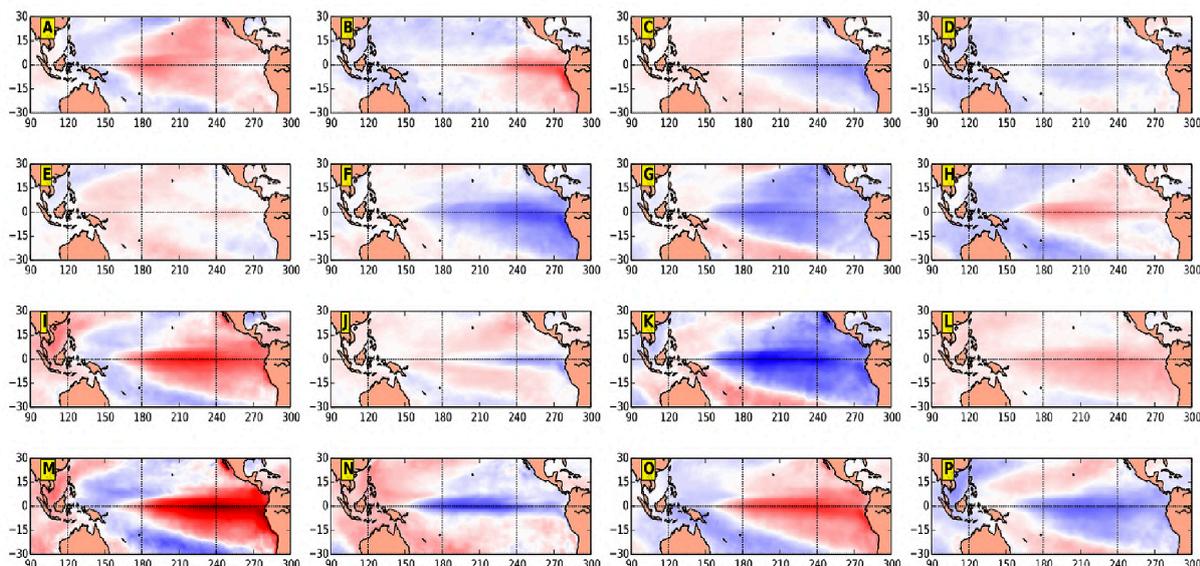
Además, ha de tenerse en cuenta que la limitación en la longitud de las series instrumentales observadas, hacen que la caracterización de cualquier periodo siempre tenga incertidumbre respecto a cuanto se pueden alejar los valores de las variables de sus valores medios. Es por ello que debe considerarse la actualización de los análisis climáticos cuando nuevas observaciones añaden información adicional a la serie histórica. Esta información adicional se referiría principalmente a valores anómalos, extremos en algún sentido. Puede ponerse como ejemplo el caso paradigmático de la estación de Maiquetia, en Venezuela, donde tras una serie de 47 años donde el máximo de precipitación diaria nunca se acercó a los 200 mm, el 48º año se produjo un máximo de 400 mm (19). Dado que este valor es un valor verificado, por fuerza exige una revisión de cualquier evaluación previa del riesgo para considerar esta nueva información.

Dentro de esta estructura de revisión de la información climática, ha de nombrarse la estadística Bayesiana como una herramienta de gran poder para integrar y actualizar nuevas observaciones dentro de la caracterización climática y también de la evaluación del riesgo climático.

4.1.2 Variabilidad climática

En el apartado anterior se habla del clima y de cómo este concepto se corresponde con la hipótesis de un estado estacionario para las variables atmosféricas. Sin embargo, como se está tratando con variables aleatorias, los estados de tiempo atmosférico presentan una cierta **desviación respecto a los valores medios** establecidos por el clima; esto es lo que se denomina variabilidad climática. La variabilidad climática es por tanto una característica intrínseca a cualquier variable aleatoria y, por tanto, a cualquier sistema caótico como es la atmósfera. La variabilidad climática es la variación que se produce de forma natural alrededor de los valores medios de una variable, quedando representada por toda la colección de valores que los estados de tiempo atmosférico pueden tomar para unos valores climáticos dados.

Figura 15: Patrones sinópticos representativos de la anomalía de temperaturas superficiales del mar para la caracterización del fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur



Fuente: Elaboración propia

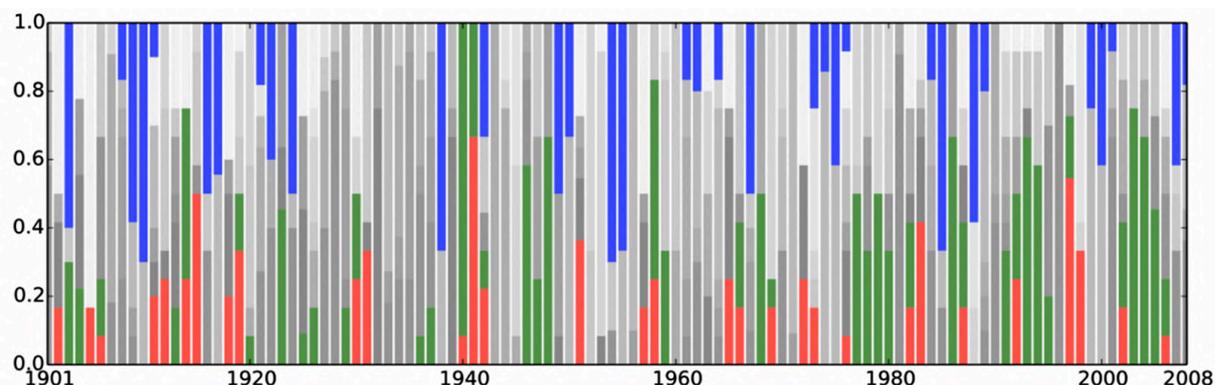
La variabilidad climática es más complicada de caracterizar que los valores medios, puesto que cuanto mayor es una desviación con respecto al valor medio, menor es su probabilidad de ocurrencia y por tanto más difícil es contar con dicha desviación en las observaciones del periodo histórico. Sirva como ejemplo el caso de zonas situadas en áreas normalmente afectadas por ciclones tropicales. Debido a que el número de estos es relativamente reducido y el área potencialmente afectable tan grande, podemos encontrar series históricas de observaciones que no cuenten con ningún ciclón histórico, y, sin embargo, saber positivamente que la ocurrencia de uno es un escenario totalmente plausible.

La variabilidad climática se podría descomponer en tres componentes diferentes: la variabilidad interanual, la estacionalidad y la variabilidad puntual.

- La **variabilidad interanual** es la debida a la persistencia de grandes patrones atmosféricos que fuerzan un comportamiento recurrente en la atmósfera. Podría nombrarse aquí el conocido fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur (ENOS, o ENSO por sus siglas en inglés) el cual condiciona años más húmedos y más secos en Latinoamérica. La componente interanual de la variabilidad explica por tanto que durante largos periodos (meses o años) las desviaciones respecto a los valores normales sean mayores o menores, y se den en un sentido o en otro de forma preferente. La Figura 15 y la Figura 16 muestran los patrones representativos del fenómeno ENOS y su distribución temporal.
- La **estacionalidad** es la variabilidad climática que se da de forma consistente a lo largo del año, es decir, la que explica las estaciones en climas templados y la alternancia de las estaciones fría y cálida, húmeda y seca, en climas más extremos. La estacionalidad captura la variabilidad respecto a los valores medios que de forma consistente afecta de periodos de semanas o meses.
- Finalmente, la **variabilidad puntual** es la componente de la desviación total que no puede ser explicada ni por la interanualidad ni por la estacionalidad, es la componente estocástica de la variabilidad, explicable únicamente por el azar.

La descomposición de la variabilidad climática en componentes tiene como principal objetivo explicar todos aquellos efectos de la desviación que no sean atribuibles al azar, ya que, si se considerasen como productos del azar, esto llevaría a una incorrecta caracterización de las desviaciones, al atribuirles únicamente al azar, y por tanto a minusvalorar el riesgo en determinadas situaciones.

Figura 16: Persistencias (como fracción del año) de patrones de El Niño (en rojo), La Niña (en azul) y el Niño Modoki (en verde)



La serie temporal muestra cómo estos patrones tienen una variación anual, lo que condiciona el clima en largas escalas.

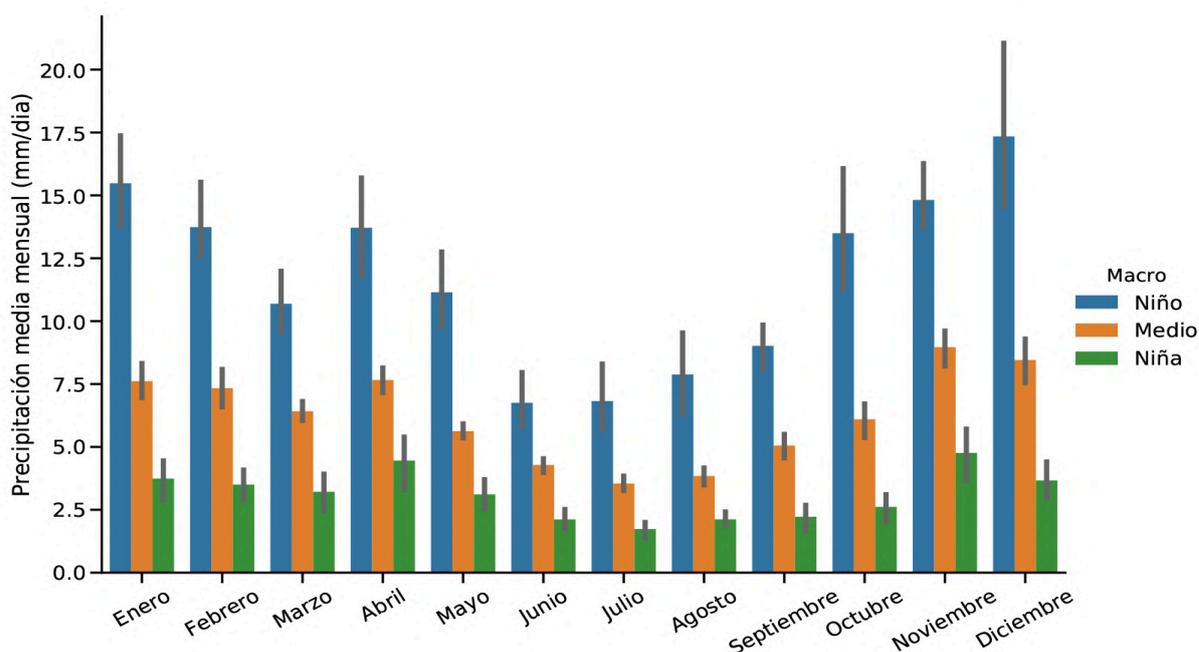
Fuente: Elaboración propia.

La variabilidad climática puede analizarse a partir de las **observaciones** recogidas en la zona de análisis, y puede complementarse con observaciones de otras localizaciones que permitan caracterizar los patrones atmosféricos que afectan tanto a la componente estacional como a la interanual. Es decir, si bien puede que contemos con una serie de observaciones corta que no contenga toda la información relativa a la estacionalidad e interanualidad, podemos construir escenarios climáticos en base a observaciones en estaciones cercanas, que nos permitan caracterizar adecuadamente la variabilidad.

Esta variabilidad es una consecuencia natural del comportamiento de la atmósfera y, por tanto, una caracterización climática para el clima actual requiere un análisis de la variabilidad. En la siguiente sección se hablará de los efectos que tiene el cambio climático sobre la atmósfera y de cómo estos cambios pueden afectar, bien sea a los valores normales (medios) del sistema climático, bien a su variabilidad.

Para caracterizar la **estacionalidad de una serie**, se trabaja habitualmente con **estadísticos mensuales**. Se computan los estadísticos necesarios, bien sea la media, bien la desviación, bien otros estadísticos, para cada mes, y esta información se representa en una gráfica como la que muestra la Figura 17.

Figura 17: Posible distribución de precipitación media mensual en función de la situación macroclimática



Nota: Las barras negras muestran la variación sobre la situación media a través de los percentiles del 5% y el 95%.

Fuente: Elaboración propia.

Esta gráfica permite analizar cómo cambia el estadístico de referencia a lo largo del año, en el caso de la Figura 17, la precipitación media mensual. Este análisis permite identificar aquellos meses en que la cantidad de precipitación es similar, o si se analiza la temperatura, aquellos meses con una temperatura media comparable. Estas diferencias estacionales, según la aplicación, pueden justificar que sea necesario dividir nuestro periodo anual en dos o más subperiodos, y que se realice un ajuste estadístico diferenciado para cada uno de ellos.

Los ajustes por meses permiten capturar mejor las diferencias a lo largo del año de las variables de referencia y, por tanto, permiten hacer una mejor evaluación de la amenaza climática y, por ende, del riesgo.

Para la **variabilidad interanual**, el procedimiento es similar al indicado para la estacionalidad. Se procede a agregar los **estadísticos a nivel anual** (media o varianza anual, por ejemplo) y se representa en una gráfica. En estos casos, las variaciones suelen ser más bruscas y menos rítmicas, ya que normalmente la variabilidad interanual está asociada a fenómenos macroclimáticos con unas dinámicas más caóticas que las variaciones estacionales.

Para incorporar esta información de variabilidad interanual en el análisis procederíamos de forma similar a como hemos señalado para el caso de la estacionalidad, es decir, generando una clasificación que permita agrupar distintos años por valores similares de los estadísticos de referencia. Una de las causas generadoras más importantes de variabilidad interanual es el fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur. Una vez identificado dicho fenómeno a partir de alguno de los índices que publican distintas agencias (por ejemplo (20) y (21)), se pueden separar los años en función de que se encuentren en el tercio inferior de valores del índice, en el tercio medio o en el tercio superior, caracterizando por tanto el clima a través de funciones de distribuciones diferentes para los años de Niño, de Niña, y medios.

Ha de tenerse en cuenta que, en función de la longitud total de las series de observaciones de partida, es posible que no exista información suficiente para una descomposición completa. Es decir, si quisiéramos caracterizar tanto la estacionalidad como la variabilidad climática, tendríamos que proceder a realizar el ajuste de una distribución por meses y por estado de ENSO (por ejemplo). Así, sería necesario caracterizar la distribución del mes de enero de un año de Niño, del mes de febrero de un año de Niño, del mes de abril de un año de Niña, y así sucesivamente. Es decir, que la inclusión de la estacionalidad y la variabilidad climática conlleva realizar múltiples ajustes de distribuciones sobre subconjuntos de datos agrupados por diferentes criterios. Esta agrupación puede reducir el número de datos por grupo hasta tal punto que no permita realizar un ajuste fiable.

4.1.3 Cambio climático

Bajo el término “cambio climático” se agrupan todos aquellos cambios a que se van a ver sometidas las propiedades estadísticas del clima a largo plazo debido a diversos factores, pero siendo el originado por la acción antrópica el que más preocupa, puesto que es el único sobre el que se puede actuar y porque ha inducido cambios a una velocidad nunca registrada anteriormente. Estos cambios en las propiedades del sistema climático pueden afectar tanto a los valores medios como a la variabilidad, y por tanto requieren de una cuantificación pormenorizada para la obtención de conclusiones relevantes.

Los cambios que se producen a futuro afectan tanto a los valores de las variables como a los patrones espaciales y temporales de las mismas, lo que implica que un incremento general de la temperatura global no se manifieste como un incremento del mismo valor en todas las localizaciones del globo, sino que hace que exista una distribución espacial debido a la concomitancia de diversos factores.

También es importante señalar que el cambio climático no tiene por qué generar necesariamente cambios, o inducir impactos, negativos. El cambio climático va a suponer la aparición de cambios que podrían ser positivos, aumentando las precipitaciones medias en lugares de escasez, o incluso disminuyendo la ocurrencia de inundaciones en algunas áreas debido a incrementos en la evapotranspiración asociada a los incrementos de temperatura.

En los próximos subapartados (4.1.3.1 a 4.1.3.7), se exponen una serie de conceptos clave para considerar el cambio climático en la planificación, diseño e implementación de proyectos de infraestructura, mientras que en el apartado siguiente (4.2) se indicará el procedimiento general planteado para evaluar las amenazas climáticas de los proyectos.

■ 4.1.3.1 Línea base y periodos horizonte

La caracterización del cambio climático se basa en cuantificar el cambio que sufrirá el clima respecto a un **periodo de referencia** determinado. Dependiendo del estudio y de la aplicación, el periodo de referencia puede variar ligeramente, pero, para asegurar la estabilidad y estacionariedad de los aspectos estudiados, comprende **generalmente entre 20 y 30 años**. La mayor parte de las veces el periodo de referencia es el 1980-2010, pero la decisión se encuentra condicionada por la longitud y calidad de las series de datos que estemos estudiando. Este periodo se considera como representativo del clima de referencia a partir del cual evaluar los cambios en el clima. Los valores de cualquier variable definidos para este periodo (que pueden incluir tanto su media como otros indicadores que describan su variabilidad) constituyen la línea base sobre la que se cuantificarán el resto de los cambios.

Los **periodos horizonte** hacen referencia a los **periodos de 20 o 30 años en el futuro** para los que queremos caracterizar el clima. En principio estos periodos pueden seleccionarse libremente, pero existe cierto acuerdo tácito porque el que el siglo XXI se descompone en tres periodos: el corto plazo, que cubre de 2011 a 2040; el medio plazo, que cubre de 2041 a 2070; y el largo plazo, que cubre de 2071 a 2100. Es muy importante destacar que no tiene sentido

hablar de las propiedades del clima en un año concreto del futuro (2050, por ejemplo) sino de periodos amplios, que sí podrían estar centrados en un año en concreto (por ejemplo, podríamos definir el periodo 2035 a 2065, centrado en el año 2050).

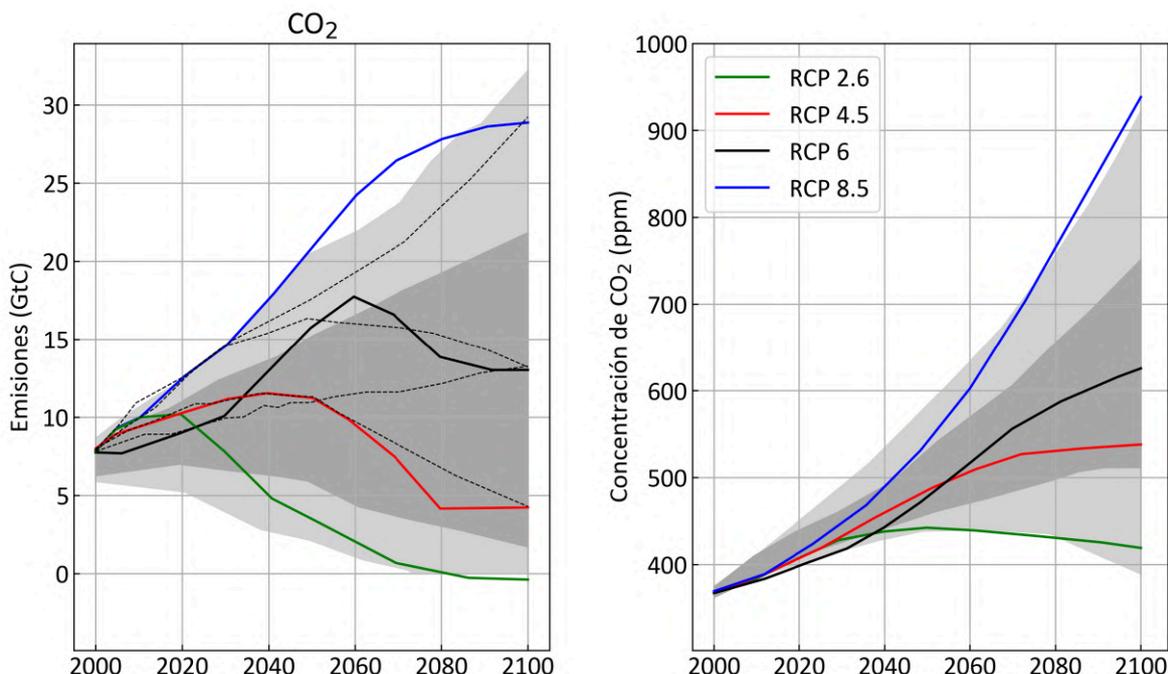
El planteamiento más frecuente para abordar el impacto del cambio climático sobre los proyectos es asumir que en cada uno de estos periodos (tanto la línea base, como los periodos horizonte) las variables que se han empleado para caracterizar el clima tienen un valor estacionario, y que pueden por tanto caracterizarse mediante distribuciones estadísticas como se comentaba en una sección anterior. Por ejemplo, para cada uno de estos periodos se considerará una temperatura media en la zona en la que se ubicará el proyecto y una variabilidad (estacional, interanual, etc.) en torno a esta temperatura media, pero no se considerará que dentro de los mismos existen tendencias al incremento de la temperatura. En cambio, al comparar diferentes periodos futuros entre sí, seguramente se apreciará en esta zona un incremento gradual de las temperaturas.

Dicho de otro modo, la reducida extensión de los periodos de análisis, 30 años, hacen que no exista apenas desviación entre considerar la estadística estacionaria o no estacionaria dentro del periodo de análisis, y por simplicidad se asume por tanto la hipótesis de estacionariedad. Sin embargo, la no estacionariedad sí que se manifiesta de forma importante en periodos de mayor longitud, y por tanto, es importante considerarla para reflejar las diferencias entre periodos. De esta forma, se asume que los cambios son lo suficientemente lentos como para que cualquier periodo de referencia (20-30 años) que consideremos esté en equilibrio, y por tanto pueda aproximarse por una situación estacionaria; pero son lo suficientemente importantes en el tiempo como para que sea imprescindible considerarlos en el análisis a largo plazo.

■ 4.1.3.2 Escenarios

Debido a la incertidumbre existente en el comportamiento futuro del clima y especialmente en los efectos del cambio climático, principalmente debido a que estos dependen de las acciones actuales y futuras de la humanidad, el análisis de los efectos del cambio climático se hace en base a escenarios. Los escenarios utilizados actualmente se conocen como **Vías de Concentración Representativas** (*Representative Concentration Pathways*, RCP, en inglés). Estos escenarios establecen los incrementos de forzamiento radiativo generados por la actividad humana, independientemente de las causas que hayan llevado al sistema hasta esos incrementos de forzamiento radiativo. Ya se veía en el Glosario que este forzamiento radiativo mide la cantidad de radiación que incide sobre la superficie terrestre ya que es la diferencia entre la insolación absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio. Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será la cantidad total de radiación absorbida en forma de energía. Esta energía es la que provoca el aumento de temperaturas y, en general, los cambios en las dinámicas atmosféricas que llevan al cambio climático.

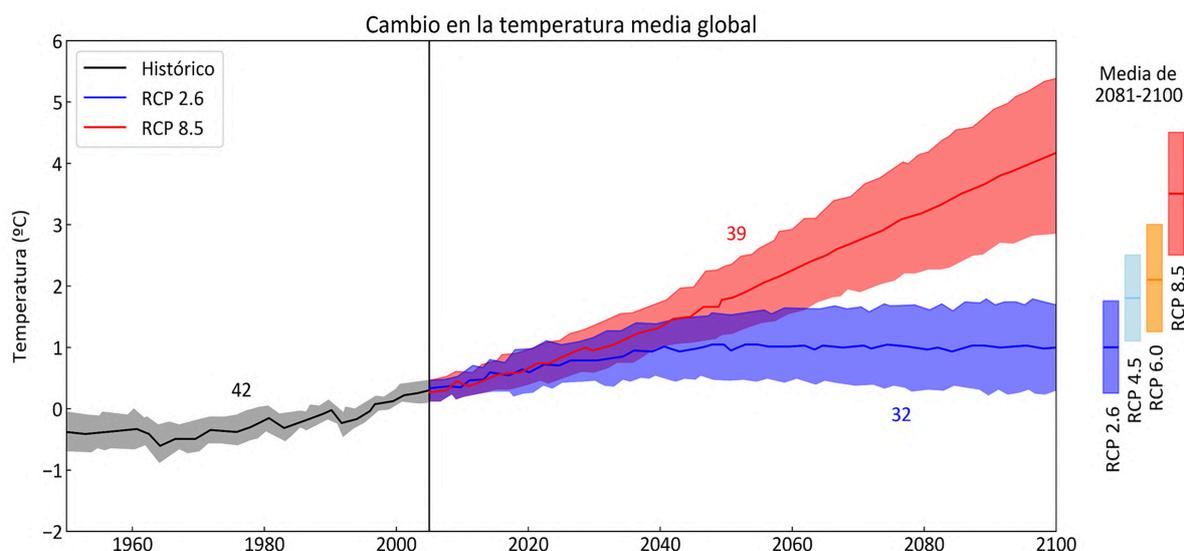
➤ **Figura 18:** Series temporales de emisiones de gases de efectos invernadero (panel izquierdo) y concentraciones de CO₂ atmosférico (panel derecho) en función de los escenarios RCP



➤ **Fuente:** "The representative concentration pathways: an overview" (72)

El IPCC ha definido cuatro valores de incremento del forzamiento radiativo, que constituyen cuatro hipótesis de trabajo que dan lugar a cuatro escenarios de cambio climático: RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5. (22) Cada uno de estos escenarios representa un forzamiento radiativo mayor que el anterior. En términos globales, los cuatro escenarios están ordenados de menor a mayor forzamiento radiativo, y a nivel global, de menor a mayor incremento de temperatura sobre el sistema Tierra (ver Figura 19).

➤ **Figura 19:** Evolución histórica de la temperatura media global y posibles evoluciones de los diferentes escenarios, con sus valores medios sobre el periodo 2081-2100



➤ **Fuente:** IPCC Working Group I Assessment Report, Summary for Policy Makers, 2013 ((23))

Esta ordenación que aplica casi directamente a escenarios de temperatura desaparece para prácticamente el resto de variables, especialmente para la precipitación, ya que esta no guarda una relación lineal con la temperatura y, por tanto, la respuesta final de la precipitación puede variar en base a otros mecanismos de retroalimentación. Esto provoca que no sea extraño contemplar incrementos o decrementos de precipitación mayores en el escenario RCP4.5 que en el RCP8.5.

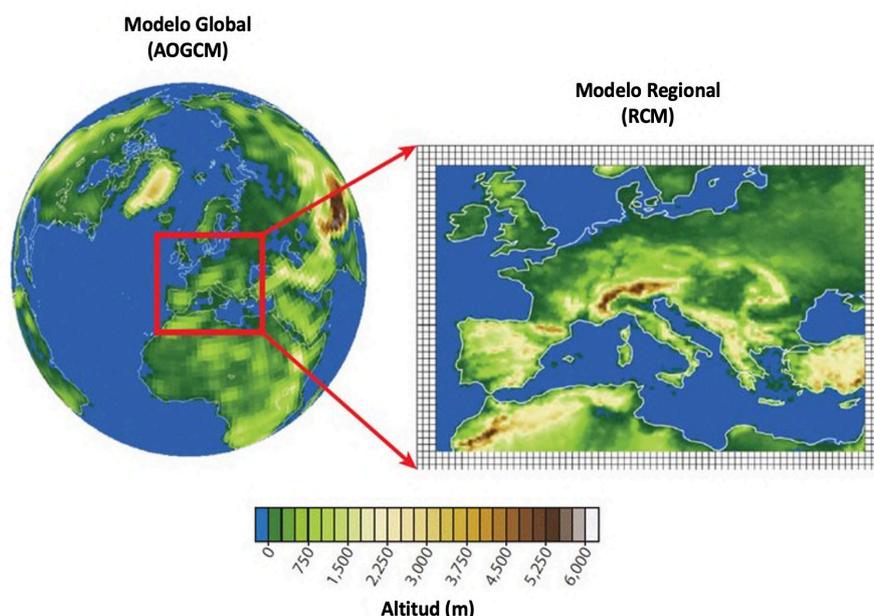
La realización de estos escenarios, es decir, el que alcancemos uno u otro valor del forzamiento radiativo, dependen de la interacción de muchas dinámicas socio-económicas y de algunos procesos físicos que afectan al sistema global que aún no se conocen con detalle. Es por ello que no es posible asignar una **probabilidad de ocurrencia** a cada uno de los escenarios, ni asumir que contemplan, o sean representativos, del total de las posibilidades. Sin embargo, estos cuatro escenarios cubren un posible rango de variaciones lo suficientemente grande como para asumir que suponen un conjunto exhaustivo de las posibilidades a las que nos enfrentamos a medio y largo plazo. **Debido a esto, cualquier evaluación del riesgo climático debería realizarse considerando todos los escenarios posibles, siendo imprescindible considerar al menos dos: el RCP4.5 y el RCP8.5.** De esta manera se tiene una idea del rango de posibles valores del riesgo que pueden aparecer durante la vida útil del proyecto y permiten, por tanto, una mejor planificación. Generalmente no existen criterios generales que permitan seleccionar el escenario a utilizar en cada caso; y la práctica óptima consistiría en la utilización de todos los escenarios climáticos. Tan solo la experiencia del consultor y su comprensión de los fenómenos subyacentes puede justificar la idoneidad de reducir el número de escenarios a utilizar.

■ 4.1.3.3 Modelos

El comportamiento de la atmósfera se analiza mediante la combinación de medidas y modelos numéricos que resuelven las ecuaciones dinámicas y termodinámicas de la atmósfera, y las de su interacción con otros sistemas terrestres como pueden ser los mares y océanos, y los cuerpos helados. Estos modelos, que resuelven las propiedades atmosféricas para todo el globo reciben el nombre de **modelos de circulación general** (*General Circulation Models* o GCM en inglés), y proporcionan información sobre el estado de la atmósfera en una malla global en torno a los 250 km de lado a distintos niveles de elevación sobre la superficie (24) (ver Figura 20). Estos modelos se calibran para reproducir las propiedades climáticas observadas en el periodo histórico. Una vez calibrados, pueden ser alimentados con los forzamientos actualizados en base a los escenarios de cambio climático (los anteriormente comentados RCP y otros escenarios complementarios), permitiendo generar proyecciones de las variables climáticas en el futuro. Los modelos normalmente incluyen datos del periodo de observaciones históricos, y cubren el futuro hasta el año 2100.

Los modelos GCM aproximan cada una de las dinámicas físicas que resuelven de manera diferente. Además, como existen distintas aproximaciones para distintas dinámicas, las combinaciones se multiplican, y eso hace que exista una variedad de modelos creados por distintas instituciones e investigadores. Cada uno de estos modelos es, en principio, una aproximación equivalente a cualquier otro, en lo que se refiere a la representación del sistema global, pero es importante tener en cuenta que puede estar representando mejor unos procesos que otros, al igual que puede tener más pericia resolviendo unas localizaciones que otras.

➤ **Figura 20:** Ejemplo de resolución espacial y dominio de un GCM (izquierda) y de un RCM (derecha)



➤ **Fuente:** *Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative* (25)

La resolución espacial típica de los GCM hace que los valores que resuelven para las variables representen agregaciones sobre áreas amplias y por tanto sus valores no deben ser directamente utilizados en modelos de impacto pensados para ser alimentados con información puntual como la obtenida de un pluviómetro o un termómetro. De hecho, para mejorar la resolución espacial de estos GCM se utilizan a veces **modelos de circulación regional** (*Regional Circulation Models*, RCM, en inglés) que toman las condiciones atmosféricas resueltas por los GCM y las utilizan como condiciones de contorno para resolver las ecuaciones de la dinámica atmosférica sobre mallas de mayor resolución espacial (en torno a los 25 km de lado) que cubren áreas geográficas menores que las de los GCM (ver Figura 20). Este proceso se conoce con el nombre de “*downscaling* dinámico”. A pesar del esfuerzo que suponen, los valores que resuelven siguen siendo valores promediados y por tanto no utilizables directamente en un modelo de impacto, aunque obviamente capturan la variabilidad espacio-temporal de las dinámicas de forma mucho más precisa que los GCM.

Es importante tener en cuenta que incluso utilizando datos generados mediante “*downscaling* dinámico” es necesario realizar la corrección de sesgo y posible reducción de escala estadística para poder utilizar estos valores en modelos de impacto para el cálculo del riesgo.

El diseño, operación y calibración de modelos globales y regionales dinámicos requiere de conocimientos muy específicos e importantes recursos. El objetivo de este apartado es exponer al lector sus planteamientos y características para hacer uso de los datos generados por los mismos. La aplicación de estos análisis detallados en la evaluación del riesgo climático no es siempre imprescindible, no siendo la mayor parte de las veces siquiera práctica su implementación, es por ello por lo que se facilitan algunas fuentes y recomendaciones para poder adquirir la información que generan e incorporarla a los proyectos. En cualquier caso, la incorporación de este tipo de información ha de ser evaluada considerando los objetivos específicos del proyecto analizado.

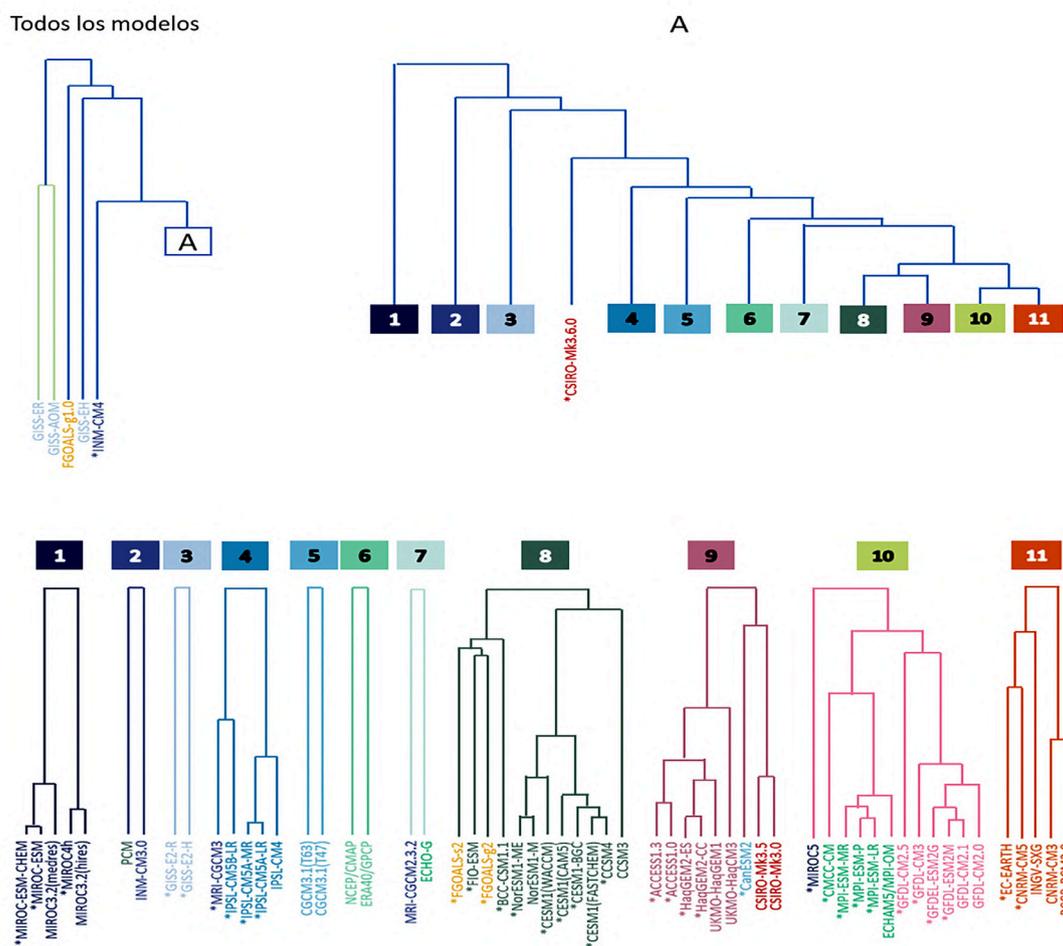
La adquisición y procesamiento de los datos brutos que facilitan estos modelos requieren de ciertos conocimientos específicos que pueden no ser habituales en los equipos al frente del diseño y planificación de proyectos de infraestructura. Por ejemplo, procesar los datos facilitados por algunas fuentes (CORDEX; C3S, etc.) puede implicar tareas como rotar las coordenadas originales, procesar ficheros en formatos como NetCDF (26) o GRIB (27), programación en lenguajes específicos como Python o R, etc. En cambio, algunos de los países facilitan los datos generados por los modelos regionales que han promovido en formatos GIS o, incluso, como información no editable (por ejemplo, en mapas incluidos en documentos pdf, como es el caso por ejemplo de los escenarios generados por IDEAM para Colombia). Si bien estas opciones los hacen accesibles para un público más amplio, generalmente suponen una agregación de los resultados que limita su potencial explotación.

Resumiendo, las principales fuentes de información de modelos climáticos que nos permiten predecir la evolución del clima son los modelos de circulación general (CMIP5 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*, etc.) y los modelos de modelos de circulación regional (aportados por fuentes como CORDEX, NASA NEX GDDP, o autoridades nacionales). Es importante tener presente que la aplicación directa de los datos generados por estos modelos globales y regionales no es recomendable y han de ser **combinados con información histórica**. En el apartado 4.2.2 (Clima futuro) se expone como combinar estas fuentes con los datos registrados para poder aplicar las salidas de los modelos en el diseño de los proyectos.

Existen numerosos modelos climáticos de distintas instituciones, cada uno con sus fortalezas y debilidades. Debido a ello, han de considerarse varios modelos climáticos para poder reducir la incertidumbre sobre las proyecciones de cambio climático. La selección de modelos ha de basarse en la calidad de la representación de las variables que nos interesen para el estudio específico. Por ejemplo, si quisiéramos realizar una evaluación del cambio en la producción solar debida al cambio climático, deberíamos primero analizar cuán bien captura cada modelo la variable de referencia, radiación solar en este caso, y decidir en base a esta clasificación cuantos y qué modelos usar.

Han de usarse aquí también criterios económicos, puesto que no siempre estarán disponibles recursos ilimitados para la realización de los análisis y por tanto, ha de seleccionarse un número de modelos que permita capturar adecuadamente la variabilidad, sin suponer una carga de trabajo inabordable.

Figura 21: Genealogía de modelos de circulación general



Fuente: “Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there” (28)

Otro criterio a tener en cuenta sería el seleccionar modelos diferentes entre sí. Para ello pueden hacerse uso de clasificaciones como la que se muestra en la Figura 21 (obtenida de (28)) en donde se construye una genealogía de modelos GCM en base a la similitud de las predicciones que proporcionan. La aplicación de este criterio conllevaría seleccionar modelos que se encuentren poco emparentados entre sí para explorar de forma más eficiente el espacio de posibles proyecciones futuras.

En la figura existen dos árboles genealógicos diferenciados, debido a que no todos los modelos se utilizan en todos los escenarios. De esta forma, la figura muestra que para el escenario actual (*control state*), el número de modelos es muy superior al utilizado para simular el escenario RCP8.5. Este es un detalle adicional a tener en cuenta a la hora de escoger modelos, ya que las comparaciones entre escenarios han de llevarse a cabo considerando un único modelo, o un conjunto igual de modelos en uno y otro escenario.

4.1.3.4 Actualización de series

Para poder utilizar la información proporcionada por los GCM y los RCM en el modelado de impactos, se ha de transformar la información proporcionada por estos para **convertirla en el equivalente a una observación directa** (realizada por medio de un termómetro, en el caso de la temperatura; o de un pluviómetro, en el caso de la precipitación). Como se ha indicado anteriormente, los GCM y RCM generan datos en rejillas de diferente tamaño y es preciso aplicar técnicas de corrección de sesgo y de reducción de escala para que los valores que proporcionen sean asimilables a observaciones. El objetivo final sería actualizar las series históricas para generar las futuras tal y cómo se muestra en la Figura 22.

Las técnicas de **corrección de sesgo** sirven para eliminar los sesgos o errores sistemáticos que presentan los modelos. Un sesgo en un modelo podría manifestarse porque el modelo predijese de forma sistemática una temperatura mayor a la observada, normalmente porque no es capaz de capturar adecuadamente algún proceso local. Las técnicas de **reducción de escala** tienen por objetivo transformar la serie de datos generada por el GCM o RCM en el equivalente de una observación, reduciendo de forma intrínseca la escala, o resolución, de la medida. Las técnicas de reducción de escala requieren de información adicional sobre el área de estudio que permita establecer relaciones para dicha reducción de escala. Existen múltiples métodos que combinan los dos efectos en una única aplicación. El apartado siguiente profundiza en estas dos técnicas, aunque en la literatura pueden encontrarse análisis más profundos de cada una de ellas ((29–34)).

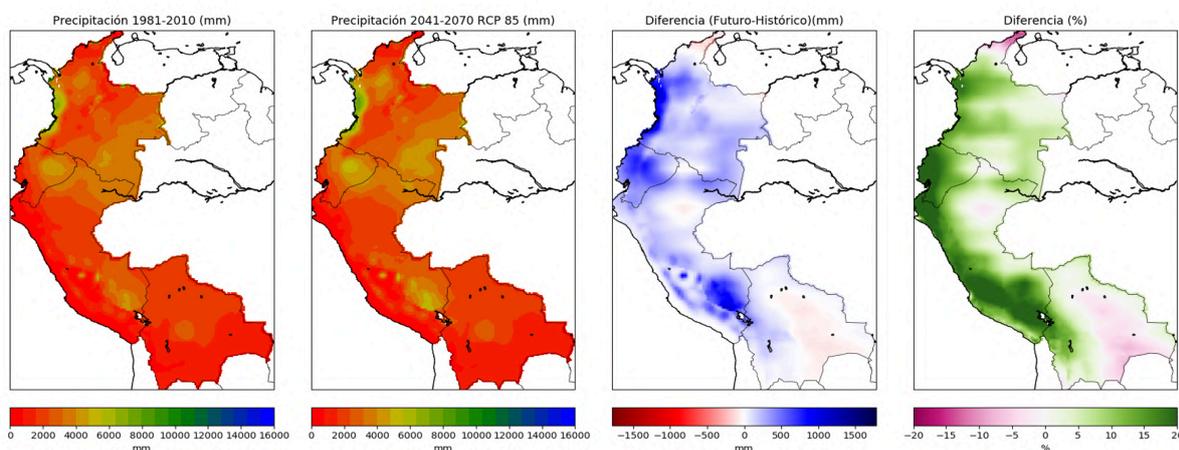
Las técnicas de reducción de escala pueden diferenciarse en dos clases: las estadísticas y las dinámicas. Las técnicas de **reducción de escala estadística** se basan en el establecimiento de relaciones estadísticas (regresiones en un sentido general) que relacionan las variables observadas (precipitación de un pluviómetro, por ejemplo), o las derivadas de aquellas (profundidad de inundación obtenida mediante modelado), con los valores predichos por los GCM y RCM en aquellos periodos en que contemos con información simultánea. Esta relación se utiliza después para transformar otras predicciones de los GCM y RCM en el equivalente de observaciones o predicciones. Las técnicas de **reducción de escala dinámica** se basan en la utilización de modelos de base física que transforman las predicciones de los GCM y RCM en los equivalentes a observaciones. Se utilizan modelos que resuelven las ecuaciones atmosféricas a mucha más resolución que los GCM y RCM, pero sobre dominios muy reducidos.

Para la evaluación de impactos, normalmente se utilizan técnicas de reducción de escala estadística para transformar las salidas de los GCM y RCM, y posteriormente se utilizan modelos dinámicos (modelos hidrológicos, modelos de gestión, etc.) para transformar esas salidas en magnitudes derivadas.

El motivo de preferir la utilización de técnicas de reducción de escala estadística frente a las dinámicas es debido a que suponen un costo computacional mucho menor que las dinámicas, y además no requieren el manejo de los complicados modelos que se utilizan para hacer reducción de escala dinámicas. Es importante destacar aquí, que nos referimos por el momento a la reducción de escala de variables atmosféricas, ya que las técnicas de reducción de escala pueden aplicarse a cualquiera otra dinámica, y como acabamos de comentar, sí suelen preferirse técnicas de reducción de escala dinámica para transformar la información atmosférica en las variables requeridas por los modelos de impacto.

En cualquier caso, se debe analizar en cada caso particular qué técnica es más conveniente utilizar en base al nivel de la inversión que se está evaluando y a la variable que se desea tratar. Probablemente no pueda justificarse la realización de una reducción de escala dinámica en el caso de la precipitación, pero puede que sí en el caso del viento, más aún si la inversión evaluada se sitúa en los centenares de millones de dólares, que si se encuentra en las decenas bajas.

➤ **Figura 22:** Mapa de precipitación media histórica, precipitación a medio plazo y cambios esperables derivados de un modelo climático



➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Por ejemplo, las obras de abastecimiento de agua para consumo humano, centrales hidroeléctricas, sistemas de riego agrícola y otra infraestructura de larga vida útil vinculada a los recursos hídricos, han de ser diseñadas considerando la disponibilidad de recurso hídrico en el futuro. La técnica más común para evaluar este aspecto es obtener, a partir de la combinación de observaciones y salidas de modelos atmosféricos dinámicos, mapas de distribución de las variables que gobiernan el ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración, etc.) para las cuencas aportantes. La combinación de ambas (modelos y observaciones) se realiza empleando las técnicas ya comentadas de reducción de escala y corrección de sesgo. Una vez que se han generado estos mapas para los diferentes horizontes, se aplica el modelado hidrológico para inferir las variables de interés para el proyecto (escorrentía, caudal). Este paso de transformar las variables atmosféricas en hidrológicas también puede denominarse reducción de escala dinámica, ya que transforma una variable sobre la cuenca (la precipitación, por ejemplo) en otra sobre una parte menor de la cuenca (la descarga fluvial en una determinada sección del río).

■ 4.1.3.5 Técnicas de corrección del sesgo y reducción de escala

Como se ha comentado anteriormente, las técnicas de corrección de sesgo y reducción de escala sirven principalmente al propósito de transformar las salidas de los modelos en series temporales equivalentes a datos de observación. Estas técnicas pueden revertir gran complejidad y existen multitud de referencias en la literatura científica ((29–34)) que explican las distintas alternativas y las mejores formas de evaluar su desempeño en situaciones concretas.

Este apartado se va a centrar en la aplicación de tres muy concretas que son sencillas de aplicar y que proporcionan una información suficiente para la mayor parte de los estudios de impacto: son la técnica de las deltas, el método directo y el mapeo de cuantiles. Una explicación exhaustiva puede encontrarse en la referencia (32).

Para las explicaciones a continuación se asume que x se refiere a cualquier variable tomada del modelo climático, mientras que y se refiere a cualquier observación. Las variables irán acompañadas además de un superíndice. Una p hará referencia al valor de la variable en el presente (o durante el periodo de control o periodo base) y una f hará referencia al valor de la variable en el futuro. Una barra horizontal sobre la variable indicará la media de esta. De esta forma x^f será el valor de una variable en el futuro obtenida a partir del modelo, mientras que y^p será el valor medio de una variable observada en el periodo base.

El **método de las deltas para la corrección del sesgo** (ver Figura 23) consiste en determinar, a partir de las predicciones de los modelos climáticos, cuál es la corrección que es conveniente añadir a las observaciones para convertirlas en el equivalente de observaciones en el periodo futuro. Es decir, se calcula el cambio en las medias obtenido a partir del modelo climático, y este cambio se le aplica a la observación:

$$y^f = y^p + (\bar{x}^f - \bar{x}^p)$$

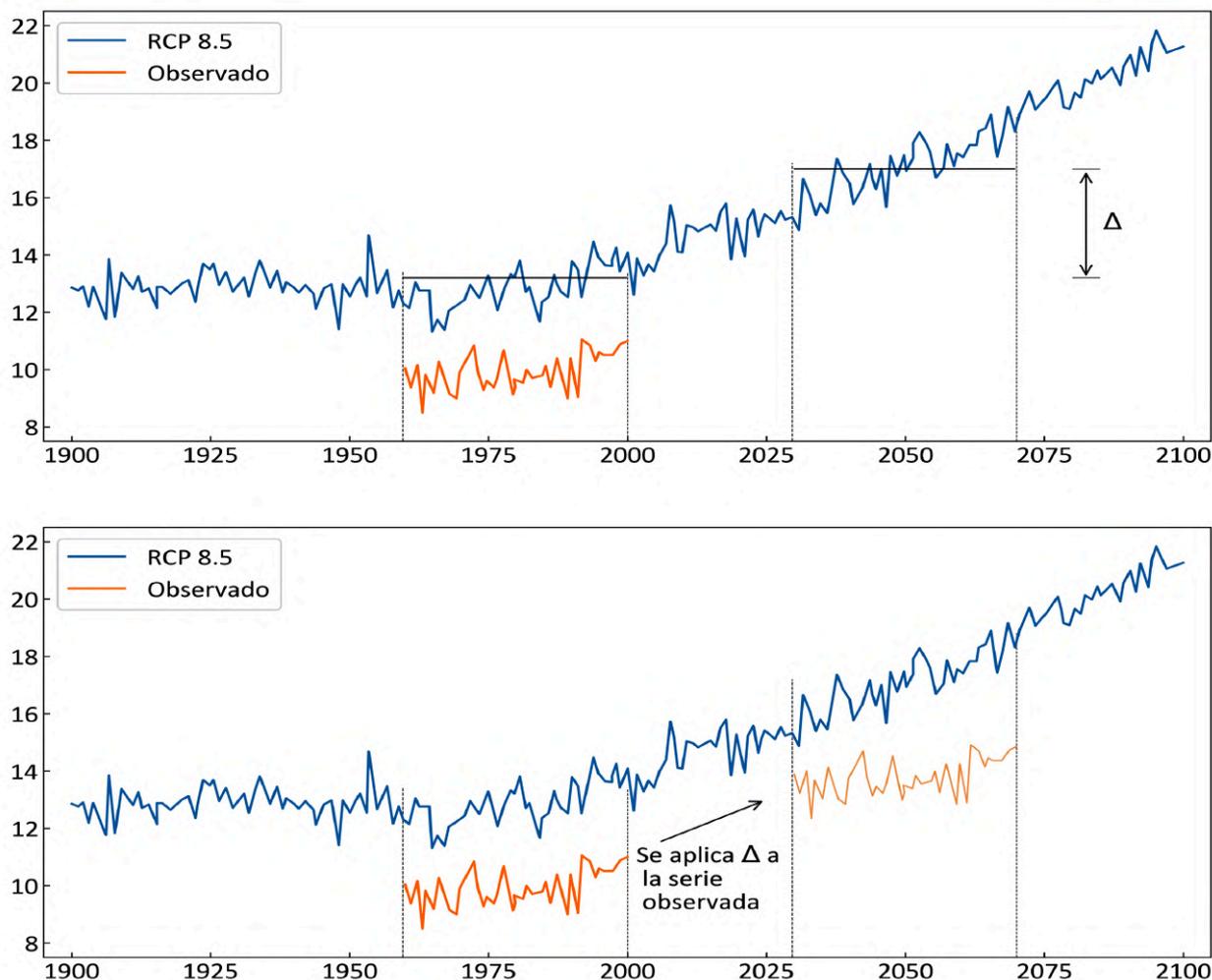
Para aquellas variables que toman valores positivos, como por ejemplo la precipitación, también puede llevarse a cabo una modificación a partir del cambio relativo:

$$y^f = y^p \times \frac{\bar{x}^f}{\bar{x}^p}$$

Esta corrección de sesgo se lleva a cabo habitualmente sobre valores diarios de la variable, es decir, y^p serían los valores observados de la variable considerada a nivel diario, mientras que y^f serían los valores diarios de la serie actualizada. Por su parte, \bar{x}^f y \bar{x}^p serían las medias diarias de la misma variable obtenidas del modelo para el periodo futuro y pasado respectivamente. De esta forma, las medias diarias de la variable en el modelo se utilizan para corregir los valores diarios de la variable observada y generar los valores diarios de la variable actualizada. En aquellos casos en que no se disponga de información diaria, podría realizarse el mismo análisis con los valores mensuales.

El procedimiento utilizado será el mismo para cualquier variable con la que trabajemos, es decir, x e y puede hacer referencia a la precipitación, la temperatura, la radiación solar, o cualquier otra variable. Lo que ha de tenerse en cuenta es que tanto x como y han de representar la misma variable (ambas han de ser temperatura, o precipitación, etc.).

➤ **Figura 23:** Representación gráfica de la aplicación del método de las deltas a la corrección de sesgo de una serie climática



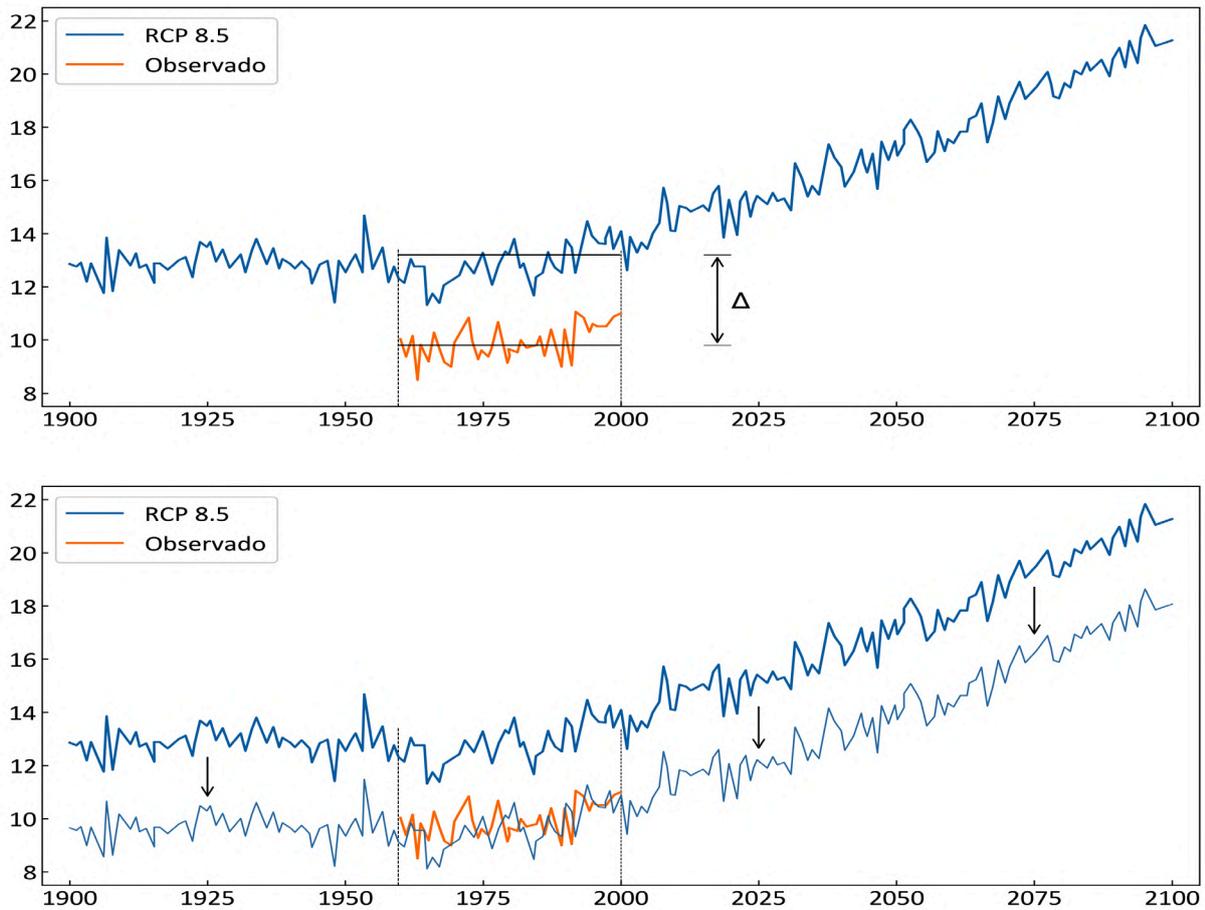
Nota: La imagen muestra los datos observados (línea de color negro) y las proyecciones del modelo (en color rojo). El método de las deltas calcula la diferencia entre las medias del periodo histórico del modelo y el futuro del modelo. Este cambio en las medias del modelo se aplica a las observaciones, generando una mejor proyección de las observaciones a futuro.

➤ **Fuente:** adaptado de "Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions" ((35)).

El **método directo de corrección de sesgo** (ver Figura 24) consiste en eliminar de la proyección del futuro generada con el modelo el sesgo que este tiene durante el periodo base, dando lugar a una fórmula similar a la del método de las deltas pero algo diferente:

$$y^f = x^f - (\bar{x}^p - \bar{y}^p)$$

Figura 24: Representación gráfica de la aplicación del método directo a la corrección de sesgo de una serie climática



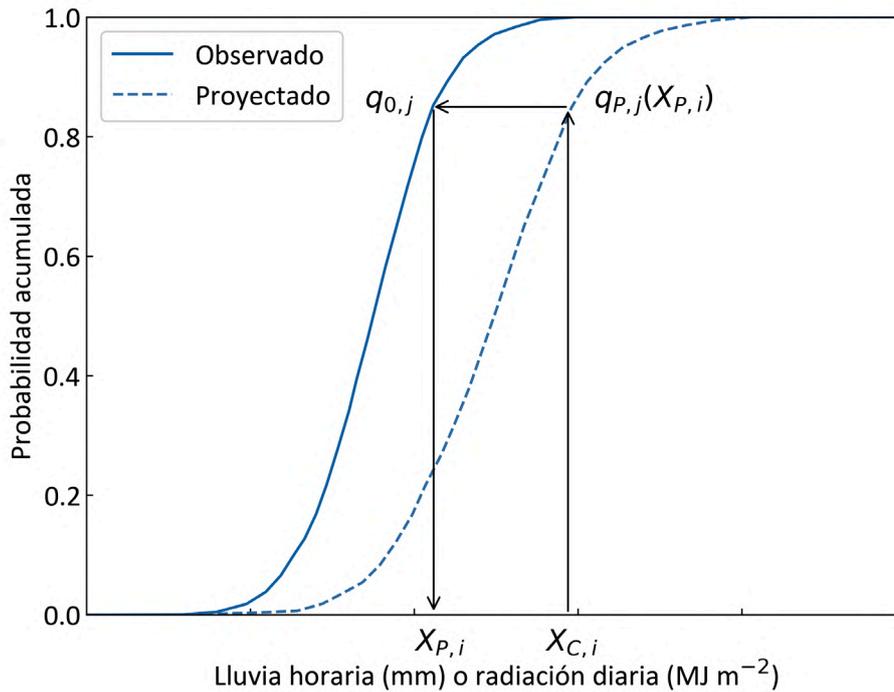
Nota: La imagen muestra las observaciones (línea de color negro) y las proyecciones del modelo (línea de color rojo). En el método directo se calcula la diferencia en las medias entre el modelo y las observaciones para el periodo histórico. Esta diferencia se sustrae de la serie del modelo para generar el equivalente a una observación que cubre todo el periodo incluido en el modelo.

Fuente: adaptado de "Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions" ((35)).

En el método de las deltas se conservan las propiedades de distribución temporal de la serie observada (persistencias, autocorrelaciones, etc.), mientras que en el segundo método estas características son las predichas por el modelo. Dependiendo de las características del modelo utilizado, podría interesar utilizar el método directo en casos en que, por ejemplo, el modelo fuese capaz de capturar cambios en la cantidad de días de precipitación o en la distribución de estos con suficiente pericia. En casos en que tan solo se considere válida la pericia del modelo para capturar cambios en las medias, se preferirá el método de las deltas.

El método del mapeo de cuantiles (ver Figura 25) se basa en que existe una transformación de los datos del modelo para el periodo de referencia que los convierte exactamente en los valores observados. Se trabaja bajo la hipótesis de que esta transformación tan solo depende del modelo utilizado y no del periodo estudiado, con lo que, una vez caracterizada la transformación para el periodo histórico, esta puede usarse para los periodos horizonte futuros. Esta transformación asocia cada valor del modelo (x^i) con el valor asociado al cuantil correspondiente de la serie observada (y^j). Es decir, asumiendo dos series de la misma longitud y por tanto con el mismo número de valores, el mayor valor del modelo se transforma en el mayor valor observado, el segundo mayor valor del modelo en el segundo mayor valor observado y así sucesivamente para todos los valores.

Figura 25: Aplicación del método del mapeo de cuantiles



Nota: La línea continua representa la función de distribución de las observaciones, mientras que la línea discontinua representa la función de distribución del modelo.

Fuente: adaptado de "Bias Correction of MRI-WRF Dynamic Downscaling Datasets" (36)

Para llevar a cabo esta operación, se calcula el cuantil del valor del modelo (x^i) mediante la función de distribución del modelo (F_{mod}). Este cuantil se convierte de nuevo en valor de la variable mediante la inversa de la función de distribución de las observaciones (F_{obs}). El método del mapeo de cuantiles modifica la distribución completa de los datos modelados de manera no uniforme lo que permite un ajuste más fino del sesgo.

$$y^f = F_{obs}^{-1} \left(F_{mod}(x^f) \right)$$

En este caso, las variables tienen la misma resolución temporal que se comentó para el método de las deltas y el método directo, es decir, transformamos el valor diario de la variable del modelo, en el equivalente a una observación diaria. En caso de no disponer de información diaria, podría llevarse a cabo utilizando información mensual.

Para la función de distribución puede utilizarse un amplio abanico de opciones (Gaussiana, Gamma, Exponencial, etc.). Habrá de escogerse aquella que mejor ajuste los datos. Para ello, se recomienda utilizar el criterio de Akaike (37) para escoger aquella distribución que mejor equilibre el ajuste con el número de parámetros que utiliza.

Es importante destacar que las técnicas de corrección del sesgo pretenden reducir o eliminar los errores sistemáticos cometidos por el modelo, pero este sesgo no tendría por qué ser homogéneo a lo largo del tiempo. Por ello, las técnicas de corrección de sesgo normalmente se aplican por meses o estaciones, asumiendo que el error sistemático del modelo no es independiente de las condiciones reinantes. Es decir, puede que un modelo sea capaz de capturar adecuadamente las dinámicas en épocas húmedas, pero no en las secas; o que reproduzca de forma más precisa la radiación durante la época estival que en invierno.

■ 4.1.3.6 Combinación de modelos (cadenas y conjuntos)

Como se comentaba en párrafos anteriores, existen diversos modelos climáticos, que resuelven las mismas ecuaciones mediante esquemas numéricos y parametrizaciones equivalentes pero que proporcionan resultados ligeramente diferentes. Esta variación de resultados es fruto de las incertidumbres existentes en cuanto a las maneras óptimas de modelar distintas dinámicas.

Este ecosistema de modelos se incrementa al combinar los posibles GCM con distintos RCM, dando lugar a los modelos en cadena o en cascada. Cuando combinamos **modelos en cascada**, utilizamos la salida de uno como la entrada del siguiente, normalmente para pasar de una resolución grosera, tanto espacial como temporal, a una resolución más fina. Esta cadena de modelos normalmente comienza con un GCM, que luego suele incorporar un RCM, aunque en algunas ocasiones podrían anidarse modelos de detalle a continuación.

Las diferencias en las proyecciones entre distintos modelos, y entre distintas cadenas de modelos, hacen que no sea sencillo evaluar con que valores llevar a cabo el análisis de cambio climático. En principio, las predicciones de todos los modelos son equivalentes y, por tanto, podrían considerarse equiprobables, con lo que, para proporcionar un valor del cambio que resuma la información de los distintos modelos, se recurre a la utilización de **conjuntos de modelos** (o *ensembles* por su nombre en inglés). Los conjuntos de modelos son medias ponderadas de las predicciones de varios modelos, donde los pesos de ponderación miden la pericia de cada modelo representando las variables de interés (normalmente a través de la inversa de la varianza del error que comenten en la predicción), otorgando mayor peso a aquellos modelos que mejor representan las variables a utilizar (aquellos que presentan una menor varianza). De hecho, estos conjuntos de modelos pueden prescindir de la inclusión de algunos modelos cuando su pericia es lo suficientemente baja.

Es importante señalar aquí que la promediación de modelos, la construcción de conjuntos (o *ensembles*) debería posponerse hasta el último de los modelos de la cadena. Por ejemplo, si se quisiera evaluar el cambio probable que pudiera sufrir la descarga fluvial en una sección, se podrían utilizar diversas combinaciones de GCM y RCM para generar las proyecciones de clima en periodos horizonte futuros. Estas proyecciones se utilizarían para alimentar el modelo hidrológico y generar distintas proyecciones de descarga fluvial. Únicamente sobre esta variable de interés, la descarga fluvial, es sobre la que se habría de realizar la promediación. Si se realizase la promediación sobre las variables atmosféricas, para ejecutar únicamente una vez el modelo hidrológico, se estaría obteniendo una proyección a futuro sesgada, que no representaría el cambio medio y por tanto, no se estaría trabajando con el mejor conjunto de datos posibles para la toma de decisiones.

■ 4.1.3.6 Evaluación de impactos

La evaluación de impactos del cambio climático se basa en la utilización de los mismos modelos de impactos que se utilizan para estudiar el periodo actual (o pasado reciente), pero alimentados con series actualizadas a las condiciones futuras. La evaluación de impactos puede realizarse bien transformando las entradas de varios modelos y promediando las proyecciones de los modelos de impactos, bien transformando únicamente un *ensemble*. La primera de las opciones permite evaluar la incertidumbre asociada a la variabilidad entre modelos a expensas de un costo computacional mayor, ya que, en lugar de transformar una única serie, se transforman tantas como modelos se quiera considerar. La segunda puede suponer una sobre-simplificación que provea una respuesta sesgada en el mejor de los casos, y por tanto ha de evitarse este proceder salvo en casos en que quede muy justificado por las propiedades matemáticas de los modelos utilizados.

Es importante reiterar que las series de entrada a los modelos de impacto deben haber sido generadas mediante técnicas de corrección de sesgo y de reducción de escala que hayan transformado las series para representar las propiedades de las series puntuales y no de las agregadas que se obtiene directamente de los GCM y de los RCM.

De hecho, una práctica habitual es no considerar directamente los valores del modelo de impacto como tales, sino tan solo utilizarlos para cuantificar los cambios en el impacto. Es decir, se alimenta el modelo de impacto con las series climáticas actuales para determinar un estimador del impacto actual, y con las series climáticas futuras para determinar un estimador del impacto futuro. Se calcula la diferencia o cambio entre ambos, bien como un cambio absoluto bien como relativo, y dicha diferencia se aplica a los valores observados del impacto. Es decir, que el modelo de impacto se utiliza para evaluar los cambios, pero se toman como valores de base los observados, y se actualizan con el cambio predicho por el modelo de impacto.

Para exponer esta situación puede considerarse como ejemplo el análisis de riesgos de un proyecto hidroeléctrico existente bajo escenarios de cambio climático. Como se ha comentado anteriormente, el primer paso será calibrar un modelo hidrológico que explique la hidrología de los últimos años de manera acertada. Si este modelo predice con suficiente calidad las series de caudales medidas en el pasado, podemos alimentarlo con las variables climáticas que se espera que acontecerán en el futuro para generar escenarios climáticos. Los impactos calculados bajo estos escenarios pueden compararse con los proyectados para el periodo histórico, y de esta manera evaluar el incremento o decremento que podrían sufrir los impactos debido al cambio climático. Este cambio se aplicaría posteriormente a la serie de observaciones de los impactos, y no a los impactos modelados, para generar la estimación de los impactos en la situación futura.

4.2 Análisis climático

El presente apartado desarrolla con mayor precisión los **métodos necesarios** para desarrollar un análisis climático de las variables implicadas en la evaluación del riesgo asociados a diversos proyectos de infraestructura. El primer paso, por tanto, será identificar las variables necesarias para caracterizar las amenazas climáticas que alimentan los modelos de impactos y otras etapas de la cadena de análisis del riesgo. Las variables que analizar, así como el nivel de detalle del análisis, dependerán de las características concretas del proyecto objeto de estudio, de la ubicación de este y de los recursos disponibles para el desarrollo del estudio.

A modo de ejemplo se presenta una evaluación preliminar de las posibles variables necesarias para el estudio de los 6 sectores en lo que se focaliza esta guía:

- Proyectos de generación de energía eólica: velocidad promedio del viento en agregaciones temporales breves (horarias o diez-minutales, donde sea posible; diarias las más de las veces), velocidad de la racha máxima a distintas agregaciones temporales, temperatura del aire (que condiciona la densidad de este), dirección del viento, tasa de cambio y variabilidad de esta última, etc.
- Proyectos de generación de energía fotovoltaica: radiación incidente, temperatura del aire, velocidad del viento, etc.
- Proyecto de aprovechamientos hidráulicos: precipitación, evapotranspiración, temperatura y otros datos requeridos por los modelos hidrológicos. El listado completo dependerá del modelo hidrológico escogido y serán necesarios para toda la cuenca aportante, no únicamente para la zona de desarrollo del proyecto considerado. También resultan fundamentales los datos de aforos fluviales (descarga fluvial) pero estos no son objeto del tratamiento climático que se describe a continuación, sino que constituyen una parte esencial de la correcta definición y calibración del modelo hidrológico. Cabe destacar que, para los proyectos con un embalse significativo, el trabajar con una mayor resolución temporal (p.ej. diaria) no aporta generalmente grandes ventajas. En cambio, en el caso de centrales de filo de agua (sin embalse) alcanzar una mayor resolución temporal puede ser de mucho interés.
- Proyectos de adaptación en ciudades: temperaturas, para el caso de riesgo frente a olas de calor; y precipitación, temperaturas y caudales para la evaluación del riesgo por inundaciones terrestres.
- Proyectos de dotación de agua: precipitación, evapotranspiración, temperatura y otros datos requeridos por los modelos hidrológicos. El listado completo dependerá del modelo hidrológico escogido y serán necesarios para toda la cuenca aportante, no únicamente para la zona de desarrollo del proyecto considerado. También resultan fundamentales los datos de aforos fluviales (descarga fluvial) pero estos no son objeto del tratamiento climático que se describe a continuación, sino que constituyen una parte esencial de la correcta definición y calibración del modelo hidrológico. Cabe destacar que, para los proyectos con un embalse significativo, el trabajar con una mayor resolución temporal (p.ej. diaria) no aporta generalmente grandes ventajas. En cambio, en el caso de centrales de filo de agua (sin embalse) alcanzar una mayor resolución temporal puede ser de mucho interés.
- Proyectos de adaptación vial: temperaturas y precipitación para calcular tanto los valores de desgaste adicional de los elementos de la vía como el posible impacto de eventos extremos como por ejemplo la inundación.

Es conveniente insistir en considerar la lista anterior tan solo un ejemplo genérico y que los riesgos considerados en el análisis, así como los modelos de impacto que permiten determinarlos, serán los que definan tanto las variables a analizar cómo las características de las mismas (principalmente su nivel de agregación espacio-temporal). Por ejemplo, en el caso de ciudades costeras, existen riesgos adicionales por subida del nivel del mar que implican el conocimiento de proyecciones sobre esta variable.

4.2.1 Clima actual

La evaluación del clima actual para el análisis de riesgos puede llevarse a cabo a distintos niveles de detalle dependiendo del nivel de aproximación que se estime más oportuno en el análisis.

El caso ideal requiere la recolección de observaciones climáticas de todas las variables de interés, principalmente información pluviométrica, termométrica y anemométrica, para capturar adecuadamente la precipitación, la temperatura y el viento. Las observaciones de estas variables suelen poder ser obtenidas de las instituciones nacionales responsables de los servicios estatales de meteorología correspondientes, aunque otras instituciones, como por ejemplo las demarcaciones de cuenca o las concesionarias de la infraestructura, también pueden disponer de observaciones en la zona de estudio. Existen también bases de datos globales, como las mantenidas por la Organización Nacional del Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos de América (NOAA (38) por sus siglas en inglés) que proporciona también información climática en estaciones de todo el mundo.

La información de las estaciones de medida puede haber pasado controles de calidad, algo habitual en los servicios meteorológicos nacionales, pero como regla de buena práctica suele ser adecuado representar la información en mapas y analizar las gráficas de las series para asegurar que no existan inconsistencias en los datos. El proceso de control de calidad también debe servir para caracterizar la cantidad de huecos existentes en las series. Si existiese un

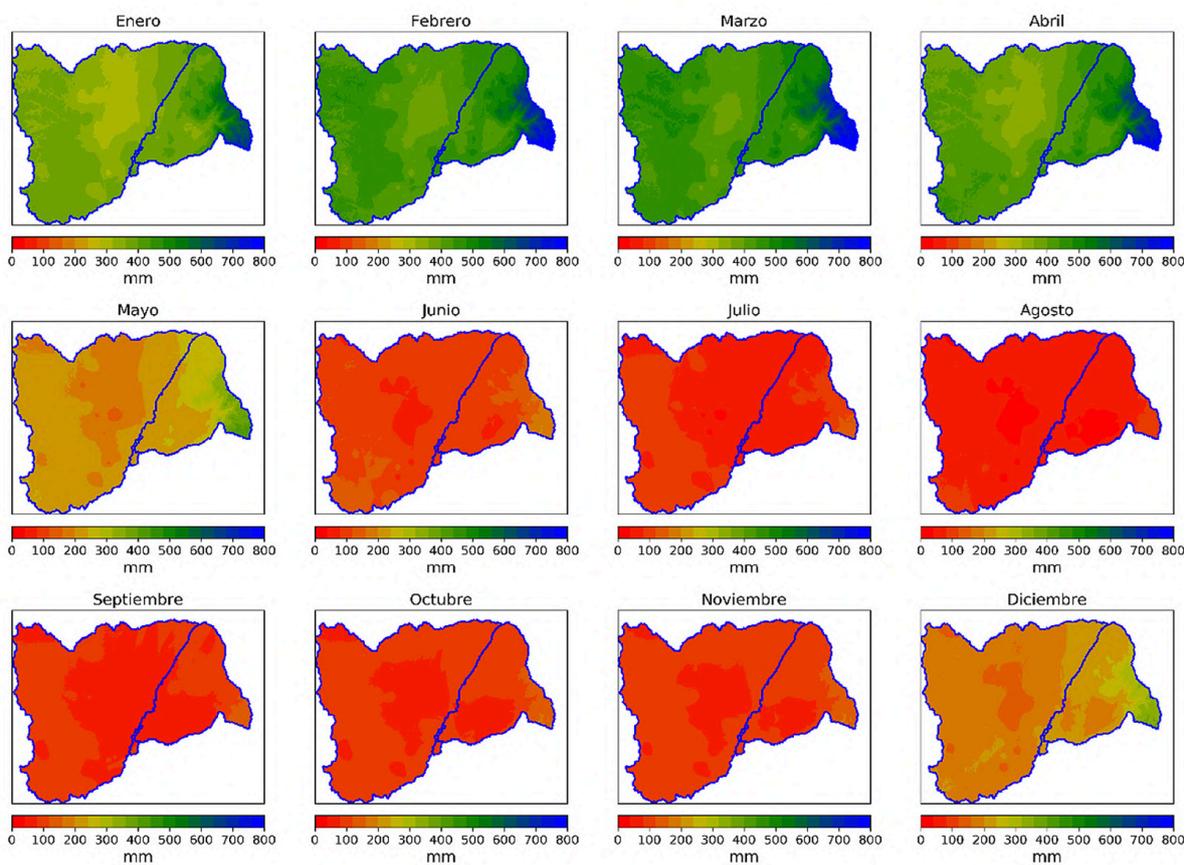
número elevado de huecos, sería necesario proceder a completar las series mediante técnicas de regresión, distancias inversas y de Kriging (ver Figura 26). El objetivo final es contar con una información puntual que cubra toda el área de estudio con la mejor cobertura temporal posible.

Cada variable y cada punto puede presentar un comportamiento distinto, así que las técnicas óptimas de interpolación pueden cambiar entre puntos y entre variables. La forma óptima de proceder es evaluar, mediante validación cruzada, la calidad de cada método y quedarse con el mejor.

La calidad de las series y de los modelos de interpolación puede analizarse mediante análisis de correlación y regresión, y mediante técnicas de validación cruzada. Los primeros nos sirven para determinar el nivel de relación entre la información en distintos periodos y distintas localizaciones. Es esperable que las series temporales tengan máximos de correlación temporal en cortos periodos de tiempo y luego a escala anual, que captura la estacionalidad. De forma similar, es esperable que las correlaciones espaciales sean máximas entre puntos cercanos y disminuyan con la distancia. Este análisis descriptivo de los datos es directo y sencillo de realizar y proporciona una información básica para decidir el modelo óptimo a utilizar.

La validación cruzada consiste en apartar, y no utilizar durante el proceso de interpolación, algunos de los puntos de datos existentes, para luego evaluar la calidad de la interpolación en esos puntos. Estas técnicas permiten evaluar la calidad de la interpolación en aquellos puntos para los que no existe medida.

➤ **Figura 26:** Reconstrucción espacial mediante técnicas de Kriging de la precipitación mensual en una cuenca andina



➤ **Fuente:** Elaboración propia.

En aquellos casos en que la información en estaciones no tenga la cobertura espacial o temporal, o la calidad suficiente, podría ser necesario combinar la información disponible en estaciones con información de observaciones indirectas, bien de satélite (como por ejemplo TRMM o GPM (39)) o radar. Estas medidas no son puntuales y al ser indirectas presentan normalmente una incertidumbre mayor, pero pueden utilizarse para complementar las medidas directas y mejorar la estimación de algunos estadísticos de las variables climáticas a utilizar.

Es importante destacar que no existe un umbral por encima o por debajo del cual un error sea o no admisible. Es necesario evaluar los errores obtenidos y la significancia y representatividad de las relaciones de regresión establecidas en base a los objetivos del estudio y la información disponible. En última instancia será el modelador quién en base a su criterio de experto tenga que motivar y justificar sus elecciones, ayudándose de cuantas gráficas y estadísticas sean necesarias para demostrar su caso.

Otra posibilidad es la utilización de información de modelos de reanálisis, modelos climáticos que incorporan información de observaciones en continuo, lo que se conoce como asimilación de variables, para asegurar que en todo momento proporcionan valores representativos de las variables de interés. Es decir, una base de datos de reanálisis es una base de datos en que se ha utilizado un modelo climático para interpolar la información de observaciones que se le ha proporcionado al modelo; se utiliza el propio modelo, en lugar de alguna técnica estadística, para interpolar espacial y temporalmente las variables de interés. La base de datos de CFSR (40) in January 2010. The CFSR was designed and executed as a global, high-resolution coupled atmosphere–ocean–land surface–sea ice system to provide the best estimate of the state of these coupled domains over this period. The current CFSR will be extended as an operational, real-time product into the future. New features of the CFSR include 1 es un claro ejemplo de este tipo de datos. Los modelos de reanálisis tienen la ventaja de proporcionar valores de todas las variables climáticas normalmente utilizadas en el análisis de impactos con resoluciones espaciales y temporales adecuadas, con lo que permiten construir modelos de regresión bastante complejos para completar la información en estaciones.

Este tratamiento de las series queda justificado cuando van a ser directamente utilizadas en la caracterización de los impactos climáticos y, por tanto, en estudios que requieran un nivel de detalle elevado y que utilicen modelos de impacto que puedan beneficiarse de información temporal. Esto no siempre es posible, puesto que algunos modelos de impacto no se basan directamente en ecuaciones basadas en la física sino en relaciones empíricas que tan solo hacen uso de algunos estadísticos de la situación climática, caso en el cuál, el tratamiento de la información climática podría simplificarse.

De hecho, un segundo nivel de análisis correspondería a la caracterización del clima mediante algunos estadísticos relevantes de las variables de interés. Así pues, podría ser suficiente con caracterizar la precipitación o temperatura medias, el valor asociado a un determinado percentil de la velocidad del viento, o el valor asociado a un determinado periodo de retorno para la duración de los periodos secos. En estos casos, las series originales sin rellenar puede resultar suficientes para su caracterización, simplificando su tratamiento estadístico.

Existen también bases de datos a nivel global que proporcionan información climática, bien basadas en observaciones bien basadas en modelos de reanálisis. Habitualmente estas bases de datos han de ser tratadas para la eliminación de sesgos, pero permiten el cómputo de estadísticos del clima de forma sencilla. Algunos ejemplos de este tipo de base de datos podrían ser:

- Merra-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application) (41).
- ERA5 (ECMWF Re-Analysis) (42).
- CFSR (Climate Forecasting System Reanalysis) (43).
- NCEP/NCAR Reanalysis 1 (40, 44) in January 2010. The CFSR was designed and executed as a global, high-resolution coupled atmosphere–ocean–land surface–sea ice system to provide the best estimate of the state of these coupled domains over this period. The current CFSR will be extended as an operation-al, real-time product into the future. New features of the CFSR include 1.

4.2.2 Clima futuro

La evaluación del clima futuro tiene por objetivo actualizar los valores utilizados para el clima actual, bien las series temporales, bien los estadísticos, a su valor más representativo para el escenario y el periodo horizonte que se esté considerando. Esta actualización se realiza comparando los valores predichos por diversos modelos climáticos (GCM o RCM) para el periodo futuro y para el actual tal y cómo se comentó en una sección anterior.

Existen diversas fuentes de información sobre modelos climáticos entre las que podemos destacar:

- El Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project* o CMIP en inglés). Desarrollado el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, coordina los trabajos realizados por diferentes equipos especializados en la simulación del clima global con modelos GCM. Cuenta con diferentes fases, entre las que cabe destacar:
 - CMIP5 (45): el objetivo principal de CMIP5 era responder a las cuestiones científicas más complejas surgidas durante la confección del quinto informe de evaluación del IPCC (46). Actualmente de este proyecto parten las estimaciones de cambio de clima futuro empleadas en la gran mayoría de análisis de impacto del cambio climático, pero se ha de tener presente que estamos ante modelos globales de baja resolución. Sus datos son accesibles a través de *Earth System Grid Federation* (ESGF)(47) y otras fuentes.
 - CMIP6 (48): implica a 33 grupos de investigación de 16 países y tiene el objetivo primario de aportar información para la redacción del sexto informe del IPCC (cuyos informes de los grupos de trabajo estarán listos en 2021 y su informe de síntesis se terminaría en 2022).
- CORDEX (49). A diferencia de los dos anteriores, CORDEX supone un proyecto de intercomparación de escenarios regionalizados, que parte de la información anterior y mediante el uso de modelos climáticos dinámicos, ejecutados sobre rejillas de detalle, permite reducir la escala de los resultados y mejorar las dinámicas modeladas, proporcionando así una información de mejor calidad y detalle que los datos de los proyectos CMIP.

- Base de datos NASA-NEX-GDDP (NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*) base de datos de servicios climáticos de la NASA (50) . Esta base de datos proporciona información climática mediante reducción de escala estadística, también con una resolución mejorada respecto a los modelos de circulación general.
- Copernicus Climate Data Store (51). El proyecto Copernicus es un proyecto europeo que recoge distintas iniciativas de modelado e información climática, así como datos de observaciones remotas de satélite. En concreto el *Climate Data Store* contiene información climática de distintos modelos, con distintos objetivos, distintas resoluciones e inicializaciones. Persigue la creación de un portal europeo de información climática, que sistematice la información disponible en otras bases de datos y simplifique el acceso a este tipo de información.

Todas estas bases de datos proporcionan acceso a la información de los modelos utilizados para la evaluación de cambio climático por el IPCC (52) y por lo tanto constituyen la fuente esencial de información a partir de la que plantear la evaluación de riesgos climáticos ligados al cambio climático.

Las Terceras Comunicaciones Nacionales (53) de los distintos países también proporcionan información relevante para la caracterización del cambio climático. De hecho, estos estudios proporcionan información a la escala necesaria para la aplicación en modelos de impacto y con las correcciones necesarias para trabajar sobre cada región en concreto. Debido a que están desarrolladas por y para cada país, pueden no ser consistentes entre ellas y, por tanto, requerir de modificaciones posteriores cuando se trabaja en proyectos plurinacionales o en zonas fronterizas.

► **Tabla 4:** Ejemplos de proyecciones climáticas desarrolladas por diferentes países

País / fuente	Técnicas empleadas	Resolución / características	Horizontes temporales/ GCM/ RCP	Comentarios
Argentina: <i>Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático – Capítulo 3: Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones(54).</i>	Validación de los modelos con mejor desempeño y corrección de sesgo.	Se ha estudiado modelos GCM (con una resolución aproximada de 1 o 2 grados de latitud y longitud) y combinaciones de modelos GCM y RCM (con resolución de 0,44 – 2,20 grados).	Periodo base (1981-2005), futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075- 2099) GCM: CCSM4, CMCC-CM, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6, GFDL-ESM2G, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, INMCM4, IPSL-CM5A-MR, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, NorESM1-M Combinaciones RCM/GCM: ETA/HADCM3, LMDZ/ECHAM5, LMDZ/IPSL, MM5/HADCM3, PROMES/HADCM3,RCA/ECHAM5 1, RCA/ECHAM5 2,RCA/ECHAM5 3, RegCM3/ECHAM5, RegCM3/HADCM3, REMO/ECHAM5 RCP 4.5 y 8.5	El documento aporta mapas, pero se desconoce si es posible acceder a información numérica (p. ej. Resultados tras el proceso de ensamblado y corrección de sesgo).
Bolivia: No se han detectado modelos conforme a escenarios RCP.				En la primera comunicación de cambio climático ¹ se indica que se dispone de una primera aproximación basada en escenarios SRES.
Colombia: <i>“Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100” (55)</i> (Basado en Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia (56)).	Downscaling estadístico	Temperatura: Corrección orográfica con interpolación usando DEM de 30 m. Precipitación: Cobertura de suelos Corine Land Cover resolución espacial: precipitación 0,0487 m.; temperatura: 0,033 m.	2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. 16 GCM (no indica cuales) + ensamble. RCP2.6, 4.5, 6.0, y 8.5.	Estos escenarios han sido elaborados por el mismo equipo consultor que los escenarios de Ecuador. Tecnalia está habituada a tratar los mismos.

¹ <http://unfccc.int/resource/docs/natc/vennc01.pdf>

País / fuente	Técnicas empleadas	Resolución / características	Horizontes temporales/ GCM/ RCP	Comentarios
<p>Ecuador: Escenarios de cambio climático desarrollados en el marco de la <i>Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático</i>.</p> <p>(Aún no disponible públicamente, accesible por solicitud a INAMHI y/o MAE).</p>	<p>Downscaling estadístico</p>	<p>Datos para cada estación de INAMHI.</p>	<p>2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. 5 GCM (CSIRO-Mk3-6-0, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR y MIROC-ESM) + ensamble. RCP2.6, 4.5, 6.0, y 8.5.</p>	<p>Estos datos han sido empleados anteriormente por el equipo consultor, que conoce todas sus características para incorporarlos en el estudio.</p>
	<p>Downscaling dinámico</p>	<p>Datos para una maya de 10*10 km.</p>	<p>2011-2040 y 2041-2070. 5 GCM (CSIRO-Mk3-6-0, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR y MIROC-ESM) + ensamble. RCP4.5 y 8.5.</p>	
<p>Perú: Escenario climático nacional para el año 2050</p> <p>Fuente: <i>El Perú y el Cambio Climático. Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático</i> (Páginas 141 y 142) (57).</p>	<p>Estadística (análogos para precipitación y temperatura, GLM para precipitación, regresión lineal para temperatura).</p>	<p>Para cada estación meteorológica.</p>	<p>Periodo de referencia: 1971-2000. Periodo de análisis: 1981-2010. Proyecciones: 2036-2065 (estacional y anual). CanESM21, CNRMCM52, MPI-ESMMR3. RCP 4.5 y 8.5.</p>	<p>Según indica la Tercera Comunicación de Cambio Climático, se dispone también de diferentes escenarios para áreas concretas del país. Algunos de ellos se basan en escenarios SRES, pero se dispone de datos generados con el RCP8.5 hasta el año 2044 en las regiones de Áncash, Huancavelica, Huánuco, Ica, Moquegua, Puno, San Martín, Tacna y Ucayali, así como hasta el año 2045 en las cuencas de los ríos Ica y Pisco².</p>
<p>Venezuela: No detectada información hasta el momento.</p>				<p>Se ha consultada la primera comunicación de cambio climático(58) sin detectar información relevante. Es posible que en posteriores comunicaciones sí que se encuentre información de este tipo.</p>

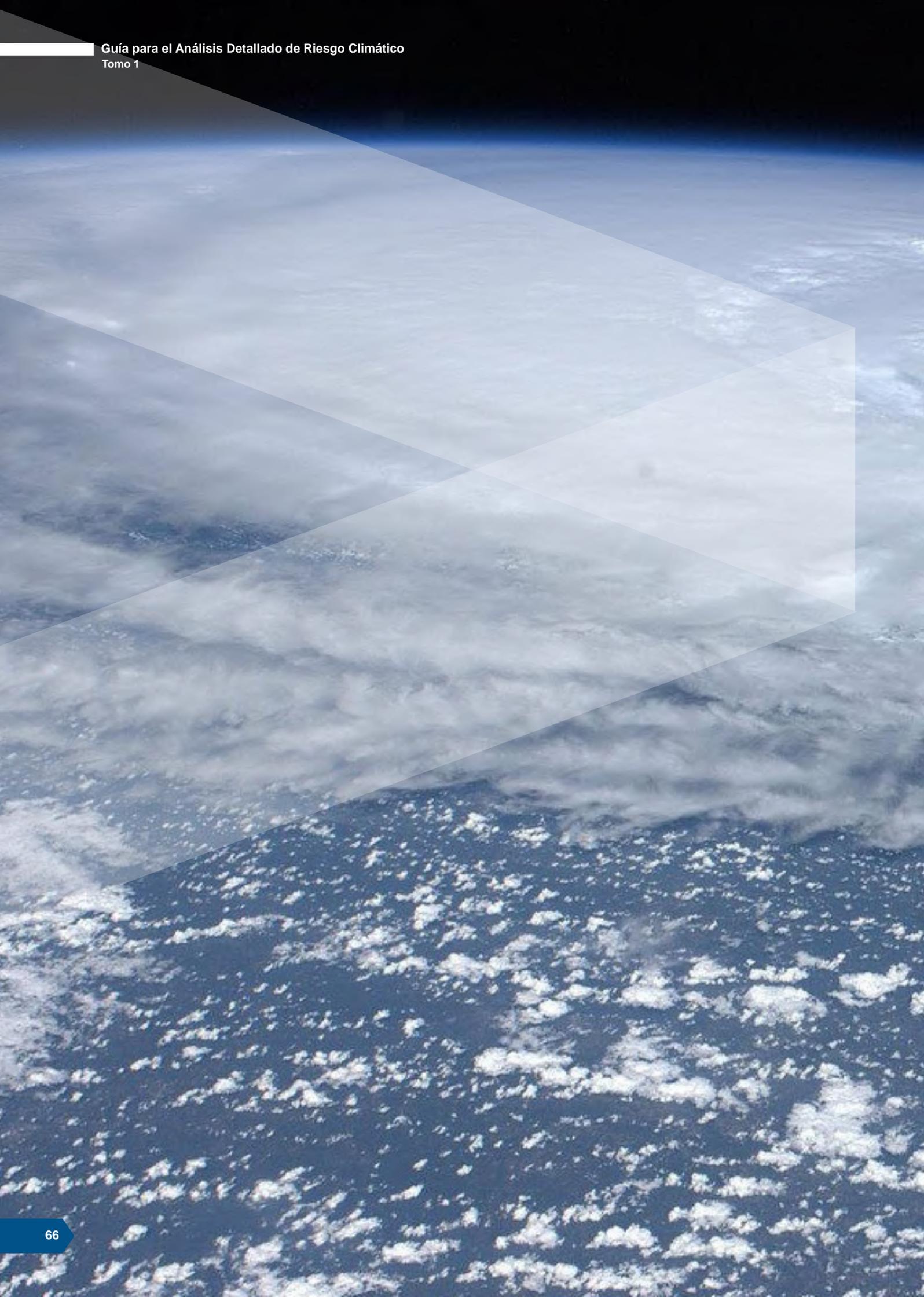
Nota: el contenido de esta tabla no es una revisión exhaustiva de toda la información disponible. Solo busca presentar algunos ejemplos del tipo de información disponible. En todo caso, es recomendable consultar a los ministerios responsable de la política climática acerca de la disponibilidad de proyecciones climáticas, ya que, como refleja la tabla, las proyecciones climáticas se van viendo actualizadas, y no siempre se encuentran publicadas.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

² Esta información solo es relevante si se desarrollan los casos de estudio en las regiones y cuencas específicas.

Es importante destacar aquí tres aspectos importantes de la evaluación del clima futuro para el análisis de impactos y riesgos:

- La primera es recordar que los modelos climáticos presentan sesgos, errores sistemáticos, que hacen que sus predicciones no sean equivalentes a observaciones y que, por tanto, no pueden utilizarse directamente para informar los modelos de impacto. El uso de información sesgada, debido a la naturaleza no lineal de muchos modelos de impacto, puede resultar en estimaciones del impacto muy alejadas de la realidad, con el correspondiente perjuicio que esto podría causar sobre la infraestructura y la población a largo plazo.
- Otro punto importante a considerar es el hecho de que las predicciones de los modelos climáticos son agregaciones en el espacio y el tiempo, y por tanto presentan la variable de forma suavizada. Es por ello por lo que, para la caracterización del cambio en los extremos, es necesario realizar análisis de sensibilidad e intentar ligar estos a la variación de ciertos valores medios mediante modelos de regresión. La lluvia puntual siempre puede llegar a ser más intensa que la agregada sobre un área, y por tanto el análisis de estos cambios en los extremos exige un análisis detallado de los mismos.
- Por último, es importante destacar que la forma de evaluar correctamente el valor e incertidumbre de los efectos del cambio climático en los modelos de impacto es propagar las predicciones de varios modelos climáticos a través del modelo de impacto para realizar la agregación sobre las predicciones de impacto y no sobre las predicciones de los modelos climáticos. Este punto es muy importante, ya que, en casos como la precipitación, un promedio de los valores predichos por varios modelos da lugar a series donde llueve más a menudo que en la realidad, pero con intensidades mucho menores, lo que no es exactamente equivalente a la misma precipitación media distribuida en menos días de lluvia, ya que esto incrementaría las intensidades de precipitación.



5 > Evaluación de vulnerabilidad y riesgo por disciplinas transversales

5.1 Energía	68
5.2 Hidrología	70
5.3 Inundaciones	71
5.4 Socioeconómico	72
5.5 Ecológico	73



Como se ha comentado en el apartado anterior, el análisis de riesgo climático de los proyectos requiere de la consideración del sistema en el que se encuadran. Para abordar el análisis de estos sistemas, existen aspectos y metodologías comunes a diversos sectores. Por ejemplo, en la mayoría de los proyectos vinculados al aprovechamiento de recursos hídricos, el análisis de las cuencas en las que se encuadra el proyecto viene a ser una de las metodologías y herramientas necesarias para evaluar el riesgo climático.

El objetivo de este apartado es tratar aquellos aspectos que son comunes a varios de los sectores del estudio, detallando en el apartado 6 los aspectos más específicos de cada sector.

5.1 Energía

A la hora de evaluar el riesgo climático de la infraestructura energética, existen aspectos metodológicos que tienen un carácter transversal, pudiendo ser aplicados a varios de los sectores del estudio. En concreto, la secuencia de pasos a dar en los estudios y el indicador que finalmente nos dará idea del impacto del cambio climático son aspectos que serán comunes a cualquier proyecto de infraestructura energética. Igualmente, la infraestructura energética generalmente opera integrada en un sistema que es también conveniente analizar en un contexto de cambio climático.

5.1.1 Consideración dinámica del sistema eléctrico

Si bien existen proyectos de generación eléctrica destinados a cubrir las demandas de zonas aisladas, la gran mayoría de estos proyectos suelen integrarse en las redes de transporte y distribución de energía nacionales. La rentabilidad de los proyectos renovables conectados a redes se verá influenciada por los cambios en los recursos disponibles (agua, viento, sol, etc.) que originará el cambio climático, pero también se verán en gran medida influenciadas por la evolución de las condiciones de operación que les imponga el sistema y el precio al que les retribuya la energía que aporten al mismo en el futuro. Dado que el sistema energético está en una profunda transformación en la mayoría de la región latinoamericana, obviar estas tendencias podría conducir a un análisis de riesgos inexacto.

Los proyectos renovables que son el objeto de esta guía, generalmente, constituyen la base del sistema y, por tanto, en la mayoría de los países, tienen condiciones especiales a la hora de operar (prioridad en el despacho, etc.), así como precios de retribución específicos.

Los proyectos eólicos, fotovoltaicos o hidroeléctricos de pasada, no pueden almacenar la energía que no acepte el sistema, por lo que generalmente siempre cuentan con prioridad para verter su energía a la red, y en su concepción y análisis de riesgos, la mayoría de las ocasiones es posible considerar que aportarán al sistema toda la energía que puedan. Solamente en algunos casos de países en los que existen planes de expansión de la generación renovable muy ambiciosos, sería preciso revisar este planteamiento y confirmar si la demanda siempre se situará por encima de la generación renovable.

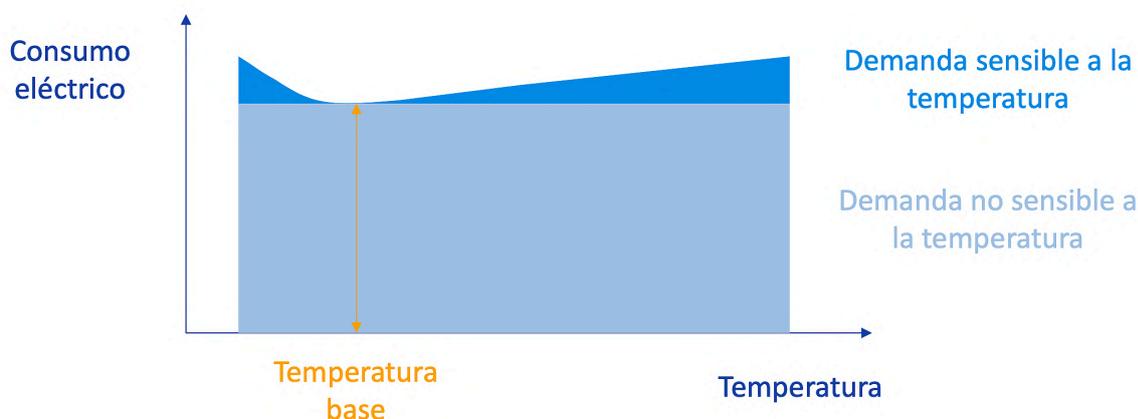
En el caso de las centrales hidroeléctricas con embalse la situación es algo más compleja. En estas centrales el almacenamiento del agua es equivalente a un almacenamiento de energía y busca ser optimizado por el operador del sistema para reducir el costo global de generación de energía eléctrica. Los embalses situados en diferentes regiones climáticas tienen en ocasiones papeles complementarios durante diferentes épocas del año, como es el caso de algunos países, que han apostado por promover proyectos en diferentes vertientes de la cordillera de los Andes para tener una producción significativa de energía de origen hidroeléctrico durante todo el año. En este caso, sí que puede ser especialmente interesante evaluar como el papel de los proyectos puede verse alterado en un contexto climático diferente, y, por ejemplo, puede ser muy interesante analizar los previsible cambios en la estacionalidad.

En cualquier proyecto, si el costo de retribución no es fijo y se esperan cambios sustanciales en el mismo (por entrada en funcionamiento de nuevos proyectos renovables, mayores interconexiones que modifiquen el mercado eléctrico, diferentes relaciones oferta-demanda, etc.) se ha de considerar la evolución prevista. Algunos estudios en los que se analiza el impacto de diferentes aspectos sobre la rentabilidad de los proyectos hidroeléctricos, incluyendo el cambio climático (59), han arrojado como conclusión que el precio de venta de la energía es uno de los parámetros con un mayor impacto.

El análisis del sistema y la evolución de aquellos parámetros del mismo que impactan en el proyecto puede abordarse con técnicas más o menos complejas. Algunos estudios abordan este análisis empleando modelos de simulación del sistema energético (60). El establecimiento de escenarios plausibles para aquellos parámetros más importantes (p.ej. precio de venta de la energía) puede ser suficiente en la gran mayoría de ocasiones. En casos en los que se espere un cambio radical de las condiciones de operación puede ser preciso abordar simulaciones y análisis más complejos, pero estos requieren de conocimientos específicos, técnicas y modelos muy concretos y un elevado volumen de información. Se ha de tener presente que muchos países de la región latinoamericana cuentan con planes de expansión del sistema energético publicados que pueden aportar datos útiles en este sentido (previsiones de evolución de costo marginal, demanda del sistema, entrada en funcionamiento de nuevos proyectos, etc.).

El cambio climático no afectará exclusivamente a la generación de energía eléctrica, sino que puede tener impacto también sobre la demanda, pudiendo alterar sensiblemente el casamiento entre oferta y demanda y, por tanto, la retribución de la actividad de generación. Este efecto se puede observar en la Figura 27 a modo de ejemplo teórico.

➤ **Figura 27:** Relación teórica entre consumo de electricidad y temperatura



➤ **Fuente:** adaptado de "Impact of climate change on electricity systems and markets – A review of models and forecasts" (61).

5.1.2 Indicador para evaluar el riesgo frente al cambio climático sobre un sistema energético

Una de las consecuencias a analizar de la materialización del cambio climático sobre el proyecto se observará sobre su rendimiento financiero. De cara a facilitar la comparativa de los costos de los diferentes tipos de generación, es una práctica común en el sector energético el empleo del llamado **Levelized Costs of Energy (LCOE) o costo normalizado de la energía**. Se trata de una métrica económica que proporciona el costo por unidad de producción de energía (USD/MWh) que tiene en cuenta costos de capital, combustible, carbono y otros y factores en la disponibilidad de recursos.

Se calcula dividiendo el costo anualizado de generación por la producción anual de manera que un aumento en los recursos eólicos con un mantenimiento del costo total daría lugar a una disminución del costo por unidad de energía.

La fórmula que se emplea en la evaluación del LCOE (USD/MWh) es la siguiente (62):

$$LCOE = \frac{(Capex \times FCR) + Opex}{Producción\ anual}$$

Donde FCR (*Fixed Charge Rate*) es la tasa de carga fija anual, que convierte la suma global de la inversión en un pago anual a partir de la tasa de descuento (r) y la vida útil económica del proyecto (t , años):

$$FCR = \frac{r \times (1 + r)^t}{(1 + r)^t - 1}$$

Es, por tanto, un indicador muy apropiado para medir la evaluación del impacto del cambio climático sobre el proyecto. Para la estimación de los diferentes componentes del LCOE, se seguirán las metodologías expuestas para cada sector de ámbito energético (solar, eólica e hidroenergía). En cada caso, se describen muy brevemente las principales amenazas que se consideran en dicho análisis y se indican los pasos a dar para llevarlo a cabo. De forma general, para la evaluación del impacto del cambio climático en el LCOE de un proyecto energético se deben contemplar los siguientes pasos:

- Evaluación del recurso actual y futuro en los escenarios manejados.
- Cálculo de la energía generada.
- Análisis de la evolución de los eventos extremos que puedan tener impacto sobre la infraestructura.
- Cálculo de la evolución del LCOE.

En todo caso, como para cualquier otra inversión o proyecto, en el caso de los proyectos energéticos contemplados en esta guía (eólicos, fotovoltaicos, etc.) es también posible emplear los indicadores clásicos para analizar la rentabilidad de los proyectos: valor presente neto, periodo de retorno de la inversión, etc.

5.2 Hidrología

La hidrología se encarga del estudio de los distintos flujos de agua que componen el ciclo hidrológico y por ello media entre las dinámicas atmosféricas y muchas dinámicas terrestres ligadas al agua. El análisis hidrológico se lleva a cabo mediante modelos numéricos y es una de las disciplinas que está presente en el análisis de impactos de inundación, sequía y aquellos debidos a la variación del régimen de caudal o producción de sedimento.

El modelado hidrológico permite transformar las dinámicas climáticas atmosféricas en flujos hidrológicos. A partir de estos es posible cuantificar los impactos del cambio climático. El modelado hidrológico necesita información del territorio (usos del suelo, tipos de suelo, cobertura vegetal) así como observaciones de algunos flujos hidrológicos (principalmente caudales) para la calibración de los modelos. Un modelo calibrado reproduce las dinámicas y flujos observados, y permite además extrapolar el comportamiento del sistema a situaciones no observadas futuras.

La capacidad de extrapolación del modelo está sin embargo limitada por los cambios en los procesos capturados durante el proceso de calibración. De esta manera, si se calibra un modelo sencillo de transferencia de lluvia a escorrentía, el modelo funcionará siempre y cuando se enfrente a condiciones de cobertura vegetal, usos del suelo y evapotranspiración similares a aquellas bajo las cuales fue calibrado, que aseguren que el proceso capturado durante la calibración se reproduce de forma similar en la evolución posterior del sistema analizado. Si un modelo que como este simplifica muchas dinámicas a unos pocos coeficientes quisiera usarse para evaluar situaciones con cambios más allá de las dinámicas de precipitación, probablemente no se obtendrían estimaciones adecuadas.

Debido a toda la información que utilizan sobre el territorio, los modelos hidrológicos son capaces de capturar cambios de origen no climático como pueden ser transiciones de ecosistemas de unas coberturas vegetales a otras, procesos de urbanización y de deforestación que cambian los usos del suelo, e incluso desarrollos de otra índole, como la construcción de presas, que pueden alterar el régimen hidrológico natural.

Si bien para la caracterización del clima hidrológico actual se pueden utilizar una amplia variedad de modelos, a la hora de hacer evaluaciones de las dinámicas hidrológicas en el futuro es necesario contar con modelos que sean capaces de representar todos los procesos hidrológicos relevantes. Especialmente adecuados son además aquellos que tienen una base física detrás. Los cambios en las dinámicas climáticas afectan de manera no lineal a las dinámicas hidrológicas y es por ello por lo que los cambios en la precipitación pueden ser muy diferentes de los cambios que inducen en el caudal. El principal motivo para que esto ocurra se encuentra en los procesos que rigen la humedad del suelo.

La humedad del suelo en un momento dado es el resultado del balance entre entradas de agua al suelo y extracciones de agua de este. La humedad del suelo representa el contenido de agua líquida en el suelo, pero también el espacio disponible para rellenar con agua antes de que se alcance la saturación. Controla, por tanto, la participación de la precipitación entre infiltración y generación de escorrentía. Los cambios en la temperatura de la atmósfera afectan, entre otros, a los procesos de evapotranspiración, que extraen agua del suelo reduciendo la humedad de este. El hecho de que los aumentos de temperatura provoquen disminuciones de la humedad del suelo, de que aumentos de la precipitación provoquen incrementos en la humedad del suelo y de que el suelo tenga una capacidad máxima de almacenamiento que funciona como un umbral, hacen que los efectos de los cambios atmosféricos sobre los flujos hidrológicos sean complejos y no lineales, haciendo necesario el uso de modelos capaces de representar todos estos procesos para su correcta cuantificación.

La caracterización de dinámicas hidrológicas para análisis de riesgos ligados al cambio climático requiere por tanto la utilización de modelos con base física que sean capaces de capturar las dinámicas de la humedad del suelo y que representen adecuadamente los procesos de evapotranspiración. Es deseable, además, que puedan acomodar los cambios en los usos del suelo y en la cobertura vegetal, ya que pueden provocar modificaciones importantes de los flujos más relevantes aún bajo un clima estacionario. Estos modelos se calibran para reproducir adecuadamente las dinámicas en el periodo histórico, y se alimentan posteriormente con las dinámicas climáticas, y las características del territorio, actualizadas al escenario y periodo histórico considerado. El modelo hidrológico sirve por tanto de modelo a escala de la realidad en la que desarrollar los experimentos necesarios para la evaluación de efectos.

La no linealidad y complejidad de las dinámicas hidrológicas hace que una correcta caracterización de los impactos sobre la hidrología requiera la realización de múltiples simulaciones utilizando la información de distintos modelos para cada horizonte y escenario considerado. Esto aumenta el costo computacional, pero permite evaluar adecuadamente las incertidumbres en las proyecciones y por tanto considerar todo el posible rango de variación en la estimación de impactos y riesgos.

5.3 Inundaciones

Las inundaciones se producen cuando grandes cantidades de agua se acumulan en zonas del territorio, provocando la aparición de cuerpos de agua sobre lo que es habitualmente terreno seco, que pueden provocar diversos impactos, bien sea por la profundidad que desarrollan, bien sea por la velocidad a la que circula el agua. Las tres causas más importantes de la inundación son las lluvias cortas e intensas, las crecidas fluviales (que están provocadas también por la precipitación) y los temporales marinos (que pueden combinar efectos de marea de tormenta y de oleaje para introducir grandes cantidades de agua en las franjas costeras).

Estas tres causas pueden darse de forma independiente o conjunta y, dependiendo de la zona de análisis, habrán de considerarse las distintas combinaciones que puedan dar lugar a la inundación. Lo que tienen en común, en cualquier caso, es que una correcta caracterización de las dinámicas de inundación requiere de simulaciones hidráulicas para una correcta definición de profundidades de inundación y velocidades del agua que, en última instancia, son los dos principales impactos que se derivan de la inundación.

Las simulaciones hidráulicas se alimentan de la información de flujos hidrológicos, caudales de escorrentía y descarga fluvial, de la precipitación o de la información de dinámicas costeras como la marea meteorológica y el oleaje. Normalmente requieren información detallada del mapa de elevaciones del terreno, así como de los materiales que lo constituyen y que condicionan las pérdidas de energía a través de las fuerzas de fricción.

La mayor parte de los modelos utilizados para la caracterización de inundaciones son bidimensionales, asumiendo una distribución homogénea de las propiedades en vertical, aunque pueden encontrarse también modelos unidimensionales, para los casos más sencillos de inundación fluvial, y modelos tridimensionales, en aquellos casos en la configuración geométrica fuerce un comportamiento altamente no regular del agua.

El modelado hidráulico requiere de cierta calibración, de forma similar al hidrológico, pero en general las ecuaciones del movimiento de los fluidos están mejor definidas, al igual que los coeficientes que las alimentan, principalmente los de rozamiento, y por tanto requieren menos observaciones de las variables de interés para funcionar adecuadamente y proveer de predicciones precisas. En cualquier caso, observaciones in situ de niveles del agua bajo distintas condiciones pueden ayudar a afinar las predicciones del modelo.

De la misma forma que los modelos hidrológicos, los modelos hidráulicos propagan la información recibida de los primeros para predecir las profundidades y velocidades del agua. Cuando se utilizan para hacer proyecciones bajo escenarios de cambio climático para algún periodo horizonte, el modelo se alimenta con las proyecciones hidrológicas generadas a partir de un determinado modelo climático. Como ya se ha dicho, estas proyecciones hidrológicas han de generarse utilizando la información de diversos modelos climáticos, dando lugar a una serie de proyecciones hidrológicas, y cada una de estas ha de ser transformada a su vez por el modelo hidráulico para definir también la incertidumbre en las predicciones de los modelos hidráulicos.

De la misma forma que comentábamos para los modelos hidrológicos, promediar las proyecciones hidrológicas para construir una única a partir de la cual generar las predicciones hidráulicas tan solo puede resultar útil en el caso concreto en que se quiera trabajar con estadísticos, y siempre y cuando las dinámicas sean lo suficientemente suaves como que los efectos no lineales no incrementen el error del cálculo más allá de lo aceptable, lo cual no puede asegurarse a priori. Por normal general, por tanto, habrán de propagarse todas proyecciones hidrológicas a través del modelo hidráulico para generar las proyecciones hidráulicas que permitan analizar los valores de las variables de interés, profundidad y velocidad del agua, así como la variabilidad o incertidumbre que de los modelos climáticos se deriva.

Será de especial relevancia para el análisis de la inundación que se realicen simulaciones para determinar los efectos de las posibles medidas de mitigación propuestas, puesto que los análisis coste-beneficio y coste-eficiencia requerirán una evaluación detallada de los efectos sobre la inundación de las medidas. De nuevo, esta evaluación deberá llevarse a cabo utilizando varias predicciones climáticas (de varios modelos) para asegurar que capturamos el efecto de las actuaciones también sobre la incertidumbre

5.4 Socioeconómico

Los proyectos de infraestructura generalmente tienen el cometido de prestar un servicio muy concreto a la sociedad. Por ello, junto a la consideración de escenarios climáticos, suele ser igualmente importante considerar aspectos socioeconómicos que van a influir en la evolución y rendimiento del proyecto (número de personas que tendrán que ser atendidas por un sistema de suministro de agua potable, número de vehículos que transitarán por las carreteras en el futuro, etc.).

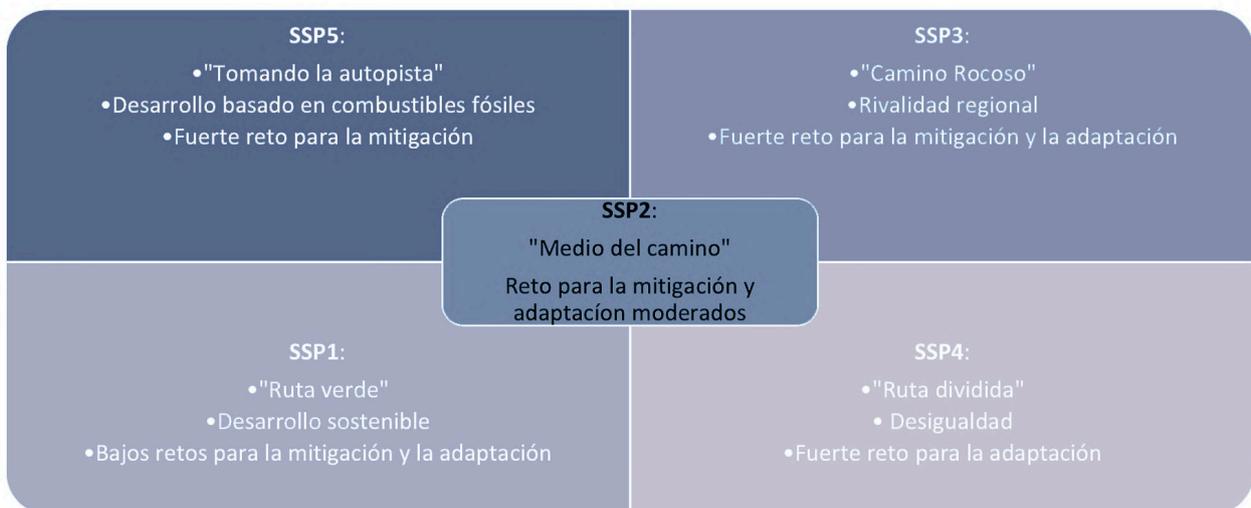
La ingeniería y planificación de los proyectos cuenta con técnicas específicas a cada caso para elaborar las proyecciones y escenarios concretos que determinan el diseño de los proyectos, pero al evaluar los mismos en un contexto de cambio climático es interesante tener en consideración algunos aspectos concretos.

La generación de escenarios socioeconómicos y el estudio del cambio climático son dos disciplinas que vienen relacionándose muy estrechamente desde hace años, ya que realmente el devenir climático del planeta depende de las pautas de desarrollo que siga la humanidad. Las simulaciones climáticas se basan en diferentes rutas de desarrollo que han ido evolucionando en sus planteamientos.

Actualmente, los modelos climáticos existentes y que aportan las proyecciones climáticas más avanzadas son los que se han desarrollado en el marco del proyecto de intercomparación CMIP5 (45). Estos modelos han sido generados considerando las rutas socioeconómicas compartidas o SSP (63). Estas rutas describen los principales desarrollos mundiales plausibles para las próximas décadas. Los SSP se basan en cinco narrativas que describen desarrollos socio-económicos alternativos, incluyendo el desarrollo sostenible, la rivalidad regional, la desigualdad, el desarrollo impulsado por los combustibles fósiles y el desarrollo (64).

Existen diferentes rutas propuestas en función de los retos que supondría cada una de ella para la adaptación y la mitigación. La ruta SSP2 se denomina "centro del camino", ya que refleja desafíos moderados tanto para la mitigación como para la adaptación y pretende representar un futuro en el que las tendencias de desarrollo no son extremas en ninguna de las dimensiones, sino más bien siguen caminos intermedios en relación con el abanico de resultados plausibles.

➤ **Figura 28:** Resumen de las Rutas Socioeconómicas Compartidas o Shared Socioeconomic Pathways (SSP) y el reto que suponen desde la perspectiva de la mitigación y la adaptación



➤ **Fuente:** adaptado de "The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century" (64).

La ruta SSP2 asume que el mundo sigue un camino en el que las tendencias sociales, económicas y tecnológicas no difieren marcadamente de los patrones históricos. El crecimiento poblacional global es moderado, las desigualdades en la renta persisten o se reducen ligeramente y los desafíos para reducir la vulnerabilidad ante los cambios sociales y ambientales se mantiene.

En contraste, la ruta SSP1, supone un desarrollo socioeconómico sostenible, en el que una sociedad igualitaria, cooperativa y con grandes inversiones en fuentes de energía renovables haría relativamente poco complejo hacer frente a los retos de la mitigación y la adaptación.

La ruta SSP3 es totalmente opuesta, ya que asume un mundo con mucha rivalidad entre las naciones y escasa evolución tecnológica, con un desarrollo socioeconómico marcadamente desigual, centrado en el desarrollo interno de los países frente al desarrollo a nivel regional y global. La principal fuente de energía sería los combustibles fósiles. Todo ello haría complejo alcanzar objetivos ambiciosos en mitigación y adaptación.

La base de datos de los SSP aporta proyecciones sociales y económicas a nivel nacional y/o regional (65) que pueden ser empleadas para realizar un análisis prospectivo en la evaluación del cambio climático.

A la hora de analizar el riesgo climático de proyectos concretos es interesante considerar una coherencia entre los escenarios climáticos y los escenarios socioeconómicos considerados. Por ejemplo, no parece muy probable que la senda de emisiones RCP2.6 (es decir reducción de las emisiones globales en las próximas décadas y alteración moderada del sistema climático) sea compatible con un desarrollo socioeconómico global en base a las pautas consideradas en la SSP5, que asume un fuerte crecimiento económico sin innovación tecnológica basado en combustibles fósiles.

El marco de planteamiento de escenarios socioeconómicos que se expone más arriba es relativamente complejo para el análisis de proyectos individuales. Al margen de que se emplee esta fuente de datos o cualquier otra, es interesante que, junto con los escenarios climáticos, se consideren escenarios plausibles sobre la evolución de las principales variables socioeconómicas que rijan la evolución del proyecto: precio de venta de la energía y demanda para los proyectos de renovables; crecimiento de la población y del tráfico para los de carreteras; incremento del valor de la infraestructura y crecimiento urbano para los de protección frente a inundaciones, etc.

5.5 Ecológico

Como se indica más adelante, algunas infraestructuras se ven afectadas por el comportamiento de los ecosistemas con los que se relacionan. Algunos ejemplos de esta situación serían los proyectos vinculados a los recursos hídricos (aprovechamientos hidroeléctricos, captación de agua para consumo, etc.), en los que el comportamiento hidrológico de la cuenca puede verse profundamente alterado si los usos del suelo se ven modificados. Igualmente, las inundaciones pueden verse favorecidas en caso de que los ecosistemas se degraden y se produzca una tendencia hacia usos del suelo con mayores coeficientes de escorrentía.

El clima es un factor determinante para los ecosistemas y el cambio climático puede afectar a los mismos de muy diversas formas. Con carácter general, el calentamiento puede obligar a las especies a migrar a latitudes más altas o a mayores elevaciones donde las temperaturas serán más propicias para su desarrollo. Otra tendencia general que cabe esperar asociada al cambio climático es la subida del nivel del mar, que no solo afecta a la costa, sino que también puede tener otras repercusiones menos obvias (p.ej. a medida que aumenta el nivel del mar, la intrusión de agua salada en un sistema de agua dulce puede obligar a algunas especies clave a reubicarse o morir).

La técnica de desplazamiento de nicho ecológico considerando escenarios de cambio climático se encuentra plenamente consolidada y existen múltiples estudios que han empleado la misma para analizar el previsible impacto del cambio climático en la distribución de especies y ecosistemas (66,67) *range size loss, or distribution shifts has emerged as a potentially useful tool for informing resource management decisions. Making climate change niche modeling useful to conservation decisions requires centering studies on the types of decisions that are made regarding the focal taxa of a niche model study. Recent recommendations for climate adaptation strategies suggest four types of decision makers: policy, habitat protection, habitat management, species management. Targeting research to questions relevant for management decisions will increase utility of a niche model study. Constraints to the accuracy and precision of niche models to project potential future distributions are well-recognized. How to incorporate these uncertainties into management decision-making remains a challenge. Refining estimates and making sound management recommendations is critical because species that are generally modeled to be the most vulnerable to climate change (i.e., narrow endemics. Esta técnica solo nos puede ayudar a predecir si las ubicaciones actuales serán adecuadas para especies de interés (p.ej. si una especie será adecuada para una reforestación (68), o si un proyecto orientado a explotar un determinado cultivo será compatible con el clima futuro (69)) sino que también nos puede ayudar a predecir si patógenos, vectores o especies invasoras afectarán a nuestro sistema en el futuro.*

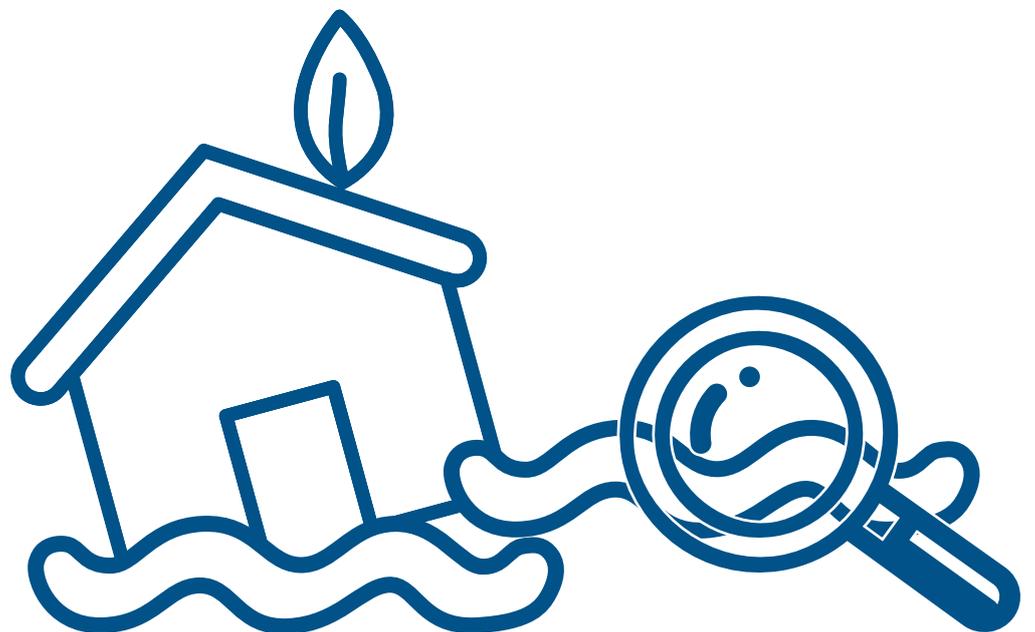
El cambio climático no solo afecta directamente a los ecosistemas y las especies, sino que también interactúa con otros factores de origen humano, que con un impacto acumulativo pueden generar cambios ecológicos dramáticos (por ejemplo, el cambio climático puede exacerbar el estrés que el hombre genera en las frágiles zonas costeras o la combinación de incendios de origen humano y fuertes lluvias puede generar una pérdida sustancial del suelo).

Todo esto hace que el análisis de los efectos ecológicos del cambio climático sea un aspecto ciertamente complejo de valorar y que requerirá en la mayoría de las ocasiones de conocimientos y técnicas específicas que generalmente superarán el ámbito de desarrollo de los proyectos de inversión. No obstante, no por ello deja de ser interesante en aquellos proyectos cuya operación se encuentre más vinculada a los servicios ecosistémicos, analizar, aunque sea con técnicas cualitativas, las tendencias ecológicas más probables que pueden afectar al conjunto del sistema a largo plazo.



6 > Evaluación de vulnerabilidad y riesgo por sectores

6.1 Energía solar fotovoltaica	77
6.2 Energía eólica	89
6.3 Hidroenergía	104
6.4 Dotación de agua	127
6.5 Vial	143
6.6 Áreas urbanas	160

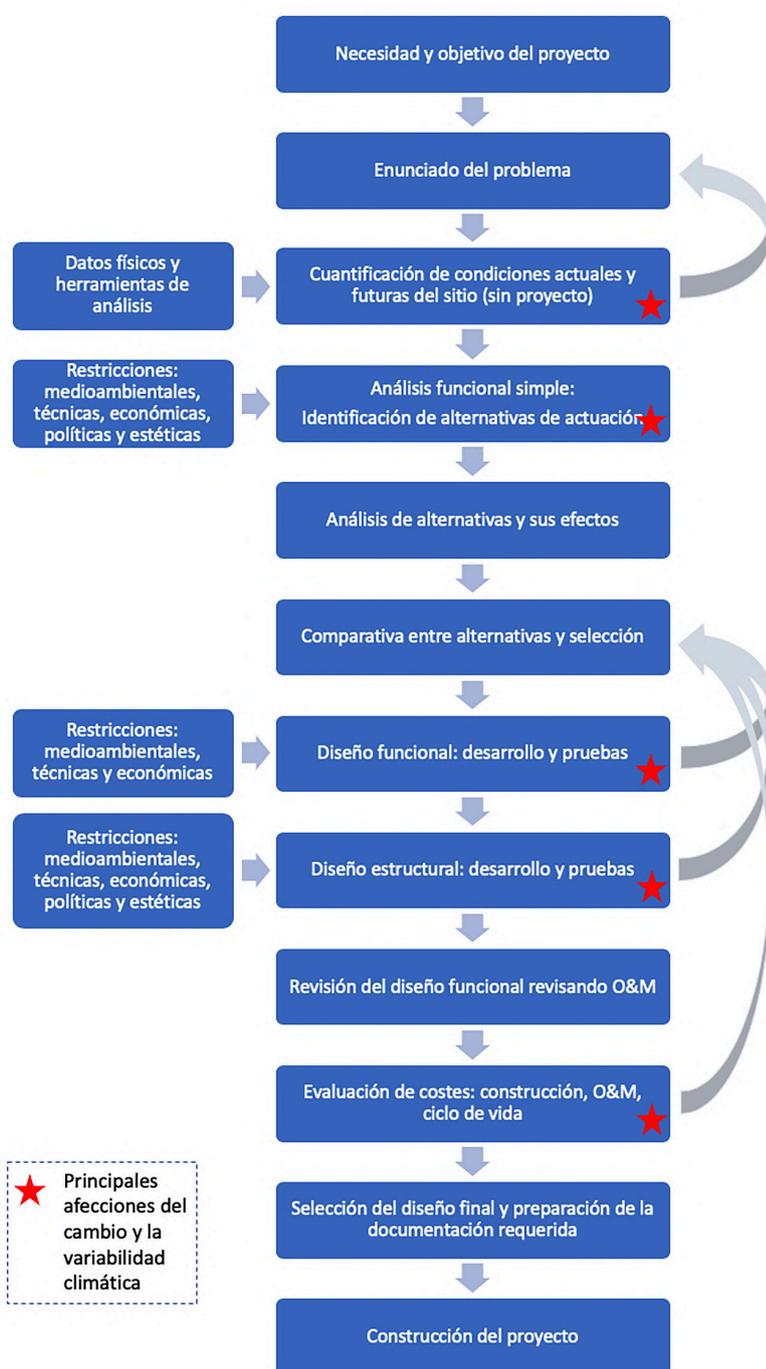


En este capítulo se exponen las metodologías propuestas para el análisis del riesgo asociado al clima de proyectos de inversión en infraestructura de seis sectores específicos, así como para la consideración en estas tipologías de proyectos de los impactos potenciales (tanto positivos como negativos) del cambio climático.

Para cada sector se analizan los diferentes aspectos que determinan su exposición, vulnerabilidad climática, etc., exponiendo la metodología para evaluar el efecto de las amenazas climáticas en el proyecto o sistema objeto de estudio.

Desde su concepción inicial hasta su materialización, los proyectos de infraestructura superan diferentes etapas de planificación y diseño en las que van ganando concreción. En un primer momento se suele realizar un análisis genérico de sus funciones principales, que a través de sucesivos trabajos terminará materializándose en un proyecto concreto en el que se definan las características detalladas de cada uno de sus componentes y que guiará la construcción y entrada en operación de la infraestructura. El diagrama incluido a continuación muestra una secuencia de pasos genérica para el diseño de un proyecto de infraestructura que sería aplicable a los proyectos de los 6 sectores analizados. En el mismo se destacan aquellas etapas del proceso en las que la incorporación de consideraciones de cambio y variabilidad climática es generalmente más valiosa, aunque esto dependerá en gran medida de las características concretas de cada proyecto.

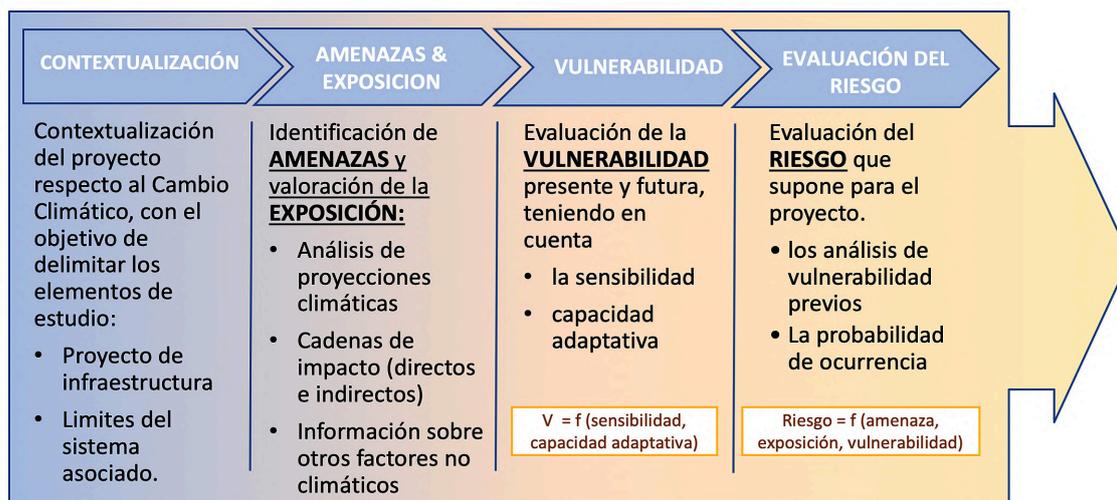
➤ **Figura 29:** Flujo de diseño general de un proyecto e incorporación de consideraciones de cambio y variabilidad climática



Independientemente de la etapa en la que se encuentre el proyecto, a continuación, se incluyen las pautas para evaluar el riesgo climático en cada uno de los sectores analizados, aunque lógicamente las mismas deberán ser adaptadas a la etapa en la que nos encontremos (p.ej. en el momento de abordar las características concretas de un equipo de la infraestructura que se verá escasamente influenciado por la variabilidad climática no sería recomendable hacer un análisis detallado de la misma, mientras que si estamos abordando la ubicación de una infraestructura cuya operación se va a ver regida por las condiciones climáticas puede ser muy interesante apostar por una caracterización climática lo más precisa posible).

Al margen de estas consideraciones y ajustes a la fase de diseño en la que se encuentre el proyecto y sus características concretas, la metodología general contemplada incluye las siguientes etapas.

Figura 30: Metodología general para la evaluación de vulnerabilidad y riesgo



Fuente: Elaboración propia.

La metodología concreta propuesta en cada sector es un reflejo del muy diferente grado de implantación de la consideración del cambio climático en los diferentes sectores. En algunos de ellos como es el caso del hidroeléctrico, en el momento de redactar esta guía, ya existen directrices por parte de organismos internacionales para considerar este fenómeno, siendo posible recurrir a dichas recomendaciones. En cambio, en otros sectores se apreciará que la práctica común es considerar una visión estacionaria del clima, y por ello, las referencias existentes son de ámbito científico principalmente.

6.1 Energía solar fotovoltaica

En los últimos años, la energía fotovoltaica ha sufrido una reducción significativa de sus costos de instalación, convirtiéndose en una alternativa viable tanto para instalaciones aisladas como conectadas a la red eléctrica (70). Como la mayoría de las fuentes renovables, el clima que exista en la ubicación concreta del proyecto a lo largo de su vida útil incidirá determinadamente en la rentabilidad y atractivo de estos proyectos, por lo que a continuación se propone una metodología de análisis ajustada a los mismos.

Los pasos fundamentales a seguir se resumen en:

- Contextualización del proyecto.
- Evaluación del recurso solar y su evolución, así como de las variables climáticas que tienen impacto en el rendimiento de la instalación.
- Análisis de la evolución de los eventos extremos a largo plazo (viento extremo, granizo).
- Cálculo de la energía generada.
- Análisis del impacto de los eventos extremos sobre la infraestructura.
- Cálculo de LCOE (u otros indicadores) para evaluar la rentabilidad o atractivo del proyecto en las condiciones analizadas.

6.1.1 Paso 1. Contextualización del proyecto respecto al CC

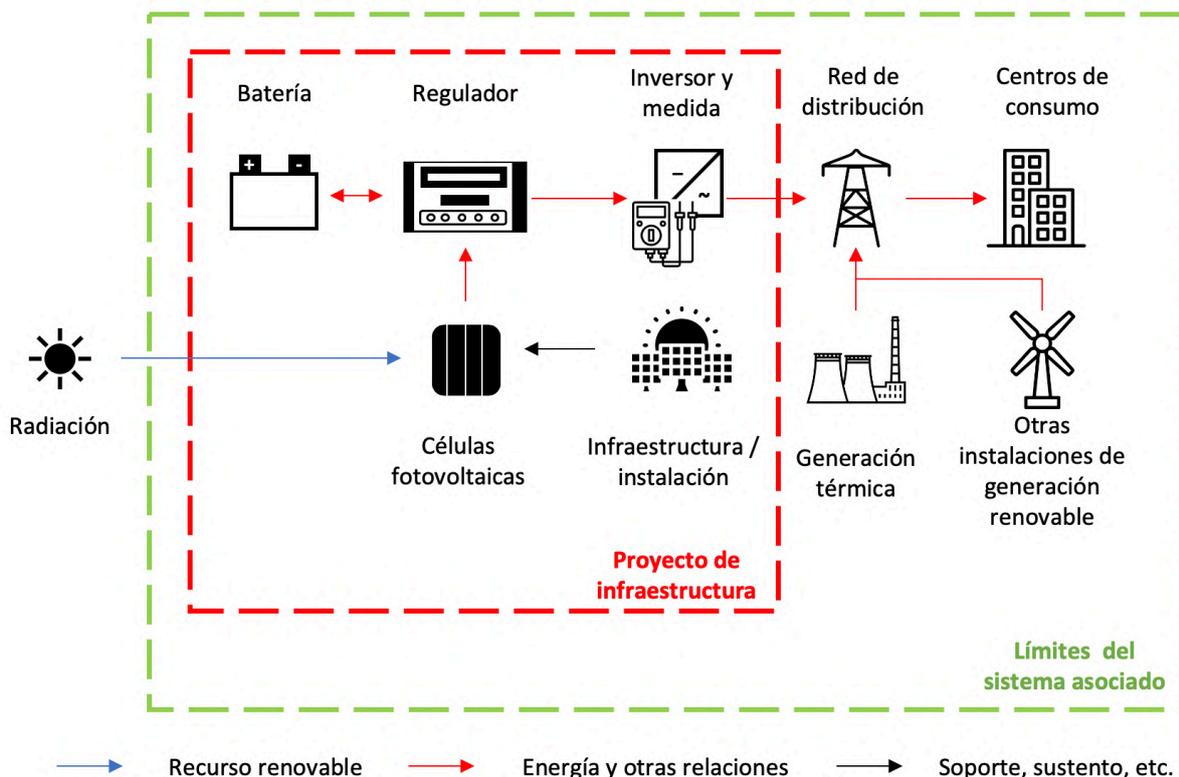
Como se verá en todos los sectores, la definición del sistema objeto de estudio, estableciendo sus límites e interrelaciones es una de las primeras etapas para abordar el análisis del riesgo climático de este tipo de proyectos, tal y como se muestra en la Figura 31.

Las instalaciones fotovoltaicas se relacionan muy directamente con el clima, más concretamente con la radiación que incide en las mismas. Se diferencian en este sentido de muchos de los sectores que se estudiarán más adelante, en los que para evaluar una ubicación concreta es preciso analizar qué ocurre “aguas arriba” de la infraestructura estudiada, en zonas más o menos amplias. En este caso, **el análisis de riesgos climáticos puede tener un ámbito territorial sumamente local y restringido al área en el que se considere factible instalar las instalaciones.**

No obstante, para las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red nacional de transporte y distribución eléctrica **puede ser muy interesante considerar dentro de los límites de nuestro sistema la evolución global del sistema energético.** En la gran mayoría de ocasiones, las instalaciones fotovoltaicas entregarán toda la energía posible al mismo para satisfacer su demanda, pero el precio al que se retribuya la misma puede variar sustancialmente si el sistema evoluciona en uno u otro sentido.

Sin embargo, como se indicará en todos los sectores, es necesario adaptar este esquema genérico a las características concretas del proyecto objeto de estudio. Existen proyectos fotovoltaicos aislados de las redes eléctricas nacionales, especialmente en zonas en las que el despliegue de estas redes es complejo. Este sería el caso, por ejemplo, de una instalación que aporta energía directamente a una vivienda, granja, fábrica etc. sobre la que se ubica y que no está conectada a la red. En estos casos, se podría excluir del sistema estudiado la red de distribución, y otras instalaciones de generación. No obstante, empiezan a existir “miniredes” fotovoltaicas o instalaciones fotovoltaicas que operan en complemento con otras fuentes locales de generación, por lo que incluso en instalaciones aisladas puede haber pequeñas redes u otras fuentes de energía a considerar.

Figura 31: Contexto de evaluación de un proyecto solar fotovoltaico: propuesta de límites del sistema objeto de estudio

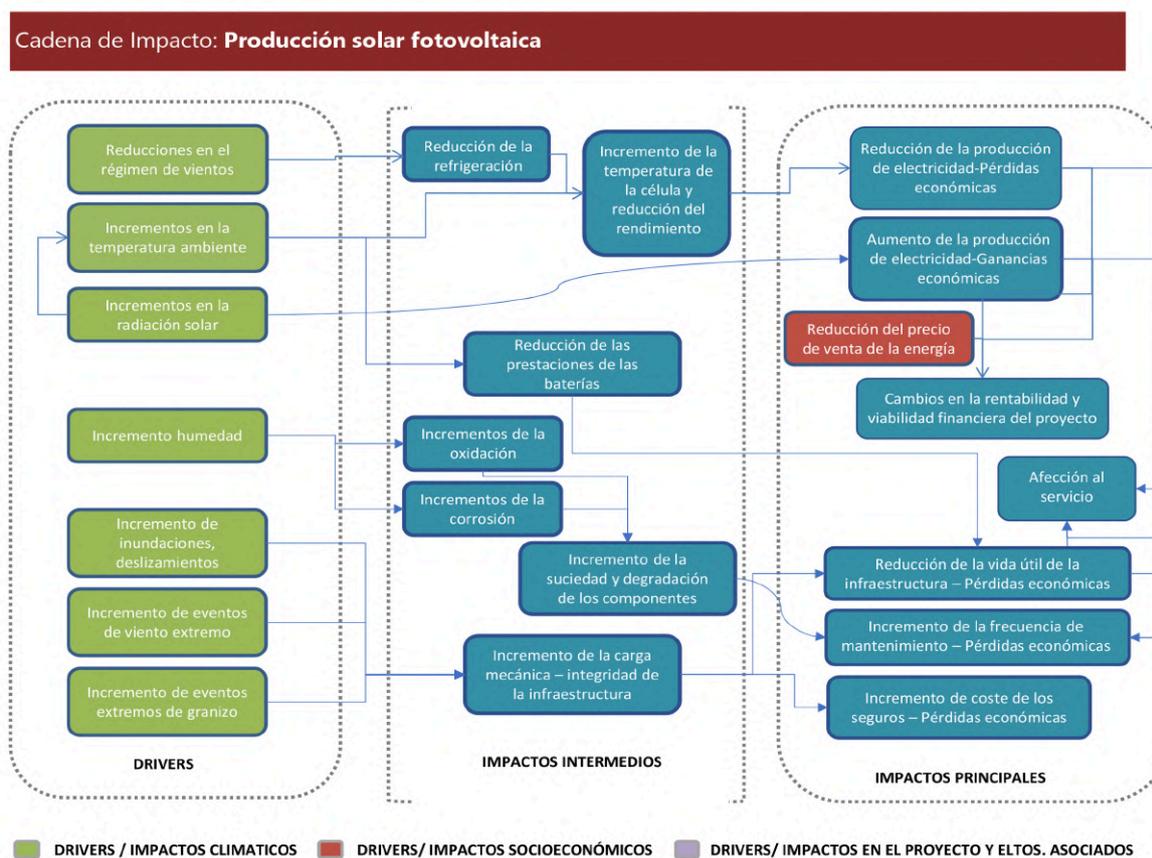


Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Paso 2. Identificación de amenazas y valoración de la exposición

Para la identificación de las amenazas y la valoración de la exposición del proyecto a las mismas, es interesante que, tras definir los límites del sistema estudiado y sus componentes, se genere una cadena de impacto para cada una de las amenazas que se consideren de interés para el proyecto. A continuación, la Figura 32 sintetiza las cadenas de impacto que se propone estudiar para un proyecto solar fotovoltaico tipo.

➤ **Figura 32:** Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos de energía fotovoltaica



Nota 1: Dependiendo de la ubicación del proyecto es posible que los drivers tengan el sentido inverso al indicado, en cuyo caso, el sentido de los impactos también se verá invertidos (los aspectos que se indica que se ven incrementados podrían disminuir y los que se apunta que se verían reducidos se verían aumentados).

Nota 2: Se muestran en verde los aspectos climáticos, en rojo otros aspectos que pueden tener un efecto significativo en el proyecto y en azul los impactos intermedios y principales.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Tal y como se observa, los principales impactos del cambio climático en este tipo de proyecto podrían agrupar en:

- Impacto sobre la producción de energía.**
- Impacto sobre el CAPEX (vida útil de la infraestructura).**
- Impacto sobre el OPEX (operación y mantenimiento).**
- Impacto sobre los ingresos/retribución del proyecto.**
- Otros impactos.**

Para cada uno de ellos, a continuación, se describen las amenazas o “*drivers*” que pueden originarlos:

a) Impacto del cambio climático sobre la producción de energía

El potencial de generación de una instalación fotovoltaica depende principalmente de la cantidad de recurso (radiación solar), pero también de otros factores (internos y externos) que pueden tener influencia sobre la eficiencia de las células tales como las características físicas de la instalación, su antigüedad, la temperatura ambiente, el viento, las sombras, la polución y las pérdidas eléctricas.

En relación con el cambio climático, son la radiación, temperatura ambiente y viento las variables que podrían verse alteradas de manera apreciable y que podrían ser evaluadas a futuro:

- Incrementos en la **radiación solar** implican incrementos proporcionales en la producción energética de la instalación.
- La **temperatura ambiente** sigue el patrón inverso, de manera que un aumento en este parámetro implicaría una disminución en el rendimiento y, por tanto, en la producción energética de la instalación y el servicio proporcionado.
- Respecto al **viento**, se trata de un factor “refrigerante” para las células fotovoltaicas, resultado que incrementos de viento (dentro de unos límites) serían beneficiosos para el sistema.
- El incremento de la **humedad relativa** de la atmósfera puede tener alguna ventaja relativamente poco importante, pero implica muchos inconvenientes. Las células solares que operan a altas temperaturas y con humedad relativa de más del 70%, pueden sufrir una reducción significativa en la eficiencia de las células solares. El riesgo más importante es la penetración de humedad en la célula, causada por la corrosión de las uniones metálicas y la necrosis en los polímeros utilizados, generándose un característico color amarillento (71). En ambientes salinos, contaminados, etc. la penetración de humedad en la celda tiene un efecto especialmente dañino.

La evolución seguida a futuro por estas variables será también un factor importante en la selección de la tecnología más adecuada, dado que su comportamiento se ve afectado de diferente manera ante las mismas condiciones de radiación y temperatura (72).

b) Impacto del cambio climático sobre el CAPEX: vida útil de la infraestructura

El CAPEX engloba dos tipos de costos: los relacionados con el equipo físico y que no dependen de donde se ubique (paneles y otros componentes de la instalación, soportes, conexión a la red y otros aspectos técnicos) y los que dependen directamente de la ubicación y de factores ambientales y socioeconómicos (clima, orografía, distancia a la infraestructura esencial, usos y precio del suelo, ...).

El cambio climático puede afectar al valor de los equipos, estructuras, etc. de este tipo de proyectos, pero, con carácter general, la parte más valiosa, como son los paneles solares, está diseñada para resistir los envites del clima, ya que estos no colapsan frente a granizada, lluvias extremas, etc. Igualmente, los sistemas que los sustentan (andamios, soportes, seguidores solares, etc.) se diseñan suficientemente resistentes para soportar vientos extremos (el panel es una “vela” que hay que retener), la carga de una nevada “normal”, etc. Las olas de frío no afectarán a las celdas, pero podrían afectar a las baterías que a veces se integran en este tipo de proyectos. En todo caso, en prácticamente todos los escenarios y ubicaciones cabría esperar una reducción de fenómenos en el futuro, por lo que, si se consideran en la situación actual acertadamente, solo cabe asumir que esta amenaza se vea reducida con el tiempo.

De este modo, el impacto del cambio climático en estos términos, más que en daños catastróficos, se puede observar, principalmente, en la **vida útil de la infraestructura**. Este es un aspecto que no resulta fácil de determinar, ya que su fin suele deberse a un envejecimiento y degradación gradual más que a un evento catastrófico determinado. La velocidad de **degradación** puede depender del tipo de célula solar, la calidad de fabricación, el nivel de producción de energía y el clima local y puede producirse como consecuencia de procesos químicos y materiales asociados con la intemperie, la **oxidación**, la **corrosión** y las **tensiones térmicas**, variables sobre las que el cambio climático también puede tener influencia (especialmente a través de cambios en la temperatura, humedad, etc.). De la misma manera, las cargas mecánicas producidas por **eventos extremos** (como viento extremo, granizo, ...) también afectan a la vida útil de las instalaciones, siendo aconsejable estudiar su evolución para ser capaces de determinar con mayor exactitud los costos de la instalación y necesidades de sustitución de equipos. En este sentido, como en prácticamente cualquier instalación o infraestructura, en ubicaciones puntuales podrían tener impacto:

- Inundaciones pluviales, fluviales, etc.: Son amenazas relativamente poco importantes en este tipo de instalaciones a no ser que se encuentre en una zona especialmente vulnerable, donde podrían generar daños en la infraestructura, especialmente en el equipamiento eléctrico.
- Movimientos del terreno/deslizamientos de laderas: De igual manera, son generalmente poco importantes, pero podría ser una amenaza en ubicaciones concretas. Podría originar pérdidas o disfunción de las instalaciones.

Dada esta complejidad, es habitual considerar valores de CAPEX específicos para una determinada ubicación y mantenerlos constantes a lo largo del tiempo. No se han detectado estudios que hayan considerado estos efectos en el contexto de evolución del clima y hayan cuantificado su efecto sobre la infraestructura de generación fotovoltaica. Sin embargo, el encapsulado de los módulos los protege contra los factores climáticos, la humedad y la oxidación y puede ayudar a soportar las cargas mecánicas producidas por los eventos extremos.

c) Impacto del cambio climático sobre el OPEX: operación y mantenimiento

El OPEX contempla aquellos gastos necesarios para una adecuada operación de la instalación fotovoltaica, tales como seguros, mantenimiento y reparación de equipos (incluido cambio periódico de determinadas piezas o componentes), etc. Para la tecnología fotovoltaica, estos costos suelen ir ligados principalmente a la sustitución de inversores (generalmente cada 10 años), limpiezas ocasionales y reparaciones del sistema eléctrico.

Como ya se ha observado, una mayor frecuencia e intensidad de **eventos extremos** (viento, granizo, etc.), más que originar daños directos puntuales, es más probable que origine una mayor carga mecánica a soportar por la infraestructura y cambios en las necesidades de limpieza, incrementando el OPEX (mayores necesidades de mantenimiento, mayores costos de los seguros, etc.).

Al igual que para el CAPEX, es una práctica común considerar un valor constante del OPEX para la ubicación del proyecto, y que este valor sea independiente de la evolución del clima. Sin embargo, siempre que se disponga de datos, se recomienda valorar los cambios que podrían producirse en este valor a lo largo de la vida útil del proyecto y evaluar si esta aproximación es adecuada.

d) Impacto del cambio climático sobre los ingresos/retribución del proyecto

Tal y como se describe detalladamente en el apartado 5.1, en el caso de los proyectos destinados a aportar energía a una red eléctrica nacional, es conveniente tener presente que generalmente esta fuente de energía tiene esquemas de retribución ventajosos frente a la generación térmica e, incluso, frente a otras renovables. El mantenimiento de esta situación en el futuro es un aspecto que depende en gran medida de la voluntad política y, por tanto, incierto. De hecho, en los últimos años en algunos países se han producido cambios radicales de las políticas de apoyo a las renovables que han condicionado la rentabilidad de proyectos iniciados bajo esquemas de retribución que se consideraban en su día atractivos. Es por ello que, en estos proyectos, puede ser especialmente interesante combinar el análisis del riesgo climático (y los escenarios asociados) con la consideración de riesgos de cambio del esquema retributivo.

Para los proyectos de autoconsumo, microrredes aisladas, etc. este aspecto puede no ser importante, o requerir de consideraciones sumamente específicas que no es posible tener en cuenta en una guía de este tipo. Igualmente, el cambio climático también puede influir en la operativa global del sistema (alterando la demanda, condicionando la generación de las fuentes renovables, etc.) pero los aspectos normativos y retributivos comentados en el inicio de este apartado serán generalmente mucho más determinantes, por lo que generalmente será acertado no considerar estos impactos globales sobre el sistema para este tipo de instalaciones.

e) Otros impactos

Por otro lado, y afectado por varios de los *drivers* descritos, en la parte final de las cadenas de impacto estaría el servicio que el proyecto da a la población o sociedad en su conjunto. Este servicio se podría ver afectado, principalmente, cuando la operación de la infraestructura se vea interrumpida, aunque su calidad también podría verse afectada en caso de pérdidas de producción.

Dependiendo de la importancia del proyecto en el conjunto del sistema, la existencia de fuentes alternativas, etc. este impacto será de diferente importancia para la población atendida por el proyecto.

Como se viene repitiendo en todo el documento, los fenómenos extremos son complejos de estudiar y su vinculación con el cambio climático no está siempre clara. Con carácter general será complejo evaluar si el cambio climático conducirá a un mayor número de interrupciones del servicio (p.ej. por destrucción de la infraestructura por tormentas, fuertes vientos, etc.). Generalmente es más sencillo evaluar si el proyecto operará en unos valores medios que conduzcan a que sea necesario recurrir a otras alternativas energéticas, generen incrementos de precios, etc.

Resumen de *drivers* climáticos y no climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura fotovoltaica

En base a todo lo anteriormente expuesto, la siguiente tabla resume los parámetros mencionados y su impacto potencial sobre el proyecto, resaltando aquellos que pueden suponer un mayor impacto y podrían merecer, por tanto, un análisis detallado.

Tabla 5: Variables que inciden en los proyectos de infraestructura solar fotovoltaica y tipo de impacto

Elementos del proyecto expuestos	Drivers climáticos					Drivers no Climáticos	Impactos intermedios	
	Radiación	Temperatura ambiente	Viento	Humedad relativa	Eventos extremos (viento, granizo,...)	Retribución económica	Inundaciones (pluviales, fluviales,...)	Deslizamiento de laderas
Célula fotovoltaica	Impacto en su T ^a y rendimiento	Impacto en su T ^a y rendimiento	Impacto en su T ^a y rendimiento	Oxidación y corrosión				
Conjunto de la instalación	Impacto directo en su producción			Degradación y rendimiento	Impacto directo en la vida útil de la infraestructura	Rentabilidad y viabilidad del proyecto	Impacto directo en la vida útil de la infraestructura	Impacto directo en la vida útil de la infraestructura
Servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio			Afección al servicio	Afección al servicio

Nota 1: Se destacan en color naranja más oscuro los que se consideran más importantes y generalizados.

Nota 2: En esta tabla se entiende por “infraestructura” el resto de equipos e instalaciones: soportes, equipamiento eléctrico, etc.

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha indicado anteriormente, el previsible cambio de la capacidad corrosiva y oxidativa de la atmósfera es de muy compleja valoración. Es por ello que se propone excluir estas variables de las amenazas a estudiar con carácter general en estos proyectos. Así, en la tabla siguiente se sintetizan las principales amenazas o *drives* climáticos a evaluar y sus efectos/impactos.

Tabla 6: Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura solar fotovoltaica y tipo de impacto

Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/Consecuencia
Radiación solar	Relación directa con la producción fotovoltaica.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto y en el servicio dado.
Temperatura ambiente	Determina el rendimiento de las células fotovoltaicas.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto y en el servicio dado.
Viento	Determina el rendimiento de las células fotovoltaicas (al refrigerar las mismas).	Cambios en el rendimiento económico del proyecto y en el servicio dado.
Eventos extremos (fuertes vientos, granizo, ...)	Determina la carga mecánica a soportar por la infraestructura. Define las necesidades de mantenimiento y operación.	Integridad de la infraestructura – CAPEX – OPEX – rentabilidad del proyecto. Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta dañada.

Fuente: Elaboración propia.

Métodos y herramientas disponibles para hacer el análisis de las amenazas climáticas

En la tabla siguiente se sintetizan los métodos, fuentes de datos, modelos y demás herramientas para valorar las amenazas climáticas identificadas para los proyectos de este tipo.

► **Tabla 7:** Fases para la evaluación de las amenazas climáticas sobre el diseño de un proyecto fotovoltaico

Evaluación del impacto del CC sobre el recurso y eventos extremos (análisis de las proyecciones climáticas)		
1	Información climática histórica sobre temperatura ambiente, radiación y viento.	<p>Se requiere información detallada en el lugar en el que se va a desarrollar el proyecto o, en su defecto, análisis adecuados de la variabilidad inter e intra anual.</p> <p>La información diaria suele ser suficiente para la temperatura y la radiación. Por restricciones de almacenamiento, las grandes bases de datos multimodales públicas solo llegan a archivar, habitualmente, salidas diarias. No obstante, dentro de los datos que se aportan para cada día suele incluirse temperatura máxima diaria, mínima diaria y media diaria.</p> <p>Si no se dispone de información suficiente, se recopilará a través de atlas, bases de datos locales, etc. El objetivo debiera ser conseguir al menos información diaria, considerándose un éxito la recopilación de algunas series horarias que permitan analizar algo más en detalle los procesos de interés.</p>
1a	Proyecciones GCM-RCM.	<p>Se aplicará una metodología para recuperar los datos más actualizados y de mayor resolución temporal y espacial posible de las variables climáticas requeridas de modelos RCM. Resoluciones más finas pueden permitir capturar mejor los efectos locales y extremos. Los modelos RCM se utilizan para reducir los modelos climáticos GCM considerando varios escenarios de emisión o RCP. En general ha de preferirse aquellos modelos que mejor capturen las series históricas observadas, aunque no sean los de mejor resolución espacial y temporal. Más detalle en el apartado 3.</p> <p>Con las series temporales de cada variable se estima el potencial de generación de energía fotovoltaica según se observa en el apartado 4.</p>
1b	Variabilidad: distribución de frecuencias de radiación solar.	<p>Los archivos de datos de los modelos climáticos suponen un volumen de información relativamente grande. De cara a reducir los requisitos de almacenamiento y de procesamiento de datos, se puede trabajar con distribuciones de frecuencias de las variables consideradas.</p> <p>La distribución probabilística de la radiación solar en una determinada ubicación se puede ajustar según una distribución normal (73)</p>
2	Evolución de los eventos extremos a largo plazo.	<p>Los eventos extremos son los más complicados de proyectar y están sujetos a mucha incertidumbre. Se considera que, en este caso, son las condiciones de viento extremo y granizo las que podrían tener un mayor impacto en el proyecto.</p> <p><u>Viento extremo:</u> se considerarían fuertes vendavales (velocidad del viento cerca de la superficie ≥ 75 km/h ó 9 Bft) y ciclones severos. La frecuencia e intensidad de los vientos fuertes y racheados condiciona la seguridad y vida útil de la infraestructura.</p> <p>Como indicadores para la evaluación de este parámetro se podrían considerar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La intensidad de los vientos extremos, que se puede caracterizar a partir de las mediciones de la velocidad del viento realizadas cerca de la superficie (10 m.). En concreto, se pueden analizar los picos de la velocidad promediada en periodos de 1-3 segundos (aún representa un gran reto para la ciencia del clima, aunque se están desarrollando e implementando nuevas parametrizaciones de ráfagas basadas en la física en los RCM), la velocidad media promediada en intervalos de 10 minutos-1 hora o los percentiles (p. ej., 90-98) de los máximos diarios de velocidad. • Las bajas presiones que siempre se asocian con altas intensidades de ciclón. Así, la intensidad los ciclones extratropicales se pueden caracterizar por la profundidad del centro de presiones a nivel del mar o por el mínimo de presión relativa a la altura geopotencial de 1000 hPa. Medidas alternativas de la intensidad de un ciclón son la magnitud de la vorticidad, la intensidad de la precipitación o la velocidad del viento. • La frecuencia de los ciclones (número de ciclones en la localización seleccionada), expresando los cambios en este parámetro respecto a la situación actual como cambios en el período de retorno. <p><u>Granizo:</u> al igual que los fuertes vientos, el granizo condiciona la seguridad y vida útil de la infraestructura y por tanto, la evolución del LCOE. Es recomendable disponer de información actual y futura detallada sobre este parámetro.</p>

6.1.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad

Para el análisis de vulnerabilidad de una instalación fotovoltaica, no se ha detectado una metodología única y comúnmente aceptada ni herramientas como tal, pero sí varias aproximaciones metodológicas que siguen una filosofía similar (ver Estado del Arte en el Tomo 2). De acuerdo con la Tabla 6, este análisis implicará, fundamentalmente, la evaluación del efecto del cambio climático sobre la producción de energía y sobre la infraestructura (diseño, operación y mantenimiento).

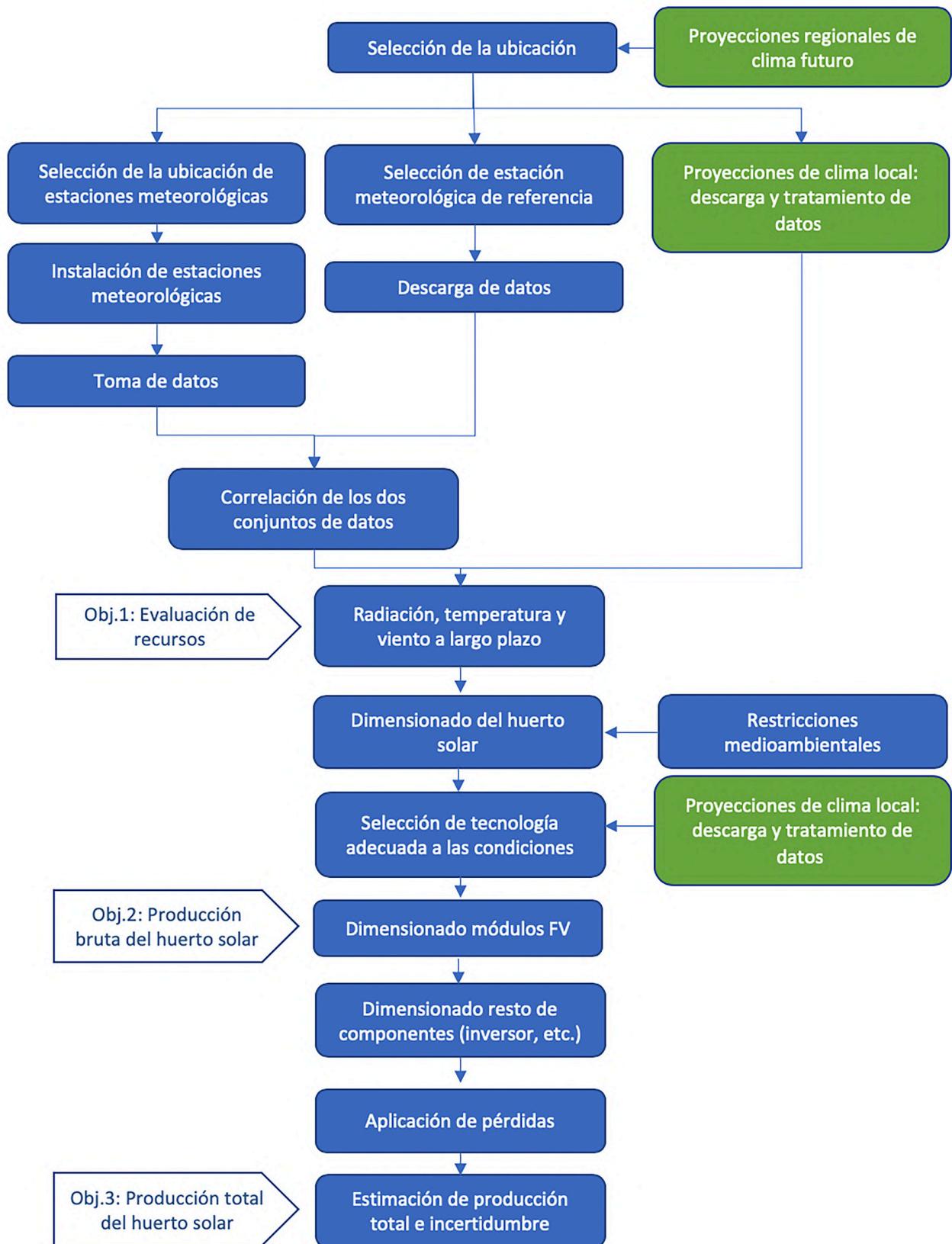
En la tabla siguiente se presenta la secuencia metodológica propuesta.

➤ **Tabla 8:** Fases para la evaluación de la sensibilidad de un proyecto fotovoltaico

Evaluación del impacto del CC sobre la infraestructura		
1	Cambios en el diseño del proyecto.	De acuerdo con el apartado anterior, son las condiciones de viento extremo y granizo las que podrían tener un mayor impacto en el proyecto. Una mayor frecuencia e intensidad de estos eventos extremos, más que originar daños directos puntuales, es más probable que origine una mayor carga mecánica a soportar por la infraestructura y mayores necesidades de mantenimiento. La evolución prevista de estos parámetros obtenida en el apartado 6.1.2, podría condicionar, por tanto, la ubicación y diseño de la instalación y las condiciones de operación. Es una práctica común considerar que estos valores sean independientes de la evolución del clima, sin embargo, siempre que se disponga de datos, se recomienda valorar los cambios que podrían producirse a lo largo de la vida útil del proyecto y evaluar si esta aproximación es adecuada. Para ello, se modificaría la secuencia metodológica de diseño del proyecto, tal y como se observa en la Figura 33, donde se muestra en qué puntos del proceso de diseño se introducirían las consideraciones de cambio climático.
Evaluación del impacto del CC sobre la producción de energía		
2	Estimación de la producción energética de la instalación.	De acuerdo con la referencia (74), la producción instantánea de una instalación fotovoltaica (W) se puede expresar de forma genérica como el producto del potencial de generación de energía fotovoltaica (Pvpot, adimensional) y la capacidad o potencia nominal instalada (Pn, W). $P = P_{Vpot} \cdot P_n$ En el artículo referenciado se muestran una metodología de cálculo, mostrando: Cómo Pvpot depende de la radiación (W/m2) y del llamado "performance ratio" (PR), que es un factor de rendimiento que refleja el impacto que los cambios de temperatura de la célula fotovoltaica tienen sobre su eficiencia. Cómo la temperatura de la célula depende de la temperatura ambiente, la radiación solar y la velocidad del viento en su superficie. Las curvas I-V del fabricante de los paneles recogen habitualmente estas variaciones. Otras referencias ofrecen métodos que no consideran el impacto del viento en la temperatura de la célula (ver (72)).
3	Cambios en la energía extraíble respecto al periodo actual.	El cambio en la producción fotovoltaica respecto al escenario base vendrá dado por los cambios en la radiación, temperatura y viento (75) así como en la tasa de degradación que se asuma para los paneles. La multiplicación de la producción nominal del sistema por un factor de degradación, que refleja la disminución de la energía con el tiempo, permite obtener la energía anual generada, tal y como reflejan Branker et al. (76).

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Figura 33: Secuencia metodológica de diseño de un proyecto de infraestructura solar fotovoltaica con consideraciones de clima futuro



Fuente: elaboración propia basada en "Wind energy. The facts" (77)

Como la gran mayoría de los proyectos de inversión, la **capacidad adaptativa** de los proyectos de infraestructura energética durante estas etapas de diseño es muy superior a la capacidad de adaptación durante la fase de operación. Con la realización de los análisis propuestos, el diseño puede revisar las diferentes opciones técnicas y su interés económico (seguimiento solar en varios ejes, uno o ninguno, refuerzo de las estructuras de sujeción, selección de paneles más resistentes, mayor refrigeración, etc.) Una vez que el proyecto está desarrollado, a través de la operación y mantenimiento también se puede adaptar este tipo de proyectos a un clima cambiante (mayor frecuencia de limpieza, mantenimiento, etc.) pero, generalmente, el impacto sobre el rendimiento del proyecto será más limitado.

6.1.4 Paso 4: Evaluación del riesgo

El riesgo es considerado como función de la probabilidad (relacionado con la amenaza) y la consecuencia (relacionado con la exposición y vulnerabilidad). Por la relativa simplicidad del sistema estudiado, y la posibilidad de establecer relaciones entre los diferentes parámetros (radiación y producción), el análisis de riesgos de este tipo de proyectos puede abordarse en muchas ocasiones desde una perspectiva cuantitativa. Para ello, para cada uno de los escenarios estudiados se establecerá:

- una probabilidad de que acontezca el riesgo.
- unas consecuencias de su materialización para el proyecto, que serían fundamentalmente, las asociadas al servicio dado y su rendimiento financiero (sintetizado en el LCOE u otro indicador).

Las consecuencias en el rendimiento financiero pueden sintetizarse en el **LCOE (Levelized Costs of Energy)**, que un indicador de tipo financiero que proporciona el costo por unidad de producción de energía (USD/MWh). Se trata de un término que depende de la retribución obtenida por la producción anual, los costos de capital (CAPEX) y los costos de operación (OPEX) (ver detalle en el apartado 5.1). Si bien es también posible aplicar la misma para calcular cualquier otro indicador de refleje el atractivo financiero del proyecto (TIN, VAN, etc.) se propone este indicador porque facilita la comparativa de costos de las diferentes tipologías de proyectos de generación eléctrica.

Las principales suposiciones que se realizan a la hora de calcularlo guardan relación con la elección de la tasa de descuento, el costo medio del sistema (costo del sistema, incentivos y método de financiación), la vida útil promedio del sistema y la degradación de la generación de energía a lo largo de la vida útil de la instalación.

► **Tabla 9:** Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto fotovoltaico

Evaluación de la probabilidad de ocurrencia		
1	Evaluación de la probabilidad de los escenarios analizados.	<p>En el apartado anterior se expone la sensibilidad del proyecto ante la evolución de diferentes amenazas y tendencias climáticas. La evaluación del riesgo implica un análisis probabilístico de diferentes evoluciones plausibles del clima y sus consecuencias en la viabilidad del proyecto. Como se viene indicando en todo el documento, es interesante que estos escenarios climáticos se combinen con escenarios de otros aspectos determinantes o “drivers”, que en el caso de la energía fotovoltaica serían precio de venta de la energía, el costo de oportunidad/financiación, etc.</p> <p>Aunque se expone más detalladamente en el apartado 4, merece la pena resaltar que establecer una probabilidad para cada uno de los escenarios (climáticos y no climáticos) es ciertamente complejo. Por ejemplo, ante la falta de elementos de decisión acerca de porque cualquiera de los RCP existentes podría tener más posibilidades de acontecer en el futuro, lo que generalmente se considera más adecuado es asumir que los mismos son equiprobables. En cuanto otros aspectos de los escenarios climáticos, como la selección de aquellos modelos de entre todos los que integran CMIP5 que son más acertados, las técnicas de regionalización o ajuste de sesgo a la ubicación concreta del proyecto más adecuadas, etc. también es complejo y se recomienda una combinación de las salidas de diferentes modelos.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre el servicio dado		
2	Evaluación del efecto sobre la calidad del servicio.	<p>Aunque difícil de cuantificar económicamente, la calidad del servicio dado a la sociedad es un parámetro que permite ponderar las consecuencias de la materialización del riesgo climático. Cuanto mayor sea la población afectada, mayores serán las consecuencias y por tanto el riesgo. Resulta, por tanto, recomendable tener en cuenta este parámetro y la evolución prevista en los diferentes escenarios que se analicen. Será relativamente sencillo de valorar para instalaciones fotovoltaicas que suministran a localidades aisladas. Cuando el proyecto fotovoltaico se integre en la red eléctrica, estudiar las consecuencias de su mayor o menor generación desde una perspectiva global puede ser muy complejo.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre la retribución		
3	Evaluación de la retribución obtenida por la producción anual en los escenarios de estudio.	<p>Aunque no se observa una relación directa con el clima, el mantenimiento de las condiciones de retribución en el futuro es un aspecto que depende en gran medida de la voluntad política y, por tanto, es incierto. Sin embargo, es un aspecto que condiciona la rentabilidad de proyectos, por lo que podría ser interesante considerar escenarios que introduzcan cambios en el esquema retributivo. Para los proyectos de autoconsumo, microrredes aisladas, etc. este aspecto puede no ser esencial y podría requerir del análisis de la casuística concreta. En un análisis centrado en la evaluación del riesgo climático, el mantenimiento de las condiciones actuales de retribución podría ser una aproximación adecuada, pero con relativamente poco esfuerzo adicional es posible también considerar varios escenarios razonables de pago por kWh entregado a la red por nuestro proyecto.</p>

Evaluación de las consecuencias del CC sobre el CAPEX

4	Evaluación de la diferencia de costo asociada a diseños adaptados a las condiciones futuras.	<p>Recordemos que el CAPEX engloba costos de inversión relacionados con la infraestructura física que dependerán de la ubicación y de factores ambientales y socioeconómicos (clima, orografía, distancia a la infraestructura esencial, ...).</p> <p>El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá adaptar el diseño de la instalación y guiar la selección de sus componentes. Esto puede tener impacto en:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costos de inversión inicial en los equipos y su instalación (módulos adecuados a las condiciones actuales y futuras, colocación de los mismos, estaciones meteorológicas, etc.). • Costos asociados a sustitución de componentes por modificación de su vida útil en las condiciones futuras (cargas de fatiga, degradación, etc.). <p>Habitualmente, la tasa de degradación se trata como un valor único en los cálculos de LCOE, a pesar de que se conoce que los paneles se suelen degradar de forma diferente incluso dentro de una misma instalación fotovoltaica. Como alternativa, es posible asumir una distribución de probabilidades para la tasa de degradación del sistema, como se observa en el artículo (Darling et al.)(73).</p>
---	--	---

Evaluación de las consecuencias del CC sobre el OPEX

5	Evaluación de la diferencia de costo asociada a los gastos necesarios para la correcta operación de la instalación en las condiciones futuras.	<p>Recordemos que el OPEX contempla costos relacionados con gastos de funcionamiento necesarios para una adecuada operación de la instalación.</p> <p>El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá determinar la evolución de estos costos y realizar ajustes en la rentabilidad a largo plazo de la instalación (costos vs. Ingresos por producción). Podrán verse alteradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La producción, debido a los cambios que se produzcan en el clima (tal y como se ha observado, cambios de temperatura, radiación y viento). • Los costos de mantenimiento y reparación de equipos que pueden incrementarse (en condiciones adversas, como granizo o vientos extremos), suponiendo asimismo un mayor tiempo de inactividad (por mayor frecuencia de reparaciones, por problemas de inaccesibilidad de la instalación, etc.). • El costo de los seguros (si se intensifican los eventos extremos, este costo podría aumentar).
---	--	---

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

A partir de esta información, se estimaría el LCOE en cada uno de los escenarios manejados. Para el análisis específicamente centrado en la viabilidad económica de proyectos, también es posible emplear indicadores como VAN, TIR, etc.

6.1.5 Resumen de componentes de riesgo

La siguiente tabla resume cómo se definen los diferentes componentes de riesgo en un proyecto de diseño de infraestructura fotovoltaica, en base a la información presentada en los apartados anteriores:

- La primera columna “Componente del riesgo”, muestra los diferentes componentes del riesgo (amenaza, exposición, etc.).
- En la segunda columna “Aplicación en proyectos de infraestructura solar fotovoltaica” se resumen los factores que pueden hacer que el proyecto de infraestructura se pueda ver más o menos afectado por el cambio climático, organizados según el componente del riesgo sobre el que influyen: factores que determinan la exposición del proyecto al cambio climático, los que determinan su sensibilidad, etc.
- La última columna “Indicadores de cambio climático en proyectos de infraestructura solar fotovoltaica”, enumera los indicadores que habría que monitorizar para determinar si se está produciendo un cambio en el factor (de la segunda columna) y su potencial impacto sobre el proyecto.

Por ejemplo, la monitorización de la temperatura ambiente (indicador) permite observar tendencias de cambio en la misma que podrían ocasionar un cambio en la eficiencia de las células fotovoltaicas (aplicación al proyecto), suponiendo una amenaza (componente del riesgo) para la producción de la instalación y el servicio que da a la población.

Esta tabla busca solo incluir algunos aspectos típicamente importantes para estos proyectos, y siempre desde la base de proyectos conectados a la red de transmisión y distribución eléctrica. Como ya se comentó con anterioridad, es conveniente particularizarlos para el proyecto concreto objeto de estudio. Por ejemplo, en el caso de una instalación aislada, se podría tener un planteamiento más amplio, y dentro de la sensibilidad se podría considerar las consecuencias de la falta de suministro para la población y/o las instalaciones atendidas.

➤ **Tabla 10:** Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo en un proyecto de infraestructura solar fotovoltaica

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de infraestructura solar fotovoltaica	Indicadores de riesgo a considerar en proyectos de infraestructura solar fotovoltaica
Amenaza	Cambios en el recurso.	Radiación solar, sombras, cobertura nubosa.
	Cambios en la eficiencia de las células.	Temperatura ambiente. Viento.
	Cambios en el ritmo de degradación de las células.	Humedad relativa, especialmente en combinación con elevada temperatura, humedad, salinidad, etc.
	Cambios en frecuencia y/o intensidad de eventos extremos que pueden afectar a la infraestructura.	Vientos extremos. Granizo. Inundaciones (en ubicaciones concretas). Deslizamientos de laderas (en ubicaciones concretas).
Exposición	Paneles fotovoltaicos, otros equipos, infraestructuras y resto de los componentes del proyecto.	Componentes y características técnicas de la instalación y su adecuación a la evolución de las variables climáticas Cambio en la frecuencia de las tareas de operación y mantenimiento (tareas de limpieza, cambio de anclajes y otros componentes de la infraestructura y acciones durante la operación). Alteración de la vida útil de la instalación por desgaste prematuro, corrosión, etc.
	Población y actividades a las que se suministra energía desde la instalación / sistema energético en el caso de proyectos conectados a redes de distribución eléctrica.	Cambio en el rendimiento del proyecto ante diferentes condicionantes de operación Variación de la cantidad de energía producida ante eventuales cambios de las condiciones climáticas. Reducción del nivel o interrupción del servicio.
Sensibilidad y Capacidad Adaptativa	Diseño de la infraestructura.	Adecuación de los componentes y equipos de la instalación a las características del sitio y la evolución de las variables climáticas (selección de paneles, distribución de los mismos, empleo de sistemas de orientación para aprovechar mejor el recurso, refuerzo de ciertos elementos, etc.).
	Características socioeconómicas del proyecto.	Evolución de los recursos económicos: rentabilidad, flujo de caja que generará el proyecto (en diferentes escenarios climáticos), evolución de las políticas retributivas (ingresos por cada kWh aportado a la red eléctrica para los proyectos conectados en red). (Estos indicadores determinan la capacidad para poder implementar medidas de adaptación, diseños más resilientes y adaptados al cambio climático, etc.).

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

6.2 Energía eólica

Tal y como se adelantaba en el apartado 2.2 (Estado del arte de las metodologías), los impactos del clima en un parque eólico son sumamente locales y específicos de la ubicación concreta del proyecto.

En cualquier proyecto de este tipo, la decisión sobre su ubicación viene determinada principalmente por la maximización de la producción y minimización del costo de capital y los costos operativos, el impacto ambiental (visual, acústico, etc.) y la carga de la turbina que determina su vida útil. Así, además de la optimización de la producción, existen ciertas restricciones impuestas por el sitio y costos que introducen cierto nivel de incertidumbre, por lo que el diseño debe buscar también minimizar estos riesgos.

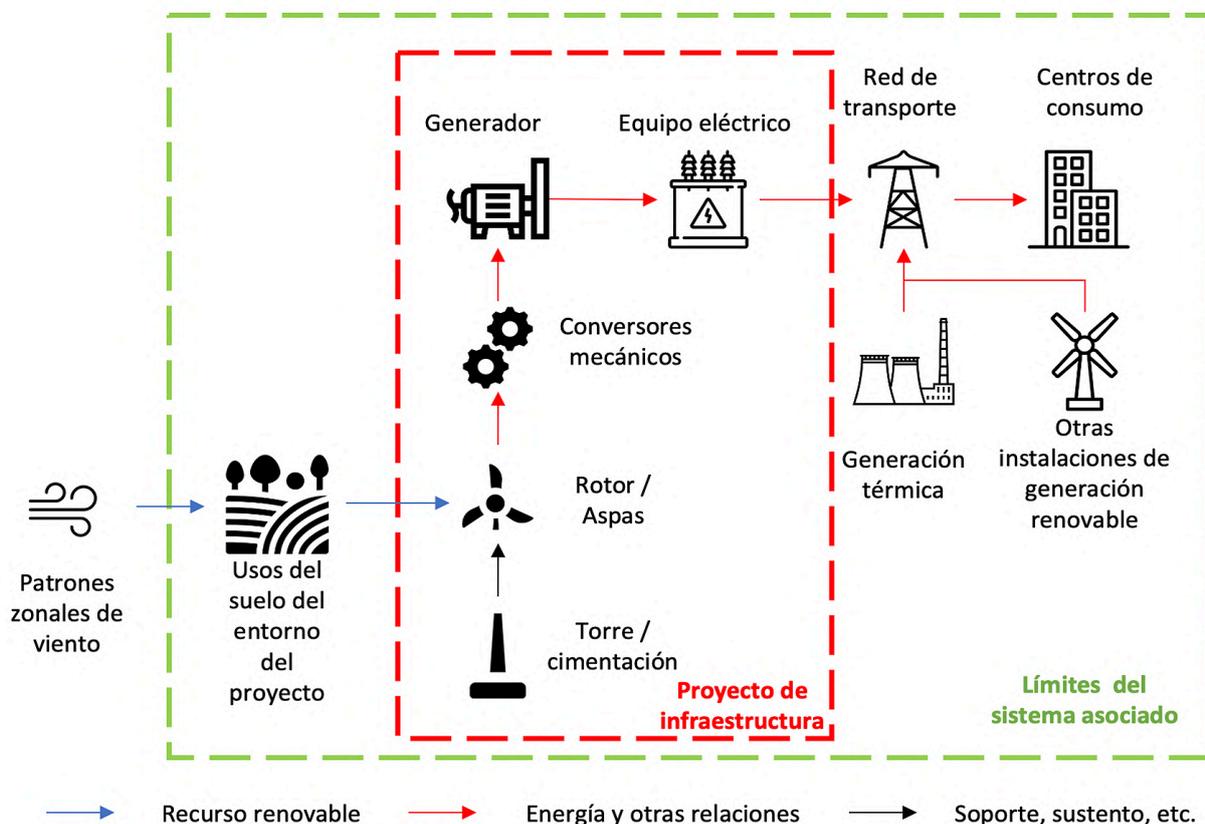
Los pasos fundamentales de la metodología propuesta se resumen en:

- Contextualización del proyecto.
- Evaluación del recurso eólico y su evolución en los escenarios manejados.
- Análisis de la evolución de los eventos extremos a largo plazo (viento extremo, hielo,...).
- Cálculo de la energía generada.
- Análisis del impacto de los eventos extremos sobre la infraestructura.
- Cálculo de LCOE para evaluar la rentabilidad o atractivo del proyecto.

6.2.1 Paso 1. Contextualización del proyecto respecto al CC

Una infraestructura de este tipo se puede presentar como un sistema en el cual se agrupan las distintas partes que lo conforman y que mantiene ciertas interrelaciones con otros elementos externos a la propia infraestructura. Debido a estas interrelaciones, cualquier impacto sobre una de las partes puede implicar un impacto sobre otros elementos o, incluso, sobre el conjunto del sistema. Sin embargo, no todos los elementos mencionados formarán parte del alcance de la evaluación objeto de este estudio. El contexto para la evaluación de riesgos climáticos de un proyecto eólico quedaría definido de manera esquemática como representa la figura siguiente.

➤ **Figura 34:** Contexto de evaluación de un proyecto eólico: propuesta de límites del sistema objeto de estudio



➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Tal y como se observaba en el sector anterior, es conveniente adaptar este esquema genérico a las características concretas del proyecto objeto de estudio. Aunque existen proyectos de este tipo que se sitúan aislados de las redes eléctricas nacionales (en concreto, en zonas en las que el despliegue de estas redes es complejo), en la mayoría de los casos este tipo de instalación requiere de la consideración de la red de distribución y otras instalaciones de generación.

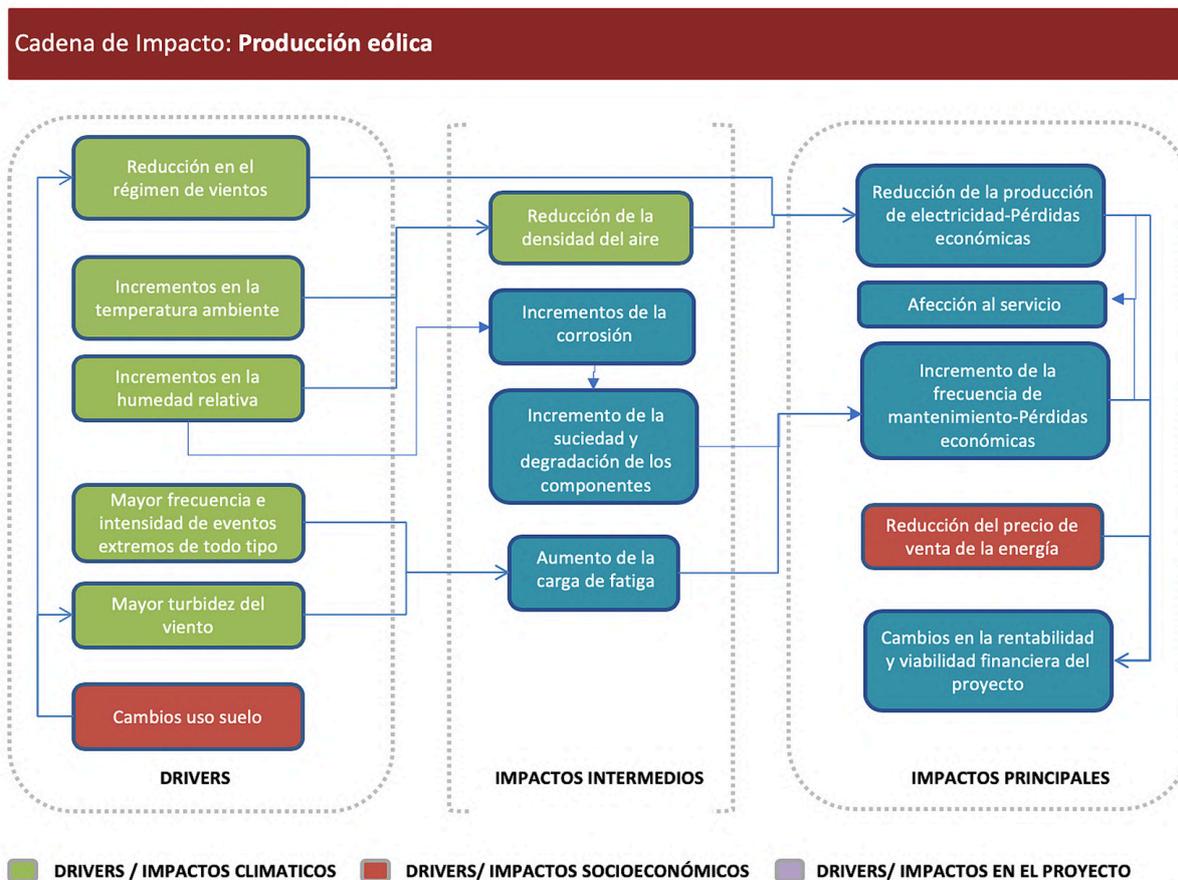
Desde una perspectiva de “aguas arriba”, más allá del estudio del relieve del entorno del parque de aerogeneradores (tales como colinas, mesetas, etc.) presente en cualquier proyecto de este tipo, la evolución de los usos del suelo del entorno tiene impacto sobre la rugosidad del terreno y, por ende, sobre las características del recurso eólico que determinará el diseño de la infraestructura (cuanto mayor sea la rugosidad, más se ralentiza el viento). El Atlas Eólico Europeo define clase de rugosidad a partir de la longitud de rugosidad. A modo de ejemplo, un paisaje con mucho arbolado y edificios se considera de alta rugosidad (clase 3 ó 4), una pista de hormigón sería baja rugosidad (clase 0.5) y la superficie del mar tendría una rugosidad de clase 0 (puede verse una tabla de clases y de longitudes de rugosidad en (78)).

Como el aspecto anterior (la evolución del sistema eléctrico nacional, este es un aspecto sobre el que el promotor del proyecto tendrá una escasa capacidad de intervención, por lo que se consideran dentro del sistema, pero fuera del proyecto propiamente dicho.

6.2.2 Paso 2. Identificación de amenazas y valoración de la exposición

Para la identificación de las amenazas y la valoración de la exposición del proyecto a las mismas, es interesante que, tras definir los límites del sistema estudiado y sus componentes, generar una cadena de impacto para cada una de las amenazas que se consideren de interés para el proyecto. En la imagen siguiente se presentan las principales cadenas de impacto que pueden afectar a un proyecto eólico, cuyos elementos se describen con mayor detalle a continuación.

➤ **Figura 35:** Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos eólicos



Nota: dependiendo de la ubicación del proyecto es posible que los drivers tengan el sentido inverso al indicado, en cuyo caso, el sentido de los impactos también se verá invertidos (los aspectos que se indica que se ven incrementados podrían disminuir y los que se apunta que se verían reducidos se verían aumentados). Para simplificar el diagrama, no se indica esto último. Se muestran en verde los aspectos climáticos y atmosféricos, en rojo otros aspectos que pueden tener un efecto significativo en el proyecto y en azul los impactos intermedios y principales.

Tal y como se observa, los principales impactos del cambio climático en este tipo de proyecto podrían agrupar en:

- a) **Impacto sobre la producción de energía.**
- b) **Impacto sobre el CAPEX (vida útil de la infraestructura).**
- c) **Impacto sobre el OPEX (operación y mantenimiento).**
- d) **Impacto sobre los ingresos/retribución del proyecto.**
- e) **Otros impactos.**

Para cada uno de ellos, a continuación, se describen las amenazas o “drivers” que pueden originarlos:

a) Impacto del cambio climático sobre la producción de energía

En la mayoría de los casos, la rentabilidad del proyecto es más sensible a los cambios en la producción de energía que al costo de la infraestructura. Es por ello apropiado utilizar la producción de energía como parámetro dominante del diseño.

Los elementos clave que caracterizan la producción de energía de un parque eólico son:

- **el régimen de viento:** es sin duda el mecanismo principal y más directo por el cual el cambio climático puede afectar al sector eólico. Este puede verse modificado por los cambios que se den en los usos del suelo (vegetación, rugosidad de la superficie), siendo este un efecto muy local y difícil de cuantificar.
- **la densidad del aire:** también tiene un impacto directo sobre la producción eólica, aunque de menor grado. Su valor depende de la humedad, la temperatura y la presión atmosférica. Temperaturas bajas generan un aire más denso que, en situaciones extremas, podría hacer que el generador funcione por encima de su potencia nominal, lo que podría dañarlo, e incluso puede requerir que la turbina se apague. Igualmente, una menor humedad genera un aire más denso (el aire húmedo es más ligero porque contiene vapor de agua, con un peso molecular menor que el del aire, formado principalmente por N₂). Por el contrario, menor presión se asocia a aire menos denso (79).

Como se indicará más adelante, las **temperaturas reducidas:** en combinación con humedad en la atmósfera pueden generar hielo en las palas, lo que podría aumentar su resistencia aerodinámica, dando lugar a una desaceleración del rotor, y, en situaciones extremas, terminando por desconectarse de la red.

b) Impacto del cambio climático sobre el CAPEX: vida útil de la infraestructura

El CAPEX engloba dos tipos de costos: los relacionados con el equipo físico y que no dependen de donde se ubique (turbinas (aprox. 80% del total), cimientos, conexión a la red y otros aspectos técnicos) y aquellos costos que dependen directamente de la ubicación y de factores ambientales y socioeconómicos (orografía, vegetación, clima, distancia a la infraestructura esencial, altura del terreno, profundidad del mar, usos y precio del suelo, ...).

Los componentes que suponen un mayor porcentaje del CAPEX de proyectos “on-shore” son los costos asociados con la distancia a la infraestructura relevante para el proyecto, carreteras, arrendamiento de tierras y características del suelo. En proyectos “off-shore”, el mayor costo se asocia a la infraestructura eléctrica y de cimentación, que serán mayores cuanto mayor sea la profundidad de la instalación y más lejos de la costa se realice (62).

El impacto del cambio climático en estos términos se puede observar, principalmente, en la vida útil de la infraestructura.

Determinadas condiciones de **temperatura ambiente y humedad** pueden tener impacto en la **producción** y en la **vida útil de las palas**. En climas gélidos se puede formar una capa de hielo en las aspas, pudiendo suponer no solo un problema de seguridad (por el peligro de que el hielo salga despedido con el giro de las palas), sino también un problema operativo, ya que puede reducir de manera sustancial la producción de energía eléctrica, deteriorar las propiedades aerodinámicas de las palas (reduciendo su vida útil) y ocasionar dificultades de acceso a las instalaciones. Aún se conocen pocos estudios que hayan considerado estos efectos en el contexto de evolución del clima.

El cambio climático también puede producir alteraciones en el contexto ambiental, la operación y mantenimiento y el diseño de los proyectos. En este sentido, la **carga de las turbinas** es un factor importante en el diseño de los parques por su afección sobre el rendimiento y la vida útil de los aerogeneradores. La carga de diseño puede verse alterada por eventos extremos puntuales, relacionados principalmente con altas velocidades del viento, y por fatiga, relacionada con los niveles de turbulencia del sitio (intensidad de la turbulencia o “turbidez” del viento).

- los **eventos extremos** evolucionan en la medida en que lo hace la intensidad de los eventos tormentosos. La evolución experimentada por este tipo de evento podría condicionar la selección del aerogenerador y su vida útil, dado que los fabricantes solo garantizan sus turbinas para soportar vientos extremos de unos 10 minutos de duración una vez cada 50 años.
- los **niveles de turbulencia** están más relacionados con las características de la localización (topografía, tipo y rugosidad de la superficie y efectos térmicos) y se verán afectados de forma más moderada por los cambios en el clima.

Poca información se conoce sobre estudios que cuantifiquen los cambios inducidos por la evolución del clima en estos parámetros.

Existen otros factores meteorológicos, como la **cizalladura vertical del viento** o la **distribución direccional**, que influyen en la **carga de la turbina** y que también se pueden ver influidos por el cambio climático. Estos factores se tienen en cuenta al diseñar el espacio apropiado entre aerogeneradores, de cara a que no se produzcan turbulencias que sobrecarguen las turbinas y optimizar la producción. Sin embargo, se trata de factores considerados secundarios, en comparación con los anteriores, y sus tendencias son difíciles de cuantificar con las herramientas disponibles en la actualidad.

Asimismo, en zonas costeras, la corrosión y los cambios en el nivel del mar pueden adquirir relevancia. **Inundaciones** más frecuentes podrían tener implicaciones para la **resistencia de los cimientos** de los aerogeneradores ubicados en la costa, que son un número relativamente muy bajo.

Para protegerse frente a la **corrosión** la infraestructura eólica cuenta con sistemas como recubrimientos, ánodos de castigo, sistemas de deshumidificación en las góndolas... Lógicamente estos son más importantes en la industria off-shore. La corrosión, está relacionada con la salinidad (vinculada a la proporción de agua dulce en los océanos), la humedad y la presencia de partículas abrasivas, parámetros cuyas tendencias pasadas y futuras son muy difíciles de evaluar.

En base a la información descrita, existen diversos factores meteorológicos que influyen en la carga de las turbinas eólicas (velocidad del viento; temperatura presión y humedad que determinan la densidad del aire; etc.) que pueden verse afectados por el cambio climático. Los estudios que se conocen consideran unos valores de CAPEX específicos para la ubicación del proyecto y asumen que se mantienen constantes a lo largo del tiempo.

c) Impacto del cambio climático sobre el OPEX: operación y mantenimiento

El OPEX incluye los gastos relacionados con las operaciones necesarias para una adecuada operación de la instalación, tales como seguros, mantenimiento y reparación de equipos (incluido cambio periódico de determinadas piezas), etc.

Como ya se ha comentado, una mayor frecuencia e intensidad de **eventos extremos (viento, hielo, inundación, ...)** podría **dificultar el acceso a las instalaciones** y originar variaciones respecto al diseño en las **cargas de fatiga** sobre los aerogeneradores (exceso de vibraciones, aparición de grietas, roturas, ...). Como consecuencia, el OPEX podría incrementarse (mayores necesidades de mantenimiento, mayores costos de los seguros, etc.).

Los estudios conocidos en los que se evalúa el impacto del cambio climático sobre la generación eólica consideran unos valores de OPEX específicos para cada ubicación del proyecto y generalmente asumen que se mantienen constantes a lo largo del tiempo. No obstante, se considera importante analizar la evolución de los eventos extremos en los escenarios de futuro, de cara a evaluar si esta aproximación es adecuada.

d) Impacto del cambio climático sobre los ingresos/retribución del proyecto

Tal y como se describe detalladamente en el apartado 5.1, en la mayoría de las ocasiones los proyectos eólicos se integran en las redes nacionales de generación, transmisión y distribución de energía. En el marco de las mismas, esta fuente de energía suele tener esquemas de retribución favorables que buscan potenciar su despliegue. La evolución de estos esquemas en el futuro es un aspecto incierto, ya que depende de decisiones políticas. Por ello, en el análisis de riesgos de estos proyectos puede ser muy interesante combinar el análisis del riesgo climático con la consideración de riesgos asociados al esquema retributivo del proyecto. Esto supone considerar tantos escenarios climáticos como escenarios políticos/normativos.

Desde una visión más amplia, al formar parte de estas redes, es cierto que el cambio climático no solo afectaría a la energía eólica, sino que también afectará a otros componentes del sistema (generación renovable, demanda, etc.) pero el aspecto normativo y retributivo anteriormente comentado, será en la mayoría de las ocasiones más importante.

Para los proyectos de autoconsumo, microrredes aisladas, etc. este aspecto requiere de un análisis de todas las particularidades del proyecto sin que sea posible establecer directrices generales.

e) Otros impactos

Por otro lado, y afectado por varios de los *drivers* descritos, estaría el servicio que el proyecto da a la sociedad. Este servicio se verá afectado, principalmente, cuando la operación de la infraestructura se vea interrumpida, aunque su calidad también podría verse afectada en caso de pérdidas de producción. La reducción de la generación de origen renovable, sin tener que llegar a detenerse totalmente, puede implicar mayores costes de aprovisionamiento de energía para el conjunto del sistema energético de un país, al tener que recurrir a fuentes energéticas más costosas como la generación térmica.

Resumen de *drivers* climáticos y no climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura eólica

La siguiente tabla resume los parámetros mencionados y su impacto potencial sobre el proyecto, resaltando aquellos que pueden suponer un mayor impacto y merecen, por tanto, un análisis detallado.

Considerando tanto la importancia de los impactos como los estudios existentes, parece que los cambios de variables climáticas que es prioritario evaluar serían los que tengan que ver con la magnitud del recurso eólico, su distribución (dependiente del viento, pero también de la temperatura y humedad), vientos extremos y rachas, y, en ubicaciones concretas, los problemas de formación de hielo.

Tabla 11: Variables que inciden en los proyectos de infraestructura eólica y tipo de impacto

Elementos expuestos	Drivers climáticos						Drivers no climáticos	
	Viento	“Turbidez” del viento	Eventos de viento extremo	Temperatura ambiente	Humedad	Nivel del mar – inundación costera	Usos del suelo	Esquema de retribución
Aspas	Impacto en el recurso disponible y por tanto en la producción	Cargas a la que se ve sometida la estructura	Cargas a la que se ve sometida la estructura	Influye en la densidad del aire y por tanto en la producción	Influye en la densidad del aire y por tanto en la producción		Impacto en el recurso disponible a nivel local (producción)	
Generador (y otros equipos en la góndola)		Cargas a la que se ve sometida la estructura		Hielo en palas	Hielo en palas			
Torre-cimentación		Cargas a la que se ve sometida la estructura		Hielo en accesos	Hielo en accesos	Corrosión		
Conjunto del proyecto	Impacto en producción			Producción y hielo en accesos			Impacto en el recurso disponible a nivel local (producción)	Impacto en la rentabilidad y viabilidad del proyecto
Servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	

Nota: se destacan en color naranja más oscuro los que se consideran más importantes y generalizados. La infraestructura incluye al resto de equipos e instalaciones a los soportes, equipamiento eléctrico, etc.

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha indicado anteriormente, el previsible cambio de la capacidad corrosiva de la atmósfera es de muy compleja valoración. Lógicamente, la subida del nivel del mar afectará a las instalaciones ubicadas en la costa o en el mar (off-shore). En cuanto a la densidad del aire, como se ha indicado anteriormente, se encuentra vinculada fundamentalmente a otros parámetros (temperatura, humedad y presión). De estos tres, los dos primeros son los que se considera que pueden verse más alterados por el cambio climático. En cuanto al impacto de las bajas temperaturas sobre la operación (p.ej. acumulando hielo en las aspas) y/o mantenimiento (p.ej. complicando los accesos a la infraestructura y equipos), prácticamente en todo el globo tendrá una tendencia positiva, por lo que habría que determinar la pertinencia en cada caso particular. Por ello se propone considerar como principales amenazas o *drivers* climáticos los aspectos sintetizados en la siguiente tabla.

➤ **Tabla 12:** Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura eólica y tipo de impacto

<i>Driver</i> climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/Consecuencia
Cambio en el régimen de viento (incluye velocidad, dirección y duración de las rachas, etc.).	Cambios en la generación eólica.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto y en el servicio dado.
Temperatura ambiente.	Cambio en la densidad del aire y por tanto en la generación de energía eólica.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto y en el servicio dado.
Humedad del aire (*).	Formación de hielo en accesos a equipos (complicando mantenimiento) y en las palas (disminuyendo rendimiento).	Afección a accesos – OPEX – rentabilidad del proyecto. Integridad de la infraestructura - CAPEX - OPEX – rentabilidad del proyecto. Puede afectar al servicio.
Eventos de viento extremo.	Carga estructural de las turbinas y daños a las estructuras (principalmente en las palas).	Integridad de la infraestructura – CAPEX - OPEX – rentabilidad del proyecto. Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta dañada.

(*) Nota: Como se indica en la tabla anterior, la humedad del aire (en combinación con otros factores como salinidad, etc.) también influye en la corrosión, pero no se considera un aspecto a ser estudiado prioritariamente o *“driver”*. Sí se considera relevante, sin embargo, su efecto sobre la formación de hielo.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Al margen de estas amenazas que se destacan en la tabla anterior, como cualquier otro proyecto, si el mismo se ubica en una zona especialmente vulnerable podría ser interesante analizar las tendencias de aquellos *drivers* que pudieran tener una especial incidencia (por ejemplo, un conjunto de aerogeneradores situados en primera línea de la costa o anclados al fondo marino podrían verse afectados por la subida del nivel del mar mientras que esto es irrelevante para los situados tierra adentro). En todo caso, estas situaciones ya son consideradas hoy en día en los diseños.

Métodos y herramientas disponibles para hacer el análisis de las amenazas climáticas

En la tabla siguiente se sintetizan los métodos, fuentes de datos, modelos y demás herramientas para valorar las amenazas climáticas de los proyectos de este tipo.

► **Tabla 13:** Fases para la evaluación de las amenazas climáticas sobre el diseño de un proyecto eólico

Evaluación del impacto del CC sobre el recurso y eventos extremos (análisis de las proyecciones climáticas)		
1	<p>Información sobre la velocidad del viento cerca de la superficie (dirección y velocidad en m/s) y temperatura (°C).</p>	<p>Se requiere información detallada en el lugar en el que se va a desarrollar el proyecto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • velocidad promedio del viento en agregaciones temporales breves (horarias o diez-minutales, donde sea posible; diarias las más de las veces). • velocidad de la racha máxima a distintas agregaciones temporales. • dirección del viento. • tasa de cambio y variabilidad. • temperatura del aire (que condiciona la densidad de este). <p>Si no se dispone de información suficiente en el punto donde se desarrolla el proyecto, es preciso recopilarla para ubicaciones lo más próximas posibles a través de atlas, bases de datos locales, etc. También el empleo de datos de reanálisis es una técnica relativamente frecuente para generar información sobre los patrones de viento históricos. Concretamente MERRA ha sido empleado en algunos análisis de recurso eólico realizados en Latinoamérica(80) aunque algunos estudios apuntan a que ERA5 aporta mejores resultados(81).</p> <p>Generalmente, a la hora de analizar un proyecto eólico solo es posible registrar datos de viento en el punto de interés durante una breve campaña de medición. Las técnicas conocidas como medición-correlación-predicción o MCP se emplean para estimar los recursos eólicos que representan las condiciones a largo plazo en el sitio objetivo donde se ha llevado a cabo una campaña de medición de datos de viento a corto plazo. Existen diversos métodos MCP, y las principales diferencias entre ellos radican fundamentalmente en el tipo de relación establecida entre los datos del viento (velocidad y dirección) registrados en el sitio objetivo y los datos del viento registrados simultáneamente en una o varias estaciones meteorológicas cercanas que sirven como estaciones de referencia y aportan datos a largo plazo. Muchos de ellos están implementados en las aplicaciones de software que la industria de la energía eólica emplea por lo que no es conveniente exponerlos aquí. No obstante, en grandes líneas, estos métodos han ido evolucionando, y si bien en los años 40 estimaban la velocidad media anual del viento a largo plazo a partir de una sola estación de referencia, actualmente existen métodos que se basan en técnicas de aprendizaje automático que use varias estaciones de referencia. No obstante, generalmente estas técnicas se basan en funciones de transferencia lineal, no lineal y probabilística y trabajan fundamentalmente de dos métodos: considerando series de tiempo o distribuciones de frecuencia.</p> <p>Debido a restricciones relacionadas con la capacidad de almacenamiento, no se suelen archivar salidas de alta frecuencia en las grandes bases de datos multimodales públicas, disponiendo generalmente de salidas diarias. (ver, más adelante, la fase 1c de esta tabla “Desagregación temporal (paso de tiempo de 3 horas)”). Esto es una de las principales limitaciones para construir la climatología base en el caso del viento, donde la resolución temporal es muy importante.</p> <p>En todo caso, en cuanto al viento, es muy importante realizar un análisis adecuado de la variabilidad inter e intra anual, especialmente si no se dispone de información detallada de velocidad del viento en el lugar donde se va a desarrollar el proyecto. Otra recomendación importante es abordar el análisis de las características del viento por sectores. Analizar todas las velocidades independientemente de la dirección del viento puede conducir a errores de valoración en muchas ubicaciones. Por último, cabe mencionar que en muchas fuentes de datos las velocidades se indican en dos componentes: u (sentido oeste-este) y v (sentido sur – norte). La velocidad del viento es la resultante de ambos componentes o vectores.</p>

Evaluación del impacto del CC sobre el recurso y eventos extremos (análisis de las proyecciones climáticas)

1a	Proyecciones climáticas GCM-RCM.	<p>Se aplicará una metodología para recuperar los datos de mayor resolución temporal y espacial posible de viento y temperatura (casi) superficial de modelos RCM. Mayores resoluciones pueden permitir capturar mejor las circulaciones a escala local (especialmente cerca de las líneas costeras y en terrenos complejos) y extremos.</p> <p>El consenso metodológico para modelar los vientos futuros en entornos regionales es reducir los modelos climáticos globales (GCM) considerando varios escenarios de emisión o RCP. Para verificar la precisión del modelo, se realiza un análisis del clima pasado con el modelo y se compara con las observaciones del viento del mismo período de tiempo. Los datos de reanálisis se comparan con los escenarios de proyección de emisiones para examinar las diferencias (82)while others are projected to lose wind resources. Oklahoma is presently wind rich with this resource extensively exploited for power generation. Our work examined the wind power implications under the IPCC’s A2 scenario for the decades 2040–2049, 2050–2059 and 2060–2069 as compared to model reanalysis and Oklahoma Mesonet network observations for the base decade of 1990–1999. Using two western Oklahoma wind farms as examples, we used North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP)</p>
1b	Evaluación de la velocidad del viento y corrección de sesgo.	<p>Dado que la evaluación de impacto puede verse modificada por los sesgos en los resultados de los modelos climáticos, se aplican técnicas de corrección de sesgo. Son técnicas más ampliamente empleadas para la precipitación y la temperatura y más raramente para el viento.</p> <p>Uno de los métodos empleados (ver (83)) para eliminar el sesgo en la distribución de velocidad del viento es el método de transformación de función de distribución acumulada (<i>Cumulative Distribution Function-transform (CDF-t) method</i>), que se basa en un método de cuantil-cuantil que explica la evolución temporal de la distribución en un contexto de cambio climático. Más detalle en el apartado 4 (Análisis de la variabilidad climática y el cambio climático).</p> <p>En estos procesos la incertidumbre está asociada con los conjuntos de datos de referencia observacionales y con la metodología utilizada para construir la cuadrícula. Estas incertidumbres incluyen la escasez de estaciones en algunas áreas y el uso de solo un año para calcular la climatología del viento sobre el océano.</p>
1c	Desagregación temporal (paso de tiempo de 3 horas).	<p>Debido a que la relación entre la velocidad del viento cerca de la superficie y la energía eólica no es lineal, se requiere el uso de velocidades instantáneas del viento para una evaluación precisa de la evolución de la energía eólica (84). Sin embargo, como ya se vio, no se suelen archivar salidas de alta frecuencia en las bases de datos existentes.</p> <p>Para tener en cuenta la variabilidad intra-diaria, es recomendable emplear una salida RCM que proporcione velocidad del viento cerca de la superficie a una frecuencia de tres horas siempre que esté disponible.</p> <p>Si no está disponible, es posible emplear modelos estadísticos simplificados (83) que desagregan los valores diarios de velocidad del viento en valores cada 3 horas, calibrándolo posteriormente con datos medidos históricos. Esta transformación se aplica a todos los puntos de la cuadrícula, verificando que no afecte la velocidad media del viento original.</p>

Evaluación del impacto del CC sobre el recurso y eventos extremos (análisis de las proyecciones climáticas)

1d	Extrapolación de la velocidad del viento desde la superficie hasta la altura del eje de la turbina.	<p>La velocidad del viento aumenta generalmente con la altura (lo que se conoce como “cizallamiento”) por lo que es esencial medir la velocidad del viento lo más cerca posible del eje de la turbina o, en su defecto, estimar el perfil de corte. Las salidas de los modelos generalmente aportan velocidades del viento cerca de la superficie (habitualmente, 10 metros sobre la superficie).</p> <p>Algunas referencias (82) while others are projected to lose wind resources. Oklahoma is presently wind rich with this resource extensively exploited for power generation. Our work examined the wind power implications under the IPCC’s A2 scenario for the decades 2040–2049, 2050–2059 and 2060–2069 as compared to model reanalysis and Oklahoma Mesonet network observations for the base decade of 1990–1999. Using two western Oklahoma wind farms as examples, we used North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP aplican la siguiente ecuación a todos los puntos de la cuadrícula y pasos de tiempo:</p> $U = UR \times \left[\left(\frac{Z}{ZR} \right)^\alpha \right]$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • U es la velocidad del viento estimada a la altura del eje (metros). • UR es la velocidad del viento cerca de la superficie. • Z/ZR es la relación de altura deseada sobre el suelo (Z = altura del eje) sobre la altura de referencia (ZR = altura a la que fueron medidos los datos de viento disponibles). • α = es un parámetro que refleja la estabilidad atmosférica y varía con las condiciones atmosféricas y la rugosidad del terreno (podría verse alterado por el cambio climático y en función de la evolución seguida por los usos del suelo) (85). <p>Esta fórmula se emplea comúnmente para extrapolar verticalmente la velocidad del viento, pero se trata de un método que no tiene en cuenta las variaciones espacio-temporales en la estabilidad de la capa límite. Para tenerlo en cuenta, podría calcularse α mediante la fórmula:</p> $\alpha = 0.37 - 0.0881 \cdot \ln(UR)$ <p>Por lo general, la predicción de la variación en la velocidad del viento con la altura, la variación en la velocidad del viento en el área del sitio y la interacción “de estela” entre los aerogeneradores se calculan dentro de un conjunto de programas informáticos a medida, que están diseñados específicamente para facilitar predicciones precisas producción de parques eólicos: “herramientas de diseño de parques eólicos” (WFDT).</p>
1e	Variabilidad: distribución de frecuencias de velocidad del viento.	<p>Los archivos de datos de los modelos climáticos suponen un volumen de información relativamente grande. De cara a reducir los requisitos de almacenamiento y de procesamiento de datos, se puede trabajar con distribuciones de frecuencias de viento (62).</p> <p>La distribución probabilística de los vientos en una determinada ubicación se puede ajustar según la distribución de Rayleigh (84) o la distribución de Weibull(86).</p> <p>Como se verá más adelante, el siguiente paso será cruzar la curva de potencia de la turbina con la distribución de frecuencias de las velocidades del viento registradas en la ubicación que se esté analizando, obteniendo así la producción eólica en dicha ubicación (87).</p>

Evaluación del impacto del CC sobre el recurso y eventos extremos (análisis de las proyecciones climáticas)

2 Evolución de los eventos extremos a largo plazo.

Este tipo de eventos son más complicados de proyectar y están sujetos a mucha incertidumbre. Se considera que condiciones de viento extremo y/o heladas podrán tener un impacto más importante en el proyecto.

Viento extremo: en este apartado se considerarían fuertes vendavales (velocidad del viento cerca de la superficie ≥ 75 km/h ó 9 Bft) y ciclones severos. La frecuencia e intensidad de los vientos fuertes y racheados condiciona la selección del aerogenerador y su vida útil. Los fabricantes garantizan sus turbinas para soportar vientos extremos de unos 10 minutos de duración y periodo de retorno de 50 años. Se conocen pocos estudios que hayan examinado los posibles cambios en la velocidad del viento en el período de retorno de 50 años y, los que se han llevado a cabo, utilizan generalmente la distribución de Gumbel para representar la distribución de probabilidad de velocidades de viento extremas.

Como indicadores para la evaluación de este parámetro se podrían considerar (88).

- La intensidad de los vientos extremos se puede caracterizar a partir de las mediciones de la velocidad del viento realizadas cerca de la superficie (10 m.). En concreto, se pueden analizar los picos de la velocidad promediada en periodos de 1-3 segundos (aún representa un gran reto para la ciencia del clima, aunque se están desarrollando e implementando nuevas parametrizaciones de ráfagas basadas en la física en los RCM), la velocidad media promediada en intervalos de 10 minutos-1 hora(86) o los percentiles (p. ej., 90-98) de los máximos diarios de velocidad.
- Las bajas presiones siempre se asocian con altas intensidades de ciclón. Así, la intensidad los ciclones extratropicales se pueden caracterizar por la profundidad del centro de presiones a nivel del mar o por el mínimo de presión relativa a la altura geopotencial de 1000 hPa. Medidas alternativas de la intensidad de un ciclón son la magnitud de la vorticidad, la intensidad de la precipitación o la velocidad del viento.
- La frecuencia de los ciclones (número de ciclones en la localización seleccionada), expresando los cambios en este parámetro respecto a la situación actual como cambios en el período de retorno.

Hielo: de acuerdo con la referencia la formación de hielo puede dar lugar a pérdidas de producción, fatiga en los componentes del aerogenerador y problemas de seguridad. A partir de un 10% de días de hielo al año se producirían pérdidas de producción no desdeñables (>5%) (89). Esta reducción de producción anual depende de la cantidad de hielo, siendo recomendable disponer de información actual y futura detallada sobre la velocidad y dirección del viento, la temperatura, número de días helados anuales y la duración y cantidad de hielo acumulado. A falta de información detallada, existen reglas generales que dan valores aproximados de reducción de producción anual, aunque no se conocen modelos que permitan caracterizar este impacto de manera adecuada.

➤ **Tabla 14** Valores aproximados de pérdida anual de energía causada por heladas

Frecuencia de helada (días/año)	Pérdida anual de energía
< 1	Insignificante
1-10	Pequeña
10-30	5-15%
30-60	15-25%
> 60	> 25%

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

6.2.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad

Para el análisis de vulnerabilidad de un parque eólico, no se ha detectado una metodología única y comúnmente aceptada ni herramientas como tal, pero sí varias aproximaciones metodológicas que siguen una filosofía similar (ver Estado del Arte en el Tomo 2). De acuerdo con la Tabla 12, este análisis implicará, fundamentalmente, la evaluación del efecto del cambio climático sobre la producción de energía y sobre la infraestructura (diseño, operación y mantenimiento). En la tabla siguiente se presenta la secuencia metodológica propuesta.

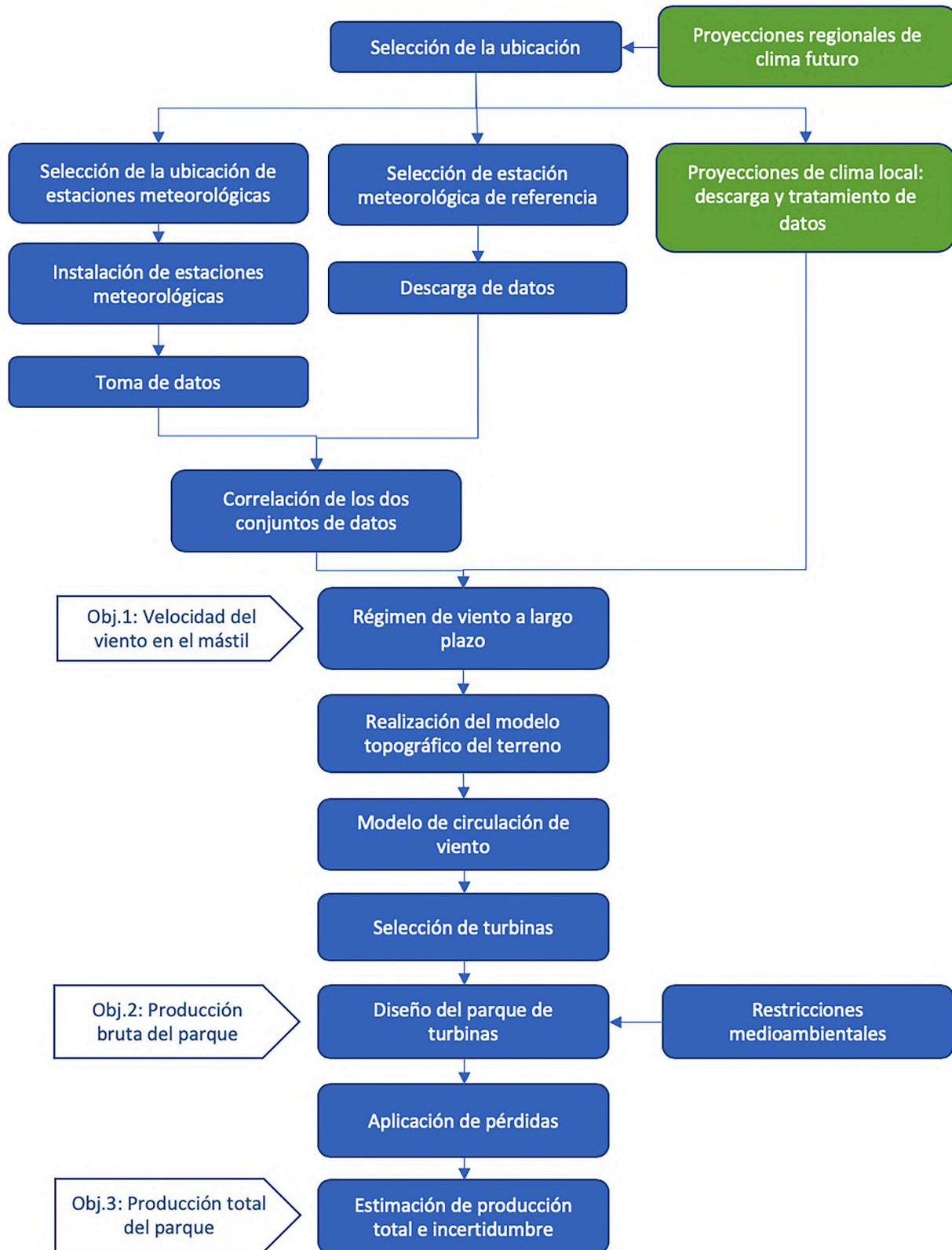
► **Tabla 15:** Fases para la evaluación de la sensibilidad de un proyecto eólico

Evaluación del impacto del CC sobre la infraestructura		
1	Cambios en el diseño del proyecto.	<p>De acuerdo con el apartado anterior, son las condiciones de viento extremo y hielo las que podrían tener un mayor impacto en el proyecto.</p> <p>Una mayor frecuencia e intensidad de estos eventos extremos podrían originar daños directos puntuales pero, sobre todo, tendrán mayor impacto en la carga mecánica a soportar por la infraestructura y en la frecuencia de las tareas de mantenimiento. La evolución prevista de estos parámetros obtenida en el Paso 2, podría condicionar, por tanto, la ubicación y diseño de la instalación y las condiciones de operación.</p> <p>Es una práctica común considerar que estos valores sean independientes de la evolución del clima, sin embargo, siempre que se disponga de datos, se recomienda valorar los cambios que podrían producirse a lo largo de la vida útil del proyecto y evaluar si esta aproximación es adecuada. Para ello, se modificaría la secuencia metodológica de diseño del proyecto para incluir esta evolución, tal y como se observa en la Figura 36, donde se muestra en qué puntos del proceso de diseño se introducirían las consideraciones de cambio climático.</p>
Evaluación del impacto del CC sobre la producción de energía		
2	Estimación de la producción energética de la turbina.	La producción energética de la turbina dependerá de los recursos disponibles, de las condiciones de funcionamiento y de la propia turbina (tipo de turbina, área barrida por las palas y eficiencia de conversión).
2.1	Densidad energética del viento (WED- <i>Wind Energy Density</i> , W/m ²).	<p>Mide la energía cinética contenida en el viento y se usa comúnmente para evaluar las implicaciones de los cambios de velocidad del viento cerca de la superficie para el recurso de energía eólica.</p> $WED = \frac{1}{2} \times \rho \times U^3$ <p>donde U es la velocidad del viento a la altura del eje (m/s) y ρ la densidad del aire (kg/m³).</p> <p>Para realizar los cálculos a futuro, será necesario disponer de proyecciones de densidad del aire. Ésta depende de la humedad, la temperatura y la presión, reduciéndose con el incremento de la temperatura. Es posible realizar cálculos a partir de la temperatura y la presión del aire (90). A falta de esta información, se consideraría el valor actual como constante.</p> <p>La medición de la presión del aire en el sitio es deseable, pero a menudo no es esencial, por lo que no siempre se dispone de datos de este tipo (77).</p> <p>Este método no tiene en cuenta el rango de funcionamiento de las turbinas y su eficiencia. Para tenerlo en cuenta, ver paso 3.2.</p>

Evaluación del impacto del CC sobre la producción de energía		
2.2	Energía eólica extraíble (EWP- <i>Extractable Wind Power</i> , kW).	<p>La energía que podrá llegar a extraer la turbina se obtendría por la multiplicación del WED por el área barrida por las palas de la turbina. Sin embargo, este cálculo no tendría en cuenta el tipo y características particulares de la turbina empleada (62).</p> <p>Es necesario realizar la conversión entre el recurso eólico y la energía generada teniendo en cuenta las curvas, eficiencias, etc. del proyecto concreto objeto de estudio, y empleando el "paso de tiempo" más reducido posible. Se parte de los datos reales de la turbina que se emplee en el proyecto, empleando la curva de potencia de turbina proporcionada por el fabricante.</p> <p>En su defecto, se podría emplear una curva de potencia de turbina estándar. En este último caso, los datos de la turbina estándar se normalizan por la potencia nominal de la turbina y se escalan según la potencia nominal de las turbinas que se consideran en el proyecto.</p> <p>La energía generada por la turbina depende principalmente de la velocidad el viento, pero también varía con la temperatura ambiente y la presión. Valores diferentes de estas variables proporcionan diferentes curvas de potencia. La evolución de estas variables se podrá tener en cuenta según la referencia (84).</p> <p>Cuando se usan las distribuciones Weibull para representar las series de tiempo de la velocidad del viento, la producción anual se puede calcular utilizando la suma del producto de la función de densidad de probabilidad de Weibull (la fracción de tiempo que las velocidades del viento están en un nivel dado) con la curva de potencia del parque eólico (que indica la potencia de salida para esa velocidad dada). Como la curva de potencia no es paramétrica, esto se hace más fácilmente como una suma discreta, evaluada a las velocidades para las cuales se define la curva de potencia (62).</p> <p>Más abajo se muestra un ejemplo de cómo se podría calcular la producción eólica en un escenario climático concreto. (Figura 37)</p>
3	Cambios en la energía extraíble respecto al periodo actual.	<p>El porcentaje de cambio en la velocidad promedio del viento se calcula para cada estación por década para cada celda de la cuadrícula en el dominio. Con ello, se calcula la generación de energía para la década base y los escenarios futuros para el parque eólico. Después se obtiene el porcentaje de cambios en la producción de energía por década por comparación con la década base. Ver (82).</p> <p>Las estimaciones incluyen velocidades mínima y máxima de funcionamiento de la turbina. Sin embargo, no tienen en cuenta las prácticas operativas de los operadores (mantenimiento, etc.) ni las restricciones de los operadores de la red. Estos factores son desconocidos en el futuro.</p>

> Fuente: Elaboración propia.

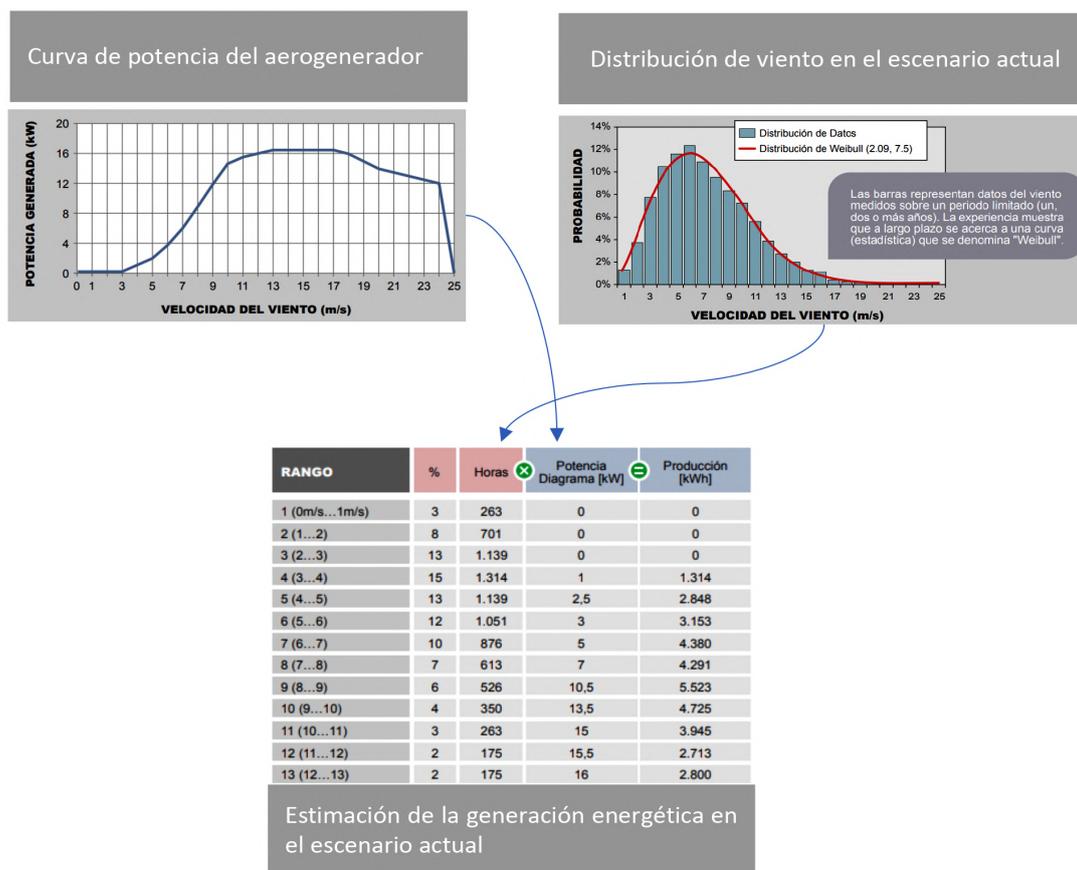
➤ **Figura 36:** Secuencia metodológica de diseño de un proyecto de infraestructura eólica con consideraciones de clima futuro



➤ **Fuente:** Elaboración propia basada en "Wind energy. The facts" (77) Fuente original: Garrad Hassan.

De todos los aspectos considerados anteriormente, el que tendrá un impacto en todos los proyectos será el cambio en el recurso disponible. A continuación, se muestra un ejemplo de cómo se podría **calcular la producción eólica en un escenario climático cualesquiera**. Es preciso tener presente que, para cada escenario estudiado, el análisis de la generación estimada de los proyectos eólicos tiene en consideración una distribución probabilística de las intensidades de viento. Si se modifica la misma considerando escenarios de cambio climático, es relativamente directo evaluar los riesgos vinculados al clima, al menos para este aspecto.

Figura 37: Ejemplo de metodología de cálculo de la producción eólica en un único escenario climático



Nota: La imagen refleja el cálculo de la energía generada para una distribución determinada de probabilidad de las velocidades del viento. En caso de considerar que el cambio climático alterará esta distribución, sería posible repetir el ejercicio con las condiciones climáticas previstas en el futuro (es decir, en otro escenario climático). La diferencia entre ambos escenarios permitiría valorar las consecuencias de ese escenario climático sobre la generación.

Fuente: elaboración propia a partir de "Energía Eólica -Guía Técnica"(91)

Cabe desatacar el elevado interés evaluar las opciones de adaptación en estas etapas de diseño. La capacidad de adaptación de los proyectos durante el mismo es más elevada al poderse modificar aspectos cruciales como alturas, tipo de aerogenerador, etc. Limitar los impactos anteriormente comentados durante la operación y mantenimiento es muy complejo.

6.2.4 Paso 4: Evaluación del riesgo

El riesgo es considerado como función de la probabilidad (relacionado con la amenaza) y la consecuencia (relacionado con la exposición y vulnerabilidad). En este caso, al igual que en el sector fotovoltaico, el análisis de riesgos de este tipo de proyectos puede abordarse en muchas ocasiones desde una perspectiva cuantitativa, estableciendo la posibilidad de relaciones entre los diferentes parámetros clave, en este caso el cambio en el régimen de viento y la producción eólica. Para ello, para cada uno de los escenarios estudiados se establecerá:

- una probabilidad de que acontezca el mismo.
- unas consecuencias de su materialización, que serían fundamentalmente, para el proyecto, cambios en su rendimiento financiero (sintetizado en el LCOE u otro indicador) y, desde un planteamiento más general, las consecuencias que estos escenarios podrían tener para la población atendida y el sistema energético en su conjunto (por ejemplo, incremento de los costes de la energía, caída el suministro, etc.).

Las consecuencias en el rendimiento financiero pueden sintetizarse en el **LCOE (Levelized Costs of Energy)**, un indicador de tipo financiero que proporciona el costo por unidad de producción de energía (USD/MWh). Se trata de un término que depende de la retribución obtenida por la producción anual, los costos de capital (CAPEX) y los costos de operación (OPEX) (ver detalle en el apartado 5.1). Si bien es también posible aplicar la misma para calcular cualquier otro indicador de refleje el atractivo financiero del proyecto (TIR, VAN, etc.) se propone este indicador porque facilita la comparativa de costos de las diferentes tipologías de proyectos de generación eléctrica.

Las principales suposiciones que se realizan a la hora de calcularlo guardan relación con la elección de la tasa de descuento, el costo medio del sistema (costo del sistema, incentivos y método de financiación), la vida útil promedio del sistema y la degradación de la generación de energía a lo largo de la vida útil de la instalación.

► **Tabla 16:** Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto eólico

Evaluación de la probabilidad de ocurrencia		
1	Evaluación de la probabilidad de los escenarios analizados.	<p>Como hemos indicado anteriormente, la evaluación del riesgo implica un análisis probabilístico de diferentes evoluciones plausibles del clima y sus consecuencias en la viabilidad del proyecto. Como se viene indicando en todo el documento es interesante que estos escenarios climáticos se combinen con escenarios de otros aspectos determinantes o “drivers”, que en el caso de la energía eólica serían precio de venta de la energía, el costo de oportunidad/financiación, etc.</p> <p>Aunque se expone más detalladamente en el apartado 4, merece la pena resaltar que establecer una probabilidad para cada uno de los escenarios (climáticos y no climáticos) es ciertamente complejo. Por ejemplo, ante la falta de elementos de decisión acerca de porque cualquiera de los RCP existentes podría tener más posibilidades de acontecer en el futuro, lo que generalmente se considera más adecuado es asumir que los mismos son equiprobables. En cuanto otros aspectos de los escenarios climáticos, como la selección de aquellos modelos de entre todos los que integran CMIP5 que son más acertados, las técnicas de regionalización o ajuste de sesgo a la ubicación concreta del proyecto más adecuadas, etc. también es complejo y se recomienda una combinación de las salidas de diferentes modelos.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre el servicio dado		
2	Evaluación del efecto sobre la calidad del servicio.	<p>Aunque difícil de cuantificar económicamente, la calidad del servicio dado a la sociedad es un parámetro que permite ponderar las consecuencias de la materialización del riesgo climático. Cuanto mayor sea la población afectada, mayores serán las consecuencias y por tanto el riesgo. Resulta, por tanto, recomendable tener en cuenta este parámetro y la evolución prevista en los diferentes escenarios que se analicen.</p> <p>También se puede tener presente que la energía eólica desplaza generalmente generación térmica, con mayor coste de generación. De este modo, puede que una reducción de la generación eólica genere un incremento de los precios de la energía, mientras que una mayor generación podría evitar recurrir a fuentes más costosas y reducir el precio global de la energía eléctrica.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre la retribución		
3	Evaluación de la retribución obtenida por la producción anual en los escenarios de estudio.	<p>Aunque no se observa una relación directa con el clima, el mantenimiento de las condiciones de retribución en el futuro de las energías renovables es un aspecto que depende en gran medida de la voluntad política y, por tanto, es incierto. Sin embargo, es un aspecto que condiciona la rentabilidad de proyectos, por lo que podría ser interesante considerar escenarios que introduzcan cambios en el esquema retributivo. Para los proyectos de autoconsumo, microrredes aisladas, etc. este aspecto puede no ser esencial y podría requerir del análisis de la casuística concreta.</p> <p>En general, en un análisis puramente climático, el mantenimiento de las condiciones actuales de ingresos por kWh entregado a la red podría ser una aproximación adecuada. Una aproximación alternativa sería considerar diferentes hipótesis razonables en este sentido.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre el CAPEX		
4	Evaluación de la diferencia de costo asociada a diseños adaptados a las condiciones futuras.	<p>Recordemos que el CAPEX engloba costos de inversión relacionados con la infraestructura física (principalmente turbinas, pero también cimientos, conexión a la red y otros aspectos técnicos) que dependerán de la ubicación y de factores ambientales y socioeconómicos (clima, orografía, vegetación, distancia a la infraestructura esencial, altura del terreno, profundidad del mar, usos y precio del suelo, ...).</p> <p>Dado que se considera la velocidad del viento como parámetro clave de la metodología, la mayoría de las metodologías actualmente empleadas consideran unos valores de CAPEX específicos para la ubicación del proyecto, asumiendo que se mantienen constantes a lo largo del tiempo, dado que, en el largo plazo, no se ven modificados por los cambios que se producirán en el recurso eólico.</p> <p>Sin embargo, se considera importante analizar la exposición y evolución de los eventos extremos (viento extremo, hielo, ...) en los escenarios de futuro, de cara a evaluar si esta aproximación es adecuada. El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá adaptar el diseño del parque y guiar la selección de sus componentes. Esto puede tener impacto en:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costos de inversión inicial de los equipos y su instalación (turbina adecuada a las condiciones actuales y futuras, ajuste de las distancias de seguridad del parque y la colocación de aerogeneradores, estaciones meteorológicas adecuadas, etc.). • Costos asociados a sustitución de componentes por modificación de su vida útil en las condiciones futuras (carga de fatiga, etc.).

Evaluación de las consecuencias del CC sobre el OPEX

5	Evaluación de la diferencia de costo asociada a los gastos necesarios para la correcta operación de la instalación en las condiciones futuras	<p>Recordemos que el OPEX contempla costos relacionados con gastos de funcionamiento necesarios para una adecuada operación de la instalación.</p> <p>Como ocurría con el CAPEX, la mayoría de las metodologías actualmente empleadas consideran unos valores de OPEX específicos para la ubicación del proyecto, asumiendo que se mantienen constantes a lo largo del tiempo. Sin embargo, se considera importante analizar la exposición concreta del proyecto al cambio climático en función de sus características y la previsible evolución de los eventos extremos (viento extremo, hielo, ...) en los escenarios de futuro, de cara a evaluar si esta aproximación es adecuada. El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá determinar la evolución de estos costos y realizar ajustes en la rentabilidad a largo plazo de la instalación (costos vs. ingresos por producción). Podrán verse alteradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La producción, debido a los cambios que se produzcan en el clima (tal y como se ha observado, cambios de viento, densidad, etc.). • Los costos de mantenimiento y reparación de equipos (en condiciones adversas, éstos podrían aumentar debido a bajas temperaturas, mayor tiempo de inactividad entre las reparaciones en caso de inaccesibilidad de la instalación, etc.). • El costo de los seguros (si se intensifican los eventos extremos, este costo podría aumentar).
---	---	---

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

A partir de esta información, se estimaría el LCOE (u otros indicadores del atractivo del proyecto como VAN, TIR, etc.) en cada uno de los escenarios manejados.

En cuanto a la evaluación del efecto del cambio del rendimiento del proyecto en el conjunto del sistema o en la sociedad, para proyectos eólicos conectados a la red general de transporte de energía eléctrica es ciertamente complejo estudiar las repercusiones. En casos en los que el proyecto atiende a una población o actividad concreta, esto se simplifica y podría ser abordado confrontando las alteraciones de la generación con la demanda estimada.

6.2.5 Resumen de componentes de riesgo

La siguiente tabla resume cómo se definen los diferentes componentes de riesgo en un proyecto de diseño de infraestructura eólica, en base a la información presentada en los apartados anteriores.

- La primera columna “Componente del riesgo”, muestra los diferentes componentes del riesgo (amenaza, exposición, etc.).
- En la segunda columna “Aplicación en proyectos de infraestructura eólica” se resumen los factores que pueden hacer que el proyecto de infraestructura se pueda ver más o menos afectado por el cambio climático, organizados según el componente del riesgo sobre el que influyen: factores que determinan la exposición del proyecto al cambio climático, los que determinan su sensibilidad, etc.
- La última columna “Indicadores de cambio climático en proyectos de infraestructura eólica”, enumera los indicadores que habría que monitorizar para determinar si se está produciendo un cambio en el factor (de la segunda columna) y su potencial impacto sobre el proyecto.

Por ejemplo, un incremento en la frecuencia de las tareas de mantenimiento (indicador) indica que hay una tendencia a producirse mayores daños a la infraestructura (aplicación al proyecto) que obligan a incrementar las labores de mantenimiento o incluso, cambiar sus componentes con mayor frecuencia. Este sería un factor de sensibilidad del proyecto.

Como en el resto de sectores, es conveniente destacar que esta tabla solo pretende reflejar algunos aspectos clave para proyectos con unas características típicas (conectados a red, en zonas aisladas, etc.). Si el proyecto estudiado tiene alguna particularidad por su tecnología, ubicación (por ejemplo, en primera línea de la costa), cometido (por ejemplo, en el caso de que sea para autoconsumo), etc. es muy conveniente revisar y ampliar la misma.

Tabla 17: Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo climático en un proyecto de infraestructura eólica

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de infraestructura eólica	Indicadores de riesgo a considerar en proyectos de infraestructura eólica
Amenaza	Cambios en el recurso eólico.	Velocidad y dirección del viento. Niveles de turbulencia. Temperatura. Humedad. Densidad del aire (temperatura, presión). Usos del suelo (vegetación, rugosidad de la superficie).
	Cambios en la eficiencia de la turbina.	Temperatura ambiente, presión.
	Cambios en frecuencia y/o intensidad de eventos extremos que pueden afectar a la infraestructura.	Heladas (temperatura ambiente y humedad). Inundaciones (en zonas costeras). Ambientes corrosivos (salinidad, humedad y presencia de partículas abrasivas).
Exposición	Instalaciones e infraestructura del proyecto eólico.	Componentes y características técnicas de la instalación y su adecuación a la evolución de las variables climáticas Cambio en la frecuencia de las tareas de operación y mantenimiento (revisión de equipos mecánicos y eléctricos, limpieza de palas y otros componentes del sistema). Alteración de la vida útil de la instalación por cambios en el ritmo de desgaste.
	Sistema energético.	Cambio en el rendimiento del proyecto ante diferentes condicionantes de operación del proyecto eólico (regulación, demanda, etc.). Variación de la cantidad de energía producida ante eventuales cambios de las condiciones climáticas.
Sensibilidad	Cambios en el entorno del emplazamiento.	Evolución de la rugosidad del terreno en las inmediaciones de la instalación, posibles nuevas edificaciones que generen estelas y otros cambios que modifiquen el recurso eólico.
Capacidad Adaptativa	Diseño de la infraestructura.	Adecuación de los componentes y particularidades de la instalación a las características del sitio y la evolución de las variables climáticas (altura, orientación, modelos de aerogeneradores, distribución de los mismos, sistemas anti-hielo, sistemas de control adecuados (control de la potencia mediante cabeceo, bloqueo activo o RPM variables), sistemas de orientación, ...).
	Características socioeconómicas del proyecto.	Evolución de los recursos económicos: rentabilidad, flujo de caja que generará el proyecto, evolución de las políticas retributivas (ingresos por cada kWh aportado a la red eléctrica para los proyectos conectados en red). Estos indicadores determinan la capacidad para poder implementar medidas de adaptación, diseños más resilientes, pautas de operación adaptadas al cambio climático, etc.

Fuente: Elaboración propia.

6.3 Hidroenergía

El sector hidroeléctrico es uno de los más vulnerables al cambio climático, ya que la generación de energía hidroeléctrica está directamente condicionada por las variaciones que el cambio climático produce en los sistemas hídricos.

Además, las proyecciones climáticas disponibles prevén que varíe no solo la ocurrencia de fenómenos extremos, sino también los valores climáticos medios esperados, por ello, es importante, entender como estos cambios esperados, pueden impactar en nuestro sistema y ser capaces de tomar las medidas de adaptación más apropiadas.

Los pasos propuestos para analizar los proyectos hidroeléctricos se resumen en:

- Contextualización del proyecto: conocimiento de sus características básicas de diseño, ubicación, etc., pero igualmente importante en este tipo de proyectos es conocer la cuenca aportante, otros proyectos y usos que detraigan recursos hídricos, condicionantes de operación, etc.
- Caracterización del clima de la cuenca aportante: estudiando principalmente precipitación y temperatura.
- Generación de escenarios climáticos para estas variables.
- Evaluación del recurso hídrico y su evolución en las próximas décadas, así como de las variables climáticas que tienen impacto en el rendimiento de la instalación (por ejemplo, los sedimentos pueden ser muy importantes en algunos proyectos).
- Cálculo de la energía generada en diferentes escenarios climáticos.
- Cálculo del impacto económico que el cambio climático puede tener en otros aspectos de la operación de la planta: colmatación de embalses, desgaste prematuro de turbinas, etc.
- Cálculo de LCOE u otros indicadores para evaluar la rentabilidad o atractivo del proyecto bajo escenarios de cambio climático.

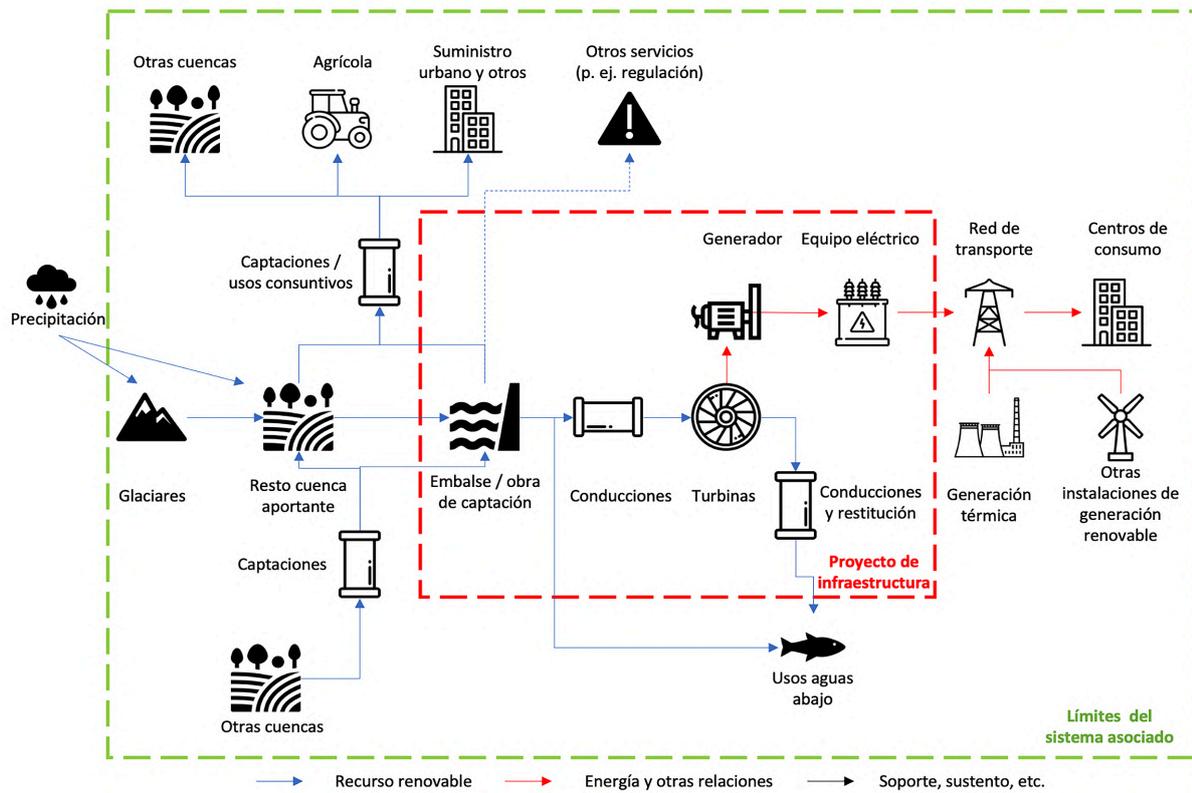
En ciertos proyectos donde los eventos extremos puedan ser importantes para la operación del proyecto se podría complementar esta secuencia con un análisis específico de la evolución de los eventos extremos a largo plazo (precipitación extrema, fuertes avenidas, etc.) y un estudio del impacto de los eventos extremos sobre la infraestructura o sobre su operación.

6.3.1 Paso 1. Contextualización del proyecto respecto al CC

Para analizar este tipo de proyectos, se puede llegar a definir un sistema a estudiar ciertamente amplio. Es importante que para que el análisis de riesgos no sea inabordable, se planteen las aproximaciones que permitan analizar cada uno de sus elementos con la profundidad necesaria. Además, es preciso destacar que, si bien para el análisis de riesgos puede ser interesante configurar un sistema muy amplio, se ha de ser consciente de que la capacidad de intervenir sobre el mismo es limitada. Un proyecto generalmente podrá tomar decisiones acerca del diseño de la central, tal vez intervenir con mediana intensidad en la cuenca y prácticamente no tendrá capacidad de intervención en el diseño global del sistema energético o, por ejemplo, en las demandas que agua que le impongan ciertos usuarios. No por ello, estos elementos deben ser excluidos del análisis de riesgos climáticos si se desea abordar con propiedad.

El contexto para la evaluación de riesgos climáticos de un proyecto hidroeléctrico podría definirse de manera esquemática como se representa en la siguiente figura. En ella se muestran los elementos a tener en cuenta de un proyecto hidroeléctrico típico, así como otros elementos externos que afectan al mismo y que se engloban en lo que denominaremos "límites del sistema asociado".

➤ **Figura 38:** Contexto de evaluación de un proyecto hidroeléctrico: propuesta de límites del sistema objeto de estudio



Este mapa conceptual permite mostrar los elementos que podrían estar expuestos a los efectos del cambio climático de forma directa o indirecta y delimitar cuáles de ellos se van a considerar dentro del alcance de la metodología planteada. No obstante, en función de las características del proyecto será necesario adaptar el contexto de análisis para recoger ciertas particularidades.

Aguas arriba de la central, el esquema muestra:

- **Las cuencas hidrográficas:** los recursos hídricos que se turbinan en un proyecto hidroeléctrico generalmente provienen del territorio que se encuentra aguas arriba del mismo (su cuenca aportante). No obstante, también pueden provenir de otras cuencas, alcanzando el proyecto (o su cuenca aportante) a través de conducciones artificiales. En ese caso, el aporte a la generación se encuentra afectado no solo por los caudales naturales que recorran esas otras cuencas, sino también por las características de las conducciones existentes y la capacidad de trasvase hacia la cuenca donde se encuentra el aprovechamiento hidroeléctrico.
- **Los glaciares:** En cuencas donde la hidrología se encuentra gobernada por glaciares o amplias zonas cubiertas de nieve se debe ampliar el contexto de estudio para que el análisis tenga en consideración cómo la evolución previsible de las temperaturas afectará a su retirada a lo largo del siglo XXI. Tal y como se detalla en el apartado de análisis de clima (4.1), existen modelos hidrológicos que cuentan con módulos específicos para analizar este aspecto.
- **Otros consumos:** Si bien existen aprovechamientos hidroeléctricos que cuentan exclusivamente con el objetivo de producir electricidad, muchos de ellos son multipropósito, y buscan aportar otros beneficios. En un importante número de estos proyectos los recursos hídricos del embalse o de la cuenca también tienen el objetivo de satisfacer consumos agrícolas, urbanos, etc. La evolución de los mismos puede tener una gran incidencia en el futuro del proyecto. Por ejemplo, si el crecimiento de una urbe o una zona de regadío sustrae en el futuro importantes recursos, la producción energética se puede resentir.

Aguas abajo, cabe destacar:

- **Usos aguas abajo:** en la gran mayoría de ocasiones, han de mantener unos caudales que garanticen el equilibrio ambiental y las funciones que los ríos aportan. En ocasiones se han de garantizar caudales por motivos ambientales, pero también para otros usos aguas abajo. En este sentido, la población ubicada en las cuencas tendrá una influencia directa en los usos del suelo, que tienen un impacto definitivo en el comportamiento hidrológico de las cuencas. Además, la sociedad impone una demanda de recursos hídricos por motivos diferentes a la generación energética, como es el abastecimiento urbano o el regadío³. No se pueden, por tanto, considerar las cuencas como “recolectores de agua” exclusivamente a disposición de las centrales, ya que su régimen de operación tiene que tener presente las demandas agrícolas, urbanas, etc. Es por ello por lo que conviene analizar la pertinencia de considerar en el diseño el desarrollo económico y social de la población en equilibrio con su preservación y la evolución de las demandas de recursos hídricos.
- **Control de inundaciones y avenidas:** aparte de almacenar el recurso hídrico para la generación hidroeléctrica, los embalses de muchos aprovechamientos tienen también por objetivo de controlar inundaciones y avenidas aguas abajo. Para cumplir con este objetivo, la operación de los mismos ha de estar ajustada a las probabilidades e intensidades de las avenidas, algo que muchas veces entra en conflicto con la optimización de la generación.
- **El sistema energético en el que se integra la planta hidroeléctrica:** Las centrales hidroeléctricas entregan energía al sistema en función de la demanda del mismo. También el sistema impone requisitos a las centrales en cuanto a la operativa (p.ej. reserva rodante, etc.) que también pueden tener que ser considerados a la hora de simular la operación de las plantas en un contexto de cambio climático. El sistema retribuye a las plantas con esquemas sumamente variables en los diferentes países. Si bien, en la mayoría de los casos, la retribución se encuentra mayoritariamente vinculada a la energía entregada, en el caso de grandes proyectos públicos existen otras variables que tienen un carácter determinante.

Siendo la sociedad en su conjunto la que determina la demanda global de energía eléctrica, el estudio de sus proyecciones es fundamental para conocer la previsible evolución del sistema energético.

Es importante tener presente que para satisfacer la creciente demanda el sistema energético evolucionará con el tiempo y no se puede considerar estacionario. Las posibilidades de adaptación a nivel del sistema, si bien son complejas y costosas, pueden aportar múltiples beneficios adicionales, incluyendo opciones que van desde la construcción de nuevas conexiones entre zonas excedentarias y deficitarias hasta una reducción general del consumo y/o las pérdidas. Desde la perspectiva de proyectos individuales, esta evolución del sistema energético en los próximos años también puede afectarles, modificando el precio al que se les retribuyen la energía, modificando las demandas de generación, etc.

La operativa depende en gran medida del tipo de central:

- en las centrales de filo de agua, sin reservorio, la situación es muy similar a las de las otras energías renovables anteriormente comentadas. Con carácter general estas plantas entregarán al sistema nacional de distribución de energía eléctrica toda la energía que les sea posible aportar. No cabe por tanto evaluar si la evolución del conjunto del sistema condiciona el proyecto, al margen de que, lógicamente, modifique los precios de retribución por la entrega de energía.
- en las centrales con embalse, la situación puede ser mucho más compleja de evaluar. En estas, el almacenamiento permite a la planta presentar un plan de operación que podría verse alterado si el conjunto del sistema energético se transforma. En sistemas energéticos donde la hidroenergía es importante puede que incluso el papel de diferentes centrales se vea alterada por cambios en la distribución global de lluvias en el país. De este modo, para estas plantas es posible que cambios en el sistema energético global no solo les condicione desde el punto de vista de alterar el precio de la energía, sino que también les pueda condicionar en que momentos deben despachar energía o almacenar el agua.

Aunque existen otros elementos expuestos a las amenazas climáticas, esta guía va a centrar el estudio en el propio proyecto hidroeléctrico (proyecto de infraestructura), donde en líneas generales, la cadena de transformación de la energía potencial en energía eléctrica (p.ej. equipamiento electromecánico, etc.) no ve alterado su rendimiento directamente por las variables climáticas (p.ej. el cambio de temperaturas afecta de manera muy reducida el rendimiento de la turbina, generadores, transformadores, etc.). En cambio, su operación se ve directamente condicionada por los caudales (líquidos y sólidos) que es posible captar para la generación, y que sí se verían afectados de manera apreciable por las variables climáticas (p.ej. cambios en la precipitación alterarían los caudales, condicionando la cantidad de energía que podría generar este equipamiento).

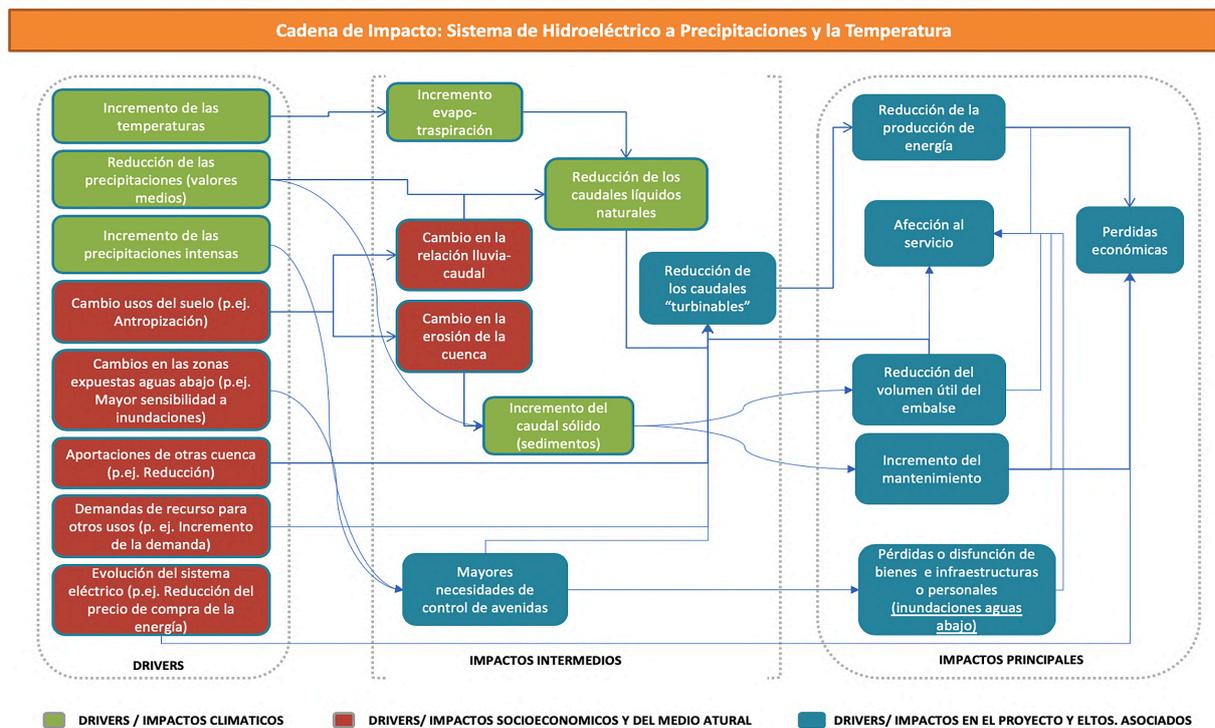
6.3.2 Paso 2. Identificación de amenazas y valoración de la exposición

Para abordar el análisis de que componentes del sistema estudiado se encuentra expuestos al cambio climático, teniendo presente que estamos ante un sistema amplio y complejo, será muy importante delimitar correctamente la configuración del mismo en función de las características concretas del proyecto estudiado y los recursos disponibles para estudiarlo.

³ Se ha de tener presente que el sistema energético también requiere el recurso hídrico en algunas plantas para refrigeración de las mismas.

Para la identificación de las amenazas y la valoración de la exposición del proyecto a las mismas, tras definir los límites del sistema estudiado y sus componentes, se debe generar la cadena de impacto para cada una de las amenazas que se consideren de interés para el proyecto. En la imagen siguiente presenta la cadena de impacto de un proyecto hidroeléctrico típico en base a la contextualización anteriormente indicada. Cualquier aspecto de los mostrados en la Figura 38 y que integran el sistema objeto de estudio, es susceptible de evolucionar y afectar al conjunto del sistema, pero, para simplificar la exposición, se ha optado por seleccionar los que es más probable que sufran evoluciones o tendencias que alteren el funcionamiento global. Es conveniente ajustar las cadenas propuestas al proyecto al que se aplica la metodología (p.ej. en embalses dependientes de glaciares habrá que añadir este aspecto y en proyectos de filo de agua, habrá que eliminar los aspectos relativos al embalse).

➤ **Figura 39:** Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos hidroeléctricos



Nota: Como en el resto de los diagramas de este tipo incluidos en este documento, se presenta para cada aspecto una evolución que mejor ejemplifica las relaciones, pero podría ser que la tendencia fuera la contraria. Por ejemplo, en algunas cuencas puede haber una tendencia al incremento de las precipitaciones, lo que implicaría mayores caudales natural, mayor recurso disponible, más generación, etc. Se muestran en verde los aspectos climáticos, en rojo otros aspectos que pueden tener un efecto significativo en el proyecto y en azul los impactos intermedios y principales.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Tal y como se observa, los principales impactos del cambio climático en este tipo de proyecto podrían agrupar en:

- a) **Impacto sobre la producción de energía.**
- b) **Impacto sobre el CAPEX (vida útil de la infraestructura).**
- c) **Impacto sobre el OPEX (operación y mantenimiento).**
- d) **Impacto sobre los ingresos/retribución del proyecto.**
- e) **Otros impactos.**

Para cada uno de ellos, a continuación, se describen las amenazas o “drivers” que pueden originarlos:

a) Impacto del cambio climático sobre la producción de energía

Tal y como se mencionaba anteriormente, en el análisis de riesgos asociados a centrales hidroeléctricas y otras instalaciones hidráulicas orientadas a la generación de energía eléctrica la principal amenaza climática viene generada directamente por los cambios que se den en el caudal líquido, que es el recurso que se explota y almacena para la producción de energía. En función de sus características (el tamaño de su embalse (o la ausencia de este), alturas, potencias, eficiencias, etc.) aprovechará de un modo u otro los caudales fluyentes para generar energía que entregará a la red nacional de transporte de energía. También los caudales sólidos (sólidos en suspensión, sólidos totales, etc.) arrastrados por el cauce son importantes, especialmente para algunas tipologías de proyectos como se expondrá a continuación. La central se verá afectada de diferente modo por las cargas de sedimentos que alcancen sus captaciones y embalses en función de sus características. Ambas variables climáticas (caudales sólidos y líquidos) pueden considerarse de segundo orden o dependientes de otras variables climáticas atmosféricas

“clásicas” como la precipitación o la temperatura. En otras fuentes se habla de “impactos intermedios” para referirse a este tipo de variables, pero, al margen de los términos que se empleen, los caudales son una variable para la que no existe actualmente una fuente robusta que aporte su previsible evolución a lo largo del siglo. Los modelos GCM y RCM, o no aportan información para estas variables, o bien esta es de muy baja resolución y no apta para estudiar impactos locales como es el caso de un proyecto hidroeléctrico.

El **caudal líquido** agrega en el espacio y en el tiempo la escorrentía superficial y el flujo subterráneo. En la mayoría de las cuencas, su evolución se encontrará regida fundamentalmente por la **precipitación** en la cuenca aportante, que es la variable generadora de los flujos hidrológicos. La temperatura y la evapotranspiración son asimismo claves en el ciclo hidrológico. La **evapotranspiración** es el flujo que transporta agua del suelo a la atmósfera. Esta se ve muy condicionada por la **temperatura** y, a su vez, condiciona el reparto de la lluvia entre infiltración y escorrentía, afectando a la velocidad de respuesta de la cuenca y por tanto a la cantidad de agua aprovechable. Otras variables climáticas como el viento, la humedad del aire o la radiación solar también se utilizan para mejorar las estimaciones de evapotranspiración. Sin embargo, su efecto es lo suficientemente leve como para poder limitar el análisis a la precipitación y la temperatura, y su efecto en los caudales.

Como ya se ha indicado, el caudal líquido también podrá verse muy influenciado por los glaciares y su deshielo, las captaciones hacia y desde la cuenca, consumos aguas arriba, etc. Este tipo de consideraciones dependerán del proyecto que se esté evaluando.

Por otro lado, la precipitación también tiene importancia en sí misma debido a que induce una parte importante de las pérdidas de suelo por erosión, y modula, por tanto, la cantidad de sedimento (**caudal sólido**) que alcanza los embalses. Dicho caudal sólido tiene un impacto directo sobre la capacidad de embalsado y la vida útil de la maquinaria, afectando a la operativa y rendimiento de las centrales hidroeléctricas. Los efectos del cambio climático sobre la colmatación de los embalses o el desgaste de elementos de la central generalmente no son estudiados en los análisis de vulnerabilidad climáticas.

b) Impacto del cambio climático sobre el CAPEX: vida útil de la infraestructura

Los proyectos hidroeléctricos se suelen diseñar considerando que tendrán que enfrentarse a ciertos caudales que es muy improbable que se registren durante su vida útil, tales como las **grandes avenidas** producidas por precipitaciones extremas. La mayoría de ellos resistirán sin daños (o con daños reducidos) caudales muy superiores a los caudales medios. Otro aspecto diferente es que, en los proyectos hidroeléctricos que cuentan con el objetivo de controlar inundaciones aguas abajo, una vez superada su capacidad de laminación se vean desbordados y tengan que liberar agua incluso aunque esto cause daños aguas abajo.

Por otro lado, el impacto del cambio climático se puede observar también en la vida útil de la infraestructura, que podrá verse afectada por los sedimentos que arrastre el agua (**caudal sólido**). Aunque la práctica totalidad de los proyectos hidroeléctricos cuentan con sistemas para limitar el flujo de sedimentos hacia las turbinas (desarenadores, desagües de fondo, efecto de decantación de los embalses, etc.), una fracción de sólidos en suspensión siempre es captada en los caudales destinados a generación. Esto puede causar un mayor desgaste de elementos como las turbinas, inyectores, etc. aunque sus efectos dependerán de la dureza de los sedimentos, su forma, etc. Como consecuencia, podría ser necesaria la sustitución de los componentes afectados con una periodicidad mayor.

c) Impacto del cambio climático sobre el OPEX: operación y mantenimiento

El OPEX contempla gastos relacionados con gastos de funcionamiento necesarios para una adecuada operación de la instalación, tales como seguro, mantenimiento y reparación de equipos (incluido cambio periódico de determinadas piezas), etc.

Como ya se ha observado, los **caudales sólidos** que alcanzan los embalses tienen un impacto directo sobre la capacidad de embalsado y la vida útil de la maquinaria por darse un mayor desgaste de ciertos componentes (turbinas, inyectores, ...). Esto puede afectar a la operativa de las centrales hidroeléctricas y dar lugar a mayores costos de operación y mantenimiento (mayor frecuencia de dragado y lavado de embalses, limpieza/rehabilitación de componentes afectados, mantenimientos mayores u “*overhaul*”, etc.).

d) Impacto del cambio climático sobre los ingresos/retribución del proyecto

Tal y como se describe detalladamente en el apartado 5.1, las centrales hidroeléctricas entregan energía al sistema en función de la demanda del mismo. El sistema retribuye a las plantas con esquemas sumamente variables en los diferentes países. Si bien, en la mayoría de los casos, la retribución se encuentra mayoritariamente vinculada a la energía entregada, en el caso de grandes proyectos públicos existen otras variables que tienen un carácter determinante. Es importante tener presente que para satisfacer la creciente demanda el sistema energético evolucionará con el tiempo y no se puede considerar estacionario. Desde la perspectiva de proyectos individuales, esta evolución del sistema energético en los próximos años también puede afectarles, modificando el precio al que se les retribuyen la energía, modificando las demandas de generación, etc. El mantenimiento del esquema actual de retribución para la energía generada es un aspecto que depende en gran medida de la voluntad política y, por tanto, incierto. En general, en un análisis puramente climático, el mantenimiento de las condiciones actuales podría ser una aproximación adecuada, aunque, en la medida en que se disponga de información, puede ser interesante combinar el análisis del riesgo climático (y los escenarios asociados) con la consideración de riesgos de cambio del esquema retributivo.

e) Otros impactos

Por otro lado, y afectado por varios de los *drivers* descritos, estaría el servicio que el proyecto da a la sociedad. Este servicio se verá afectado, principalmente, cuando la operación de la infraestructura se vea interrumpida, aunque su calidad también podría verse afectada en caso de pérdidas de producción. En este sentido cabe destacar que en algunos países y zonas la generación hidroeléctrica es clave para el aprovisionamiento de energía eléctrica. Reducciones significativas de la generación hidroeléctrica implicarían tener que incrementar la generación térmica o las importaciones lo cual generaría un incremento de los precios de abastecimiento de energía del conjunto del sistema.

La infraestructura hidroeléctrica tiene en muchas ocasiones otros usos como almacenamiento de agua para diferentes usos o control de inundaciones. El cambio climático puede alterar también estas funciones que se encuentran en la parte final de las cadenas de impacto.

Resumen de *drivers* climáticos y no climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura hidráulica

La siguiente tabla resume los parámetros mencionados y su impacto potencial sobre el proyecto, resaltando aquellos que pueden suponer un mayor impacto y merecen, por tanto, un análisis detallado.

Tabla 18: Variables que inciden en los proyectos de infraestructura hidroeléctrica y tipo de impacto

Elementos expuestos	Drivers climáticos (todos referidos a la cuenca aportante)			Drivers no climáticos				Impactos intermedios (todos referidos a la ubicación del embalse, captación, etc.)		
	Temperatura	Precipitación (cambio en las variables medias)	Precipitaciones fuertes y avenidas intensas	Usos del suelo aguas arriba	Demandas de re-curso y trasvases desde / hacia otras cuencas	Requerimientos de control de avenidas	Evolución del sistema eléctrico	Caudales líquidos (valores medios)	Caudales líquidos (fuertes avenidas)	Caudales sólidos
Embalse/captación	Menor recurso disponible a través de la evapo-transpiración	Determina el recurso hídrico disponible	Generación de fuertes caudales que alcanzan los embalses y otras infraestructuras	Erodibilidad de los suelos y por tanto, caudales sólidos Comportamiento hidrológico de la cuenca	Impacto en la disponibilidad de caudal líquido y por tanto en la capacidad de generación eléctrica	Mayor necesidad de regulación de caudales y control de avenidas		Impacto directo en la capacidad de producción hidroeléctrica	Reglas y procedimientos de operación de embalses para evitar daños aguas abajo.	Impacto en capacidad de embalses (colmatación)
Turbinas y equipos asociados										Desgaste en proyectos con alta carga de sedimentos
Equipamiento eléctrico										
Operación global del proyecto (rendimiento económico)							Impacto en la operación y retribución			
Servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio

En la imagen se destacan con color naranja oscuro los impactos de las variables climáticas y no climáticas que generalmente tendrán una mayor trascendencia. Con color naranja claro otros impactos que generalmente también tendrán importancia o que pueden llegar a ser muy significativos.

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, dentro de los parámetros climáticos, cabe destacar la variación de los **caudales líquidos** como la variable con un impacto más directo en la operación de la gran mayoría de proyectos. También los **caudales sólidos** son importantes en ciertas ocasiones (embalses con potenciales problemas de colmatación y turbinas con un elevado ritmo de desgaste). También los **caudales intensos** (asociados a fuertes lluvias) pueden ser importantes en proyectos destinados al control de inundaciones.

➤ **Tabla 19:** Principales *drivers* climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura hidráulica y tipo de impacto

<i>Driver</i> climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/Consecuencia
Precipitación Temperatura	Cambio en el régimen de caudales líquidos y sólidos.	Ver líneas siguientes.
Cambio en el régimen de caudales líquidos	Cambio en el recurso hídrico disponible y, por tanto, en la generación de energía.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto y en el servicio dado.
Cambio en el régimen de caudales sólidos	Cambio en la capacidad de embalse y, por tanto, en la capacidad de generación hidroeléctrica (colmatación o pérdida de capacidad de reservorio). Define las necesidades de mantenimiento y operación (frecuencia de sustitución y necesidades de mantenimiento y operación de elementos sometidos a desgaste por sedimentos (turbinas, etc.)).	Cambio en la capacidad de embalse y por tanto en su valor. Cambios en el rendimiento económico del proyecto/viabilidad y en el servicio dado. Integridad de la infraestructura - CAPEX - OPEX – rentabilidad del proyecto. Puede afectar al servicio.
Eventos extremos (caudales intensos)	Modificación y condicionamiento de la operativa de los proyectos (especialmente de aquellos con objetivos de control de inundaciones aguas abajo).	Cambios en el rendimiento económico del proyecto y en el servicio dado. Integridad de la infraestructura - CAPEX - OPEX (posibles cambios en los daños evitados o no evitados aguas abajo). Puede afectar al servicio.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Métodos y herramientas disponibles para hacer el análisis de las amenazas climáticas

En la tabla siguiente se sintetizan los métodos, fuentes de datos, modelos y demás herramientas para valorar las amenazas climáticas de los proyectos de este tipo.

➤ **Tabla 20:** Fases para la evaluación de las amenazas climáticas sobre el diseño de un proyecto hidroeléctrico

Evaluación del impacto del CC sobre el recurso y eventos extremos (análisis de las proyecciones climáticas)		
1	Distribución inicial de las principales variables que rigen el ciclo hidrológico.	<p>El clima del escenario base se define, principalmente, utilizando las observaciones de temperatura, precipitación y caudal a nivel nacional y local. La ausencia de escenarios de evolución de los caudales líquidos durante las próximas décadas con la resolución necesaria hace que la evolución de ambos parámetros deba ser estimada con simulaciones hidrológicas de mediana y alta resolución. Antes de poder analizar los escenarios futuros, el primer paso será construir y calibrar un modelo con los datos más recientes posibles. Esta simulación combinará diferentes datos de la cuenca (tipos de suelo, orografía, etc.) con variables climáticas (precipitación, temperatura, etc.) Para ello, será necesario generar una cartografía detallada de las principales variables climáticas que alimentarán el modelo.</p> <p>Los parámetros más importantes, además de las características de la cuenca, son la precipitación y la evapotranspiración, dependiente de la temperatura.</p> <p>Los caudales observados en un punto vienen condicionados por los procesos y características de todos los puntos de su cuenca vertiente, y por todos los eventos ocurridos dentro de una ventana de tiempo de duración igual al tiempo de concentración de la cuenca. Por ello es de suma importancia recopilar la información de mejor calidad posible, más actual y de mejor resolución espacial, respecto a las características de la cuenca para poder simular caudales que representen el comportamiento real de estos en el área de estudio. Esta información comprende, como mínimo: los <u>mapas de distribución espacial de tipos de suelo</u>, los <u>mapas de distribución de usos de suelo</u> y los <u>mapas de distribución de cobertura vegetal</u>. Para su obtención, se recurre normalmente de fuentes nacionales, habitualmente localizadas en distintos ministerios. Existen también fuentes regionales con información más detallada, si bien no siempre totalmente compatible con la información nacional.</p> <p>Es importante hacer un paréntesis en este punto para destacar diferentes casuísticas que se podrían dar y qué información sería más adecuada en cada caso:</p> <p>Cuando el análisis que se quiere realizar aplique tan solo a la operativa de una central o grupo de centrales en un área cubierta por una misma fuente de información regional, esta será preferible frente a la información nacional.</p> <p>En el caso de que se quieran realizar comparaciones entre centrales o regiones que no estén cubiertas por la misma información regional, habrá de utilizarse información de un nivel superior que cubra de forma homogénea ambas centrales o regiones. Comparar resultados generados con información heterogénea es poco iluminador y tiene un alto potencial de conducir a conclusiones erróneas.</p> <p>Si la información no está disponible, podrían emplearse bases de datos globales. Entre ellas se puede destacar la <i>Harmonized World Soil Database</i> v. 1.2 (92) para la caracterización de las propiedades litológicas y edafológicas de las distintas capas del suelo. Las propiedades que definen cada una de las tipologías de suelo se obtienen de la base de datos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Washington (93).</p> <p>Por otro lado, en este análisis inicial de las características de la cuenca, también es importante recopilar información relativa a las <u>características macroclimáticas de la zona de estudio</u>. Se trata de aquellas ligadas a grandes patrones atmosféricos que controlan el clima de la zona de estudio, como puede ser la alternancia de estaciones, la existencia de una estación seca y otra húmeda, la afección de vientos alisios, el Monzón, la ocurrencia de ciclones tropicales, el fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur, entre muchos otros. Estos patrones imponen un comportamiento general que va a influir en las características locales de la zona de estudio. Además, los cambios y fluctuaciones de estos patrones suelen estar muy estudiados en la literatura científica por lo que es posible evaluar de forma sencilla los efectos que tenga sobre el riesgo climático la modificación de estos patrones en el corto, medio y largo plazo.</p> <p>En caso de disponer de más información, pueden construirse modelos hidrológicos más complejos y capturar mejor las distintas dinámicas y sus posibles interacciones. Alguna de la información de detalle que podría mejorar los modelos incluye: datos sobre <i>leaf area index</i> (LAI), profundidad de raíces, distribución y propiedades de los horizontes edafológicos, etc. No hay que olvidar que, para poder evaluar adecuadamente los efectos del cambio climático, los modelos utilizados deben estar basados en las ecuaciones que mejor describan los procesos físicos que controlan los flujos hidrológicos, puesto que estas dinámicas, los procesos subyacentes, son estables frente al cambio climático, y por tanto cualquier modelo que capture adecuadamente estos procesos, podrá predecir su comportamiento bajo las condiciones modificadas del cambio climático.</p> <p>Para poder abordar una caracterización acertada de la climatología de la cuenca será clave contar con una buena red de estaciones termopluviométricas distribuidas por toda ella y que cada una de estas estaciones tenga series de calidad (ver detalle en la fase 3, Simulación y calibración de un modelo hidrológico). Para completar los huecos que se puedan presentar dentro de estas series e interpolar los valores a toda la cuenca es posible aplicar diferentes técnicas que se describen en el apartado 4.</p> <p>La información a nivel nacional se puede obtener habitualmente de las agencias o instituciones meteorológicas nacionales del país al que pertenezca el área de estudio. En algunos casos la información hidrológica está controlada por algún Ministerio. Siempre que sea posible ha de trabajarse con esta información oficial, ya que es la que alimenta los modelos globales de circulación y por lo tanto la que se considera como de referencia.</p>

Evaluación del impacto del CC sobre el recurso y eventos extremos (análisis de las proyecciones climáticas)

1	Distribución inicial de las principales variables que rigen el ciclo hidrológico.	<p>La información local específica para la cuenca o la central se obtiene a partir de las operadoras de las centrales o los organismos públicos de cuenca. Esta información suele tener mejor resolución espacial y temporal que la de ámbito nacional pero, por el contrario, suele tener una cobertura temporal más reducida. Sin embargo, es interesante porque puede servir para encontrar relaciones entre distintos puntos de la cuenca y aplicar estas relaciones a la información de ámbito nacional para obtener estimaciones en localizaciones donde no se dispone de información.</p> <p>Existen además otras bases de datos globales que proporcionan información de diversas variables climáticas. Entre ellas se pueden destacar la BBDD de precipitación diaria histórica global de la NASA (Menne, Durre, Vose, Gleason, & Houston, 2012) y la Global Historical Climatology Network (GHCN) de la NOAA. Ambas están basadas en información histórica de observaciones. También puede hacerse uso de información de satélite, con BBDDs como la Global Precipitation Measurement de la NASA, que es la evolución de la más conocida Tropical Rainfall Measurement Mission de la NASA y la JAXA. Finalmente, pueden utilizarse datos de reanálisis, para lo que se recomienda considerar la base de datos CFSR de NCAR.</p>
2	Generación de escenarios climáticos para la cuenca estudiada.	<p>En la siguiente fase para la evaluación del riesgo derivado del cambio climático es necesario actualizar las dinámicas climáticas, principalmente la temperatura y precipitación, y utilizarlas para informar al modelo y derivar los cambios en el caudal, que son la variable que controla la producción hidroeléctrica. El primer paso consiste, por tanto, en recopilar la información de proyecciones de precipitación y temperatura de los modelos climáticos. Como sucede con casi la totalidad de variables, las primeras bases de datos a consultar son las oficiales. Las Terceras Comunicaciones Nacionales son la referencia para cualquier estudio de riesgo climático ya que estas proyecciones se generan realizando las correcciones necesarias y aplicando los métodos de reducción de escala que permiten utilizar las salidas de forma sencilla en el análisis de riesgo.</p> <p>En el caso de no disponer de información de estas Terceras Comunicaciones Nacionales se recurrirá a otras fuentes, como por ejemplo la base de datos NASA <i>Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections</i> (NEX-GDDP) o la del proyecto CORDEX. Estas BBDDs proporcionan la información de salida de distintos modelos climáticos, que puede utilizarse para derivar las proyecciones de temperatura y precipitación bajo diversos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero y para todo el siglo XXI. Es importante resaltar que la información de estos modelos no debe nunca ser utilizada directamente para alimentar un modelo hidrológico, dado lo grosero de su resolución que origina errores sistemáticos que han de ser corregidos previamente a su utilización (ver técnicas en el apartado 4).</p> <p>La generación de escenarios climáticos futuros para la cuenca estudiada se realizará aplicando las técnicas indicadas en el apartado 4 (Análisis de la variabilidad climática y el cambio climático). En este apartado se describen diferentes opciones para, a partir de la caracterización de la situación actual abordada en el punto anterior, generar mapas de lluvias futuras para la cuenca estudiada y otras variables. En el caso de los proyectos hidroeléctricos, especialmente si el tema del control de avenidas e inundaciones no es relevante, no es especialmente interesante optar por las técnicas que se centran en el análisis de valores extremos. Aplicar metodologías que nos permitan capturar la evolución general de las precipitaciones a lo largo del año puede ser suficiente, especialmente en el caso de centrales con embalse.</p> <p>Se ha observado como los caudales sólidos (sedimentos en suspensión, totales, etc.) también son importantes de cara al análisis de la colmatación de los embalses o el desgaste de componentes sometidos a desgaste en aquellas centrales que cuenten con estas problemáticas. Junto a la precipitación, la evolución de los usos del suelo es determinante en el arrastre de sedimento. En la fase 2.1 se detalla el procedimiento a seguir para la obtención de la previsible evolución de los usos del suelo.</p>

Evaluación del impacto del CC sobre el recurso y eventos extremos (análisis de las proyecciones climáticas)

<p>2.1 Generación de escenarios de usos del suelo para la cuenca estudiada.</p>	<p>Los escenarios de usos del suelo se establecen en función de las tendencias de cambio actualmente detectadas, proyectándolas temporalmente en base a la información cartográfica que haya disponible. Esto modificará los parámetros de entrada correspondientes en el modelo. Se trabaja siempre que sea posible con información oficial (Ministerios, ...), valorándose que la información:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proporcione una cobertura lo más amplia posible de la cuenca, que minimice los vacíos de información. • Cuente con diferentes horizontes temporales, para evaluar la evolución de los usos del suelo por comparación entre las diferentes capas. • Provenga de la misma fuente de información que se haya empleado en el modelado hidrológico de la situación actual, lo que genera mayor coherencia en el análisis y evita conversiones entre clasificaciones diferentes. <p>En aquellos casos en los que no se disponga de información que permita valorar las tendencias pasadas de cambios de usos del suelo, existen otras opciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Emplear escenarios de cambio del uso del suelo como los aportados por las Rutas Socioeconómicas Compartidas o SSP (65). El principal problema de este planteamiento es que generalmente se aporta esta información a nivel del conjunto de la región y se han de adaptar a la cuenca concreta estudiada. • Emplear información acerca de deforestación, crecimiento urbano, etc. de otras fuentes. Por ejemplo, el mecanismo REDD+ ha generado horizontes y tasas de deforestación históricas y previstas para los próximos años. La información sobre crecimiento urbano es aportada muchas veces de manera dispersa por diferentes estudios. Esta información no va a permitir establecer tasas de cambio para todos los usos del suelo, pero se ha de tener en cuenta que si se capturan aquellas que tienen un mayor significado hidrológico (cambios de bosque a cultivo, de cultivo a urbano, etc.) es posible que sean suficientes para estimar tendencias generales, aunque no capturen aspectos secundarios (p.ej. aunque no nos permitan generar tendencias de cambio de un tipo de cultivo a otro). <p>Se comienza, por tanto, recopilando y trabajando con la información disponible en caso de que se requiera completar vacíos de información y/o unificar clasificaciones diferentes de las capas de cobertura y uso de la tierra.</p> <p>A continuación, se calculan y analizan las superficies que han experimentado cambios en los usos del suelo mediante la intersección de la información disponible de años consecutivos. Este análisis permite detectar tendencias. Para la interpretación de la información disponible, es importante resaltar que, en ocasiones, las tasas de cambio más importantes se dan entre categorías relacionadas o parecidas, como es el caso de diferentes tipos de usos agrícolas, diferentes tipos de bosques, etc. Asimismo, los valores presentados pueden estar recogiendo no solo cambios reales en los usos del suelo del territorio, sino también cambios en las técnicas y criterios seguidos para la elaboración de los diferentes mapas.</p> <p>En caso de tener muchas tipologías de uso del suelo, se recomienda agrupar en lo posible la información generada en categorías más amplias (por ejemplo, urbano, agrícola/ganadero, forestal, páramo, ...), facilitando así la detección de tendencias. Un ejemplo del tipo de análisis realizado se muestra en el caso piloto del Tomo 3.</p> <p>Dado que muchas veces, los patrones de uso de los suelos se deben en gran parte a la alteración antrópica de las cuencas, el siguiente paso analiza la relación entre las tendencias detectadas y el crecimiento poblacional. Se requieren para ello datos de población a nivel cantonal para los periodos del estudio.</p> <p>En el caso de que los municipios incluidos en el área de estudio comprendan tipologías muy diversas (desde grandes ciudades hasta municipios poco poblados) y usos del suelo muy diferenciados, se desaconseja su análisis conjunto. En estos casos, resulta más adecuado realizar una segmentación previa de los cantones en grupos con características más homogéneas.</p> <p>Tras observar cómo la variación poblacional puede explicar muchos de los cambios en los usos del suelo, el siguiente paso del análisis consiste en la generación de tasas de cambio de usos del suelo empleando este parámetro. Para ello, se comienza generando series de proyecciones de población a nivel cantonal para cada año múltiplo de 10 (2020, 2030, 2040, etc.). Mediante la comparación entre la evolución de la población durante un determinado periodo y las estimaciones de cambio para los periodos futuros es posible obtener unos factores de corrección que se aplican a las tasas de cambio inicialmente calculadas para dicho periodo y generar matrices de cambio de usos del suelo para todos los cantones y periodos estudiados.</p> <p>Con la información generada, es posible obtener una serie de mapas de usos del suelo para cada uno de los escenarios futuros. Para ello, se parte de las proyecciones de cambio en los usos del suelo y se asimilan a la probabilidad que posee una unidad de suelo para permanecer o cambiar a otro tipo de suelo para cada uno de los horizontes planteados.</p> <p>Después, partiendo del ráster (cuadrícula con resolución de 100 m) de uso de suelo en el último año para el que se dispone de cartografía de usos del suelo, se analizan para cada celda del área de estudio los valores de las ocho celdas adyacentes (izquierda, derecha, arriba, abajo y diagonales) y se recalcula una nueva probabilidad de cambio ajustado únicamente al valor de la celda y a la existencia o no de un uso en las celdas adyacentes. El resultado son los diferentes ráster de usos de suelo a tiempo futuro. La Figura 40 muestra un ejemplo de cómo se realiza este cálculo.</p>
---	---

Evaluación del impacto del CC sobre el recurso y eventos extremos (análisis de las proyecciones climáticas)

2.1 Generación de escenarios de usos del suelo para la cuenca estudiada.

➤ **Figura 40:** Ejemplo para el cálculo de probabilidades de cambio de los usos del suelo

CELDA EJEMPLO			3	3	5						
			3	5	5						
			1	1	5						
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
¿EXISTE EL TIPO DE SUELO?			SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO
PROBABILIDAD DE CAMBIO			0,05	0,00	0,01	0,00	0,91	0,01	0,00	0,00	0,00
PROBABILIDAD DE CAMBIO AJUSTADA			0,051		0,010		0,928				

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Para finalizar, se **analiza la superficie de cambio** de cada una de las subcuencas, tanto para cada tipo de suelo como de manera generalizada, obteniéndose, para los diferentes horizontes temporales, mapas que reflejan la tasa de cambio en superficie de usos de suelo por subcuenca.

3 Simulación y calibración de un modelo hidrológico.

Una vez obtenidas las series de caudal observado, y tras un análisis de su calidad, estas se utilizan para la calibración del modelo hidrológico. Una vez calibrado, el modelo hidrológico es capaz de aproximar las respuestas de la cuenca a diversos cambios en las variables climáticas y en la distribución de usos del suelo o la cobertura vegetal. Es por tanto un sustituto de la cuenca sobre el que podemos realizar experimentos para determinar la posible respuesta de la cuenca.

Las técnicas y modelos existentes para desarrollar un modelo hidrológico son muy numerosas y no es posible exponer aquí las particularidades de todas ellas. Se recomienda revisar el apartado 5.2 donde se exponen sus planteamientos generales. Existen diferentes modelos comerciales o de licencia abierta que son ampliamente utilizados por la comunidad especializada (94). Algunos de los modelos hidrológicos más empleados en la evaluación de los riesgos climáticos son HEC-HMS, SWAT, MIKE SHE, TETIS.

A la hora de aplicarlos al estudio de los riesgos climáticos de proyectos hidroeléctricos se ha de tener presente los siguientes aspectos:

- El empleo de modelos hidrológicos distribuidos o semidistribuidos puede ser de especial interés cuando en el marco del proyecto de análisis se vayan a considerar medidas en la cuenca.
- Aparte calibrar el modelo en diferentes puntos de la cuenca, es deseable que el mismo esté especialmente bien calibrado en los puntos donde nuestro proyecto captará los recursos.
- Los caudales líquidos (m³/s) en los puntos de captación o en los embalses son la variable clave para analizar el potencial hidroeléctrico, con el que guarda una relación prácticamente directa. Con carácter general, la resolución temporal requerida puede ser:
 - En el caso de las centrales con embalses de una capacidad significativa, disponer de una resolución diaria no es clave, ya que la central gestiona los recursos que le van llegando gracias al reservorio.
 - En cambio, en el caso de las centrales de pasada o sin embalse, trabajar con esta variable a nivel diario puede arrojar conclusiones muy diferentes al empleo de caudales medios anuales.
- La atención a los caudales extremos (aquellos que se registran cada varios cientos o miles de años) no es determinante para la estimación del potencial de generación de hidroenergía. Sí es, en cambio, un parámetro clave para el diseño de aspectos como los aliviaderos de azudes y otras obras. Generalmente se aborda considerando los registros históricos, pero existen experiencias en las que se consideran también las proyecciones de cambio climático.
- Los caudales sólidos (sedimentos en suspensión, totales, etc.) son importantes para analizar la colmatación de los embalses o el desgaste de las turbinas y otros elementos sometidos a desgaste. En algunas centrales, que no cuentan con estas problemáticas, su estudio es innecesario. En otros casos, pueden también ser claves (embalses que ya presentan problemas de colmatación, intervenciones de repotenciación donde se ha apreciado un desgaste importante, etc.). En ese caso, un valor medio anual de la concentración de sólidos en suspensión podría ser suficiente.

4 Generación de escenarios hidrológicos futuros.

Una vez que se ha calibrado el modelo hidrológico descrito en el punto anterior, y que, por tanto, disponemos de un modelo que nos relaciona las variables atmosféricas con los caudales, la generación de escenarios futuros de caudales se abordará sustituyendo en el modelo los valores originales de precipitación, temperatura, etc. por los obtenidos de la fase 2 (Generación de escenarios climáticos para la cuenca estudiada). Con esto se generarán escenarios futuros de caudales. En este sentido, si se desea considerar el impacto combinado de los cambios del uso del suelo, también se podrán alterar los mismos como parámetros de entrada del modelo.

6.3.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad

Tal y como se ha explicado anteriormente, la vulnerabilidad de un proyecto de infraestructura depende de la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la capacidad para hacer frente y adaptarse. La sensibilidad es el grado en que el sistema de estudio se ve afectado de forma positiva o negativa por la variabilidad de las variables climáticas. A continuación, se detalla los factores que afectan a la sensibilidad asociada a cada uno de los elementos expuestos identificados en el apartado anterior.

► **Tabla 21:** Fases para la evaluación de la sensibilidad ante el cambio climático de un proyecto hidroeléctrico

Evaluación del impacto del CC sobre la infraestructura		
1	Efecto de los caudales elevados sobre la infraestructura hidroeléctrica.	<p>Generalmente la infraestructura vinculada a los proyectos hidroeléctricos (obras de derivación, embalses, etc.) es diseñada con el objetivo de hacer frente a avenidas o grandes caudales que no cabe esperar en largos periodos de retorno. El diseño de los aliviaderos, alturas de los diques, etc. se aborda considerando periodos de retornos de cientos o miles de años, pero desde décadas se apuesta por maximizar los mismos(95). Por ello, el diseño de la infraestructura, muy orientado a garantizar la integridad de la misma y minimizar las catastróficas consecuencias que su fallo puede acarrear (que supone en ocasiones pérdida de vidas humanas), hace que se opte por diseños capaces de hacer frente a caudales extremadamente improbables. Además, en ocasiones los diseños contemplan que en caso de que estos caudales extremos de diseño sean superados, las zonas por las que la infraestructura desborde sean aquellas donde el daño potencial sea menor.</p> <p>La práctica común es que las decisiones de diseño vinculadas a estos elevados caudales se aborden considerando exclusivamente registros históricos o pasados(96), pero existe una preocupación creciente acerca de si la infraestructura diseñada con estos planteamientos, pese al gran margen de seguridad que suelen considerar, se encuentra adaptada al clima actual y futuro (97).</p> <p>Algunos accidentes ocurridos en los últimos años (Saddle Dam D en Laos, Hidroituango en Colombia, etc.) apuntan a que la vulnerabilidad de la infraestructura hidroeléctrica frente al cambio climático es especialmente elevada durante su construcción, por lo que debería de ser planificada considerando que durante esta fase podrían darse eventos extremos (lluvias especialmente elevadas) en combinación con imprevistos constructivos.</p>
2	Efecto de otros eventos extremos.	<p>Generalmente, la vulnerabilidad de estos proyectos frente a otros eventos extremos es muy reducida, aunque lógicamente, pueden afectar a las mismas como a cualquier otra infraestructura.</p>
Evaluación del impacto del CC sobre la producción de energía		
3	Estimación del comportamiento de los embalses.	<p>En el caso de que el aprovechamiento hidroeléctrico haga uso de uno o varios embalses, la evaluación de las proyecciones de producción hidroeléctrica requiere de un tratamiento más detallado, principalmente debido al efecto del agua acumulada en el embalse que limita y pospone los efectos de la falta de caudal en la producción hidroeléctrica. En las centrales con embalse, es conveniente considerar como se gestionará el mismo en los escenarios futuros, considerando las dinámicas estacionales que podrían verse alteradas. De este modo, podría ser que la gestión anual, mensual o diaria de los embalses se vea revisada para optimizar el aprovechamiento del recurso.</p> <p>Asimismo, las aportaciones de sedimentos generados junto a las proyecciones de caudales sólidos han de considerarse para evaluar los caudales máximos embalsables, ya que parte de la pérdida de producción hidroeléctrica será debida a la reducción de agua embalsada que reduce a su vez la capacidad de regulación de los embalses.</p> <p>Además, generalmente los embalses tienen el papel de controlar avenidas. En el caso de que las mismas fueran más o menos infrecuentes y abundantes, podrían alterarse las reglas de operación. No obstante, este es un aspecto que generalmente se encuentra regulado normativamente, y el margen de maniobra por parte de los operadores es muy limitado.</p> <p>Un aspecto que también puede ser importante es la colmatación de los embalses. Generalmente las modelizaciones hidrológicas aportan datos de mayor incertidumbre para las dinámicas de sedimentos que para las estimaciones de caudales líquidos. Aun así, ante estimaciones de que la carga de sedimentos que alcanzará el embalse se pudiera ver sensiblemente incrementadas, sería conveniente revisar si la vida útil del mismo se puede ver afectada por cambios en la pérdida de su capacidad útil.</p> <p>Para todo ello, se modela el embalse (o sistema de embalses) mediante un modelo de gestión, como el HEC-ResSim o el <i>software Aquatools</i>, que permita evaluar tanto las entradas como las salidas de los embalses, incorporando la información de las reglas de operación, los volúmenes del embalse y la colmatación de los embalses por aporte sedimentario. Estos modelos de gestión hídrica permiten incluir el efecto de las reglas de operación o explotación del embalse, que son una herramienta esencial en la adaptación al cambio climático. La actualización de dichas reglas puede absorber parte de los cambios inducidos por el cambio climático y por tanto reducir los impactos.</p>

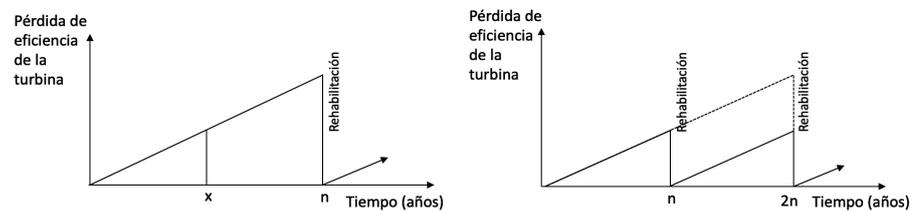
Evaluación del impacto del CC sobre la producción de energía

4 Estimación del desgaste de los elementos mecánicos.

Para que las características de las centrales se mantengan constantes y, por tanto, su capacidad para transformar el recurso hídrico en energía eléctrica no se vea alterada de forma sustancial por el cambio climático, será necesario que se realicen una serie de operaciones de mantenimiento, cuya frecuencia podría verse alterada por las dinámicas de sedimentos de las cuencas. Prácticamente todos los proyectos hidroeléctricos cuentan con sistemas para limitar el flujo de sedimentos hacia las turbinas (desarenadores, desagües de fondo, efecto de decantación de los embalses, etc.). Pese a ello, una fracción de sólidos en suspensión siempre es captada en los caudales destinados a generación, pudiendo causar desgaste de elementos como las turbinas, inyectores, etc. y pérdidas de rendimiento. Este fenómeno es muy variable en función de la limpieza del agua, la dureza de los sedimentos, etc. Si bien hay turbinas cuyos elementos más expuestos se estima que duren décadas, en otras se asume que presentarán un daño significativo en el plazo de 5-10 años.

Se hará necesaria, entonces, la rehabilitación de la turbina con una periodicidad de “n” años, tal y como se muestra en la Figura 41 (izquierda).

➤ **Figura 41:** Pérdida de vida útil de la turbina como función del tiempo y de la pérdida de eficiencia (izquierda). Influencia en la planificación de su frecuencia de rehabilitación (derecha)



➤ **Fuente:** “Sand Erosion in high head Francis Turbines. Technical consequences and costs”.

De acuerdo con la Figura 41 (derecha), la inversión asociada a la operación de rehabilitación o sustitución de la turbina en el periodo establecido en “n” años podría quedar compensada por el beneficio generado por el incremento del rendimiento obtenido en el siguiente periodo de rehabilitación y, consecuentemente, por el aumento de la productividad energética de la propia central hidroeléctrica, siendo el componente económico un aspecto crítico a tener en cuenta en el balance costo-beneficio de las operaciones de mantenimiento.

En estos casos, es conveniente por tanto analizar si se estima un cambio drástico en los sólidos en suspensión que podría ser causado, por ejemplo, por una mayor frecuencia de lluvias torrenciales en el futuro y valorar cómo se modificaría la frecuencia de planificación del *overhauling*. El punto de partida para este análisis será reunir la siguiente información para el año base:

- Número y tipo de turbinas instaladas.
- Potencia instalada (MW).
- Periodo de mantenimiento mayor, cambio de turbinas o *overhaul* previsto en el escenario actual (año base) (años).
- Ratio de desgaste, planteado como porcentaje de pérdida de vida útil anual de turbina en el escenario actual (%/año).

Para el cálculo de los cambios en el *overhaul*, se determinan las **variaciones de sedimentos suspendidos para los escenarios** que se manejan, calculando para ello, su porcentaje de cambio con respecto al periodo de referencia (%) y su desviación estándar (%).

A continuación, se podrá determinar el **desgaste** que se produce en las turbinas como consecuencia de ello. Diferentes modelos consultados establecen una relación lineal entre el desgaste o daño físico generado y la variación en la concentración de sólidos solubles, al menos, para bajas concentraciones (98). La literatura científica ha analizado el efecto erosivo de los sedimentos en distintos tipos de turbinas:

- Para la tipología de turbina Francis, el porcentaje de vida útil de la turbina se puede calcular en función del ritmo de desgaste actual y la relación entre la concentración de sólidos en suspensión futura y actual (ratio de erosión) (99).
- Para la tipología Pelton, se puede considerar la relación entre la pérdida de eficiencia y el ratio de erosión establecida en Bajracharya et al (100).
- Para la tipología Kaplan, de acuerdo con la referencia de Rai y Kumar (101), se puede considerar una relación lineal entre la concentración de sedimentos y el desgaste de la turbina.

Evaluación del impacto del CC sobre la producción de energía

4	Estimación del desgaste de los elementos mecánicos.	<p>Para la estimación del ratio de erosión periódico de la turbina, además de tener en cuenta la influencia de la variación de la concentración de sólidos en suspensión, es importante considerar el efecto de las variaciones de caudal que se proporcionan a la central hidroeléctrica. Es por ello que se emplea una variable compuesta por ambos factores que se ha denominado como “carga de sedimentos (g/s)”. Esta se estima multiplicando los valores promedio anuales de sólidos en suspensión (g/m^3) y de caudal turbinado (m^3/s).</p> <p>Como resultado de esta metodología se obtiene para cada escenario futuro:</p> <ul style="list-style-type: none"> La evolución a futuro del ratio de desgaste anual (% de la vida útil total), que se puede estimar como: $\text{ratio de desgaste año base} \times (\text{carga escenario} / \text{carga base})^b$ Siendo b el coeficiente establecido anteriormente según la tipología de turbina. La evolución a futuro de la frecuencia prevista del <i>overhaul</i> (años), a partir del ratio de desgaste anual ($100/\text{ratio de desgaste anual}$).
5	Estimación de la producción energética.	<p>Gracias a la modelización hidrológica será posible calcular los caudales hidrológicos en cada uno de los puntos de captación y embalses (si lo hubiera) del proyecto, tanto en el escenario actual como en diferentes escenarios futuros. Con ello, se estimarán las consecuencias de la modificación de estos caudales sobre la generación hidroeléctrica.</p> <p>La producción de energía se calcula considerando los parámetros técnicos de cada central, así como las series de caudales generadas a través de la modelación hidrológica, tanto para el escenario presente como para las próximas décadas. Los datos técnicos incluyen: potencia nominal (MW), número y tipo de turbinas, caudal de diseño para potencia nominal y caudal mínimo de operación de cada turbina (m^3/s), caudal ecológico (m^3/s), caída neta máxima (m), eficiencia de las turbinas a plena apertura, curva de rendimiento de las turbinas, eficiencia de los generadores y de la transformación y consumo para usos internos (kW).</p> <p>En teoría la potencia (P) de una máquina hidráulica (turbina) se calcula a través de la siguiente ecuación:</p> $P = \rho \cdot \eta \cdot g \cdot H \cdot Q$ <p>Siendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> P Potencia (W). η Eficiencia del sistema de conducción (conducción, tubería de presión, válvulas, turbina). g Aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$). H Salto bruto (m). Q Caudal (m^3/s). ρ Densidad del agua kg/m^3. <p>La energía producida (expresada generalmente en Wh o múltiplos como kWh) se determina, consecuentemente, multiplicando la potencia (P) por el número de horas en que ésta potencia se encuentra disponible. Para determinar la energía eléctrica entregada a la red se debe considerar no solo la energía generada por la turbina, sino que también se han de tener presentes la eficiencia del generador y transformador.</p>

Evaluación del impacto del CC sobre la producción de energía

5	Estimación de la producción energética.	<p>En centrales de “de filo de agua”, al no contarse con una capacidad de embalse significativa, se evalúa la generación energética en intervalos diarios, sin considerar que el recurso hídrico puede ser almacenado de un día para otro. El cálculo se realiza a partir de los parámetros técnicos de la central y de las series de caudales medios diarios generadas a través de la modelación hidrológica en cada uno de los puntos donde se ubican las captaciones de la central, tanto en la situación actual como en los horizontes temporales futuros que tienen en cuenta la previsible evolución del clima. Sobre la base de los caudales medios diarios y mensuales se determina la probabilidad de ocurrencia de cada uno y se generan las curvas de duración de caudales. El cálculo de la energía generada se realiza entonces multiplicando la potencia de la turbina (P) por el tiempo en que las máquinas están disponibles (desconectando el tiempo dedicado a operaciones programadas y desconexiones forzadas).</p> <p>Es importante destacar la importancia de tener en cuenta, en este cálculo, el caudal ecológico mínimo del proyecto (que no debe ser captado, manteniéndose en todo momento para no sacrificar la calidad ambiental de los ríos influenciados por la generación eléctrica), las eficiencias de los equipos y los programas de operación.</p> <p>En el caso de las plantas con embalse, la conversión de los caudales disponibles para generar energía y la energía generada se aborda con operaciones similares. En algunos de los modelos de simulación de embalses comentados anteriormente se incluyen funcionalidades que realizan estas operaciones. Si no es así, se deberán realizar a través de otros medios (hojas de cálculo, etc.), pero las ecuaciones básicas son similares.</p>
---	---	---

En relación a la capacidad adaptativa de los proyectos hidroeléctricos, esta será dependiente de diferentes aspectos entre los que cabe destacar:

- El flujo de caja del proyecto y los recursos disponibles para acometer medidas de adaptación serán sin lugar a dudas uno de los aspectos clave de la capacidad adaptativa.
- Si bien durante la etapa de diseño es posible plantear medidas de ingeniería en las centrales que faciliten su adaptación al clima presente y futuro, modificar sus características principales una vez que ha entrado en operación (repotenciación, cambio en las características del embalse, construcción de nuevos desarenadores, etc.) es generalmente un proceso sumamente costoso⁴ si no se ha planteado desde un principio. Ante la incertidumbre climática, es interesante incidir en el planteamiento de diseños flexibles y modulares.
- El planteamiento de un esquema de operación y mantenimiento (O&M) de la central, el embalse, etc. adaptado a los periodos y frecuencias más adecuados puede ser de sumo interés.
- Con carácter general, las centrales hidroeléctricas contribuyen de manera global a la riqueza global de un país o sociedad, pero, con carácter general, cuentan con un presupuesto específico para **intervenir en la cuenca** más cercana, un aspecto que se ha de considerar a la hora de plantear medidas de adaptación⁵. La gestión integrada de cuencas ofrece una oportunidad única para adaptar tanto las centrales como el conjunto del territorio y su sociedad a la evolución de las variables climáticas. No obstante, los recursos de la central serán con muy alta probabilidad insuficientes para desarrollar las acciones necesarias y será necesario plantear una intervención coordinada con la administración y otros agentes con intereses en la cuenca.



⁴ Generalmente las centrales son planteadas con un diseño definitivo establecido en base a una concepción estacionaria del clima.

⁵ La capacidad de intervención de las centrales en las cuencas se encuentra generalmente orientada al desarrollo social y se centra en las poblaciones más cercanas.

6.3.4 Paso 4: Evaluación del riesgo

Como en el resto de los sectores de esta guía, el riesgo es considerado como función de la probabilidad (relacionado con la amenaza) y la consecuencia (relacionado con la exposición y vulnerabilidad). En este caso, se propone que las consecuencias sean analizadas para diferentes escenarios climáticos y socioeconómicos. Abordar un análisis cuantitativo del riesgo climático de los proyectos hidroeléctricos requiere de importantes recursos y una información muy completa (por ejemplo, información hidrometeorológica de la cuenca aportante). En caso de que se disponga de los mismos, es posible generar una serie de modelos acoplados que establezcan la relación entre los diferentes parámetros clave, en este caso las precipitaciones, y la producción hidroeléctrica.

Bajo este planteamiento, sería adecuado establecer diferentes escenarios climáticos y para cada uno de ellos establecer:

- Una probabilidad de que acontezca dicho escenario.
- Unas consecuencias de su materialización para el proyecto, que serían:
 - Las asociadas al servicio prestado por la infraestructura hidroeléctrica, que en muchas ocasiones superan el ámbito energético (por ejemplo, los embalses de muchos proyectos contribuyen al control de inundaciones, abastecimiento urbano, etc.).
 - Sobre su rendimiento financiero, sintetizado en el LCOE (u otro) y sus dos componentes CAPEX y OPEX (como se detalla en el apartado 5.1), que se describen a continuación.
 - En el caso de que el proyecto cuente también con el objetivo de reducir las inundaciones aguas abajo, las consecuencias de estas inundaciones.

Como en los casos anteriores, el rendimiento financiero del proyecto se analiza mediante el **LCOE (Levelized Costs of Energy)**, un indicador de tipo financiero que proporciona el costo por unidad de producción de energía (USD/MWh). Se trata de un término que depende de la retribución obtenida por la producción anual, los costos de capital (CAPEX) y los costos de operación (OPEX) (ver detalle en el apartado 5.1).

En este caso es muy interesante establecer un periodo de análisis de una cierta longitud (varias décadas) para valorar ambos aspectos (rendimiento financiero y/o daños evitados durante ese periodo). El estudio de un periodo corto puede que no capture la variabilidad interanual adecuadamente y no incluya un número suficiente de situaciones en los que la capacidad de que la infraestructura se vea superada, arrojando conclusiones erróneas.

➤ **Tabla 22:** Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto hidroeléctrico

Evaluación de la probabilidad de ocurrencia		
1	Evaluación de la probabilidad de los escenarios analizados.	<p>En el apartado anterior se expone la sensibilidad del proyecto ante la evolución de diferentes amenazas y tendencias climáticas. La evaluación del riesgo implica un análisis probabilístico de diferentes evoluciones plausibles del clima y sus consecuencias en la viabilidad del proyecto. Como se viene indicando en todo el documento, es interesante que estos escenarios climáticos se combinen con escenarios de otros aspectos determinantes o “drivers”, que en el caso de la energía hidroeléctrica serían precio de venta de la energía, el costo de oportunidad/financiación, etc.</p> <p>Aunque se expone más detalladamente en el apartado 4, merece la pena resaltar que, si bien con los modelos comentados es posible calcular las repercusiones de cada escenario estudiado, establecer una probabilidad para cada uno de los escenarios (climáticos y no climáticos) es ciertamente complejo. Ante la falta de elementos de decisión acerca de porque cualquiera de los RCP existentes podría tener más posibilidades de acontecer en el futuro, se propone considerar todos ellos como equiprobables. En cuanto a otros aspectos de los escenarios climáticos, como la selección de aquellos modelos de entre todos los que integran CMIP5 que son más acertados, las técnicas de regionalización o ajuste de sesgo a la ubicación concreta del proyecto más adecuadas, etc. también es complejo y se recomienda una combinación de las salidas de diferentes modelos.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre el CAPEX		
2	Evaluación de la diferencia de costo asociada a diseños adaptados a las condiciones futuras.	<p>El CAPEX engloba costos de inversión relacionados con la infraestructura física (principalmente turbinas, pero también el edificio, conexión a la red y otros aspectos técnicos) que dependerán de la ubicación y de factores ambientales y socioeconómicos (clima, orografía, vegetación, distancia a la infraestructura esencial, altura del terreno, usos y precio del suelo, ...).</p> <p>El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá adaptar el diseño de la instalación y guiar la selección de sus componentes. Esto puede tener impacto en:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costos de inversión inicial de los equipos y su instalación (turbina adecuada a las condiciones actuales y futuras, sistemas de retención de sedimento, etc.). • Costos asociados a sustitución de componentes por modificación de su vida útil en las condiciones futuras. Los sedimentos son la principal amenaza en este caso para proyectos que se puedan ver afectados por la colmatación de los embalses.

Evaluación de las consecuencias del CC sobre el OPEX

3	Evaluación de la diferencia de costo asociada a diseños adaptados a las condiciones futuras	<p>El OPEX contempla costos relacionados el régimen de operación y mantenimiento de la planta, necesarios para el funcionamiento adecuado de la instalación.</p> <p>El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá determinar la evolución de estos costos y realizar ajustes en la rentabilidad a largo plazo de la instalación (costos vs. ingresos por producción). Podrán verse alteradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • por el caudal líquido, que determina la producción. • por los sedimentos (caudal sólido), con impacto directo en las necesidades de dragado de embalses y de mantenimiento de turbinas. <p>A la hora de evaluar el impacto económico causado por la variación en la energía generada, se debe estudiar desde dos enfoques diferenciados:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El proyecto hidroeléctrico. • El conjunto del Sistema Energético del país. <p>El primer enfoque considera un primer nivel de estudio económico a escala más local o “micro”. En él se pone el foco de interés en el impacto del cambio climático sobre la rentabilidad del propio proyecto hidroeléctrico (cómo se ven alterados sus ingresos al variar la cantidad de energía que es capaz de generar). En este caso, se considera el precio de venta de energía de la central (en dos componentes, fijo y variable) para estimar el impacto sobre la rentabilidad del proyecto de manera individualizada, es decir sin tener en cuenta el efecto de la variación de generación en el resto del Sistema Energético.</p> <p>Para determinar este impacto, se aplica la siguiente ecuación, que relaciona las variaciones de producción energética de la central con el costo de generación:</p> $\text{ImpactoEconomico}_e = \text{PrecioFijo}_e + \sum_a (\text{Energía}_{a,e} - \text{Energía}_0) * \text{PrecioEnergía}_a$ <p>Siendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $\text{ImpactoEconomico}_e$: Impacto económico (en USD) en la central, considerando el escenario “e”. • PrecioFijo_e: Componente fijo del precio asociado a generación de energía de la central, considerando el escenario “e”. • $\text{Energía}_{a,e}$: Cantidad de energía eléctrica suministrada por la central al Sistema Energético Nacional durante el año “a”, estimada considerando el escenario “e”. • Energía_0: Cantidad de energía eléctrica suministrada por la central al Sistema Energético Nacional durante el año base. • PrecioEnergía_a: Precio al que se retribuye a la central por cada unidad de energía despachada al Sistema Energético Nacional durante el año “a”. <p>El segundo planteamiento, a escala más global o “macro”, estudia el impacto económico generado por la variación de producción energética de la central hidroeléctrica objeto de estudio en el marco del conjunto del Sistema Energético en el cual se integra, de acuerdo a los costos asociados al orden de despacho del sistema. El Sistema compensará las variaciones que se produzcan en la capacidad de generación de la central, modificando la generación desde otras centrales. Aquí, es el precio marginal del sistema⁶ el que permite valorar el impacto económico ya que valora el costo de cada kWh que ha de obtenerse desde otras centrales del Sistema como consecuencia de la menor generación de energía por parte de la central hidroeléctrica estudiada (o que deja de producirse adicionalmente en el caso de mayor generación en la central). Igualmente, en el despacho energético, se tiene en cuenta también la orden de mérito que prioriza las energías renovables frente a las no renovables.</p>
---	---	--

⁶ El precio marginal del sistema indica el valor de la generación de un MWh adicional por la última planta que ha sido asignada para cubrir la demanda total del sistema.

Evaluación de las consecuencias del CC sobre el OPEX

3	Evaluación de la diferencia de costo asociada a diseños adaptados a las condiciones futuras	<p>En base a esto, la ecuación que rige la valoración del impacto económico sobre el Sistema es la siguiente:</p> $\text{ImpactoEconomicoSENe} = \sum_a (\text{Energía}_{a,e} - \text{Energía}_0) * (\text{PrecioMarginal}_a - \text{PrecioEnergía}_a)$ <p>Donde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ImpactoEconomicoSENe.: Impacto económico (expresado en USD) en la central considerando el escenario "e" y valorando las repercusiones sobre el conjunto del Sistema Energético del país. • Energía_{a,e}: Cantidad de energía eléctrica suministrada por la central al Sistema Energético durante el mes "a", considerando el escenario "e". • Energía₀: Cantidad de energía eléctrica suministrada por la central al Sistema Energético durante el mes base. • PrecioEnergía_a: Precio al que se retribuye a la central por cada unidad de energía despachada al Sistema Energético Nacional durante el año "a". • PrecioMarginal_a: Costo Marginal del conjunto del Sistema Energético durante el mes "a". <p>Para evaluar el impacto económico causado por los sedimentos, se parte de los resultados obtenidos en el análisis de sedimentos realizado en el apartado 6.3.3 y de los siguientes datos para el año base:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Valor equipamiento electromecánico (Miles de USD) • Costo económico del <i>overhaul</i> en el escenario actual (Miles de USD). En los casos en los que no se pueda disponer de información específica para la instalación, se podría considerar un valor de referencia estimado del 5%⁷ del valor del equipamiento electromecánico. • Valor de <i>overhaul</i> anualizado de turbinas en el escenario actual (Miles de USD/año). <p>Este último se considera el indicador más significativo para estimar el impacto económico asignado a la proyección de sedimentos en los escenarios climáticos futuros.</p> <p>Así, la evolución a futuro del costo del <i>overhaul</i> anualizado (Miles de USD/año) se obtendrá como el cociente del costo económico del cambio de turbinas entre la frecuencia prevista del <i>overhaul</i> en cada uno de los escenarios.</p>
---	---	---

Evaluación de las consecuencias del CC sobre el servicio dado

4	Evaluación del efecto sobre el servicio.	<p>Evaluar las consecuencias de una mayor o menor generación de origen hidroeléctrico no es una tarea sencilla, pero puede permitir cuantificar mejor los riesgos climáticos. Generalmente las centrales hidroeléctricas forman parte de la red energética de un país. Su mayor o menor generación implicará que el resto de las fuentes tendrán que disminuir o incrementar su operación. Esto tendrá cambios en el costo de la energía, sus emisiones y demás impactos asociados. Valorar estos impactos a nivel del conjunto del sistema requiere un conocimiento del conjunto del sistema que es complejo adquirir y procesar.</p>
5	Evaluación de las consecuencias de operar para protección contra inundaciones.	<p>En el caso de que el proyecto cuente también con el objetivo de laminar las avenidas y proteger de inundaciones aguas abajo, este aspecto puede modificar y condicionar su operativa. Por ejemplo, podría darse el caso de que los desarrollos urbanos aguas abajo, la ausencia de mantenimiento de los cauces, etc. limiten en el futuro los caudales que el proyecto hidroeléctrico puede liberar sin causar problemas aguas abajo, condicionando su operación. Otro ejemplo en el cual la protección de inundaciones puede condicionar la generación hidroeléctrica es el caso de centrales que han de mantener un cierto volumen de embalse libre para laminar la llegada de avenidas en periodos de lluvias.</p>

➤ Fuente: Elaboración propia.

⁷ Este valor de referencia ha sido tomado de un informe de "Cálculo energético y evaluación económica" del Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón, donde se establece un costo periódico del 5% del valor del equipamiento hidroelectromecánico, asociado a la durabilidad del equipamiento.

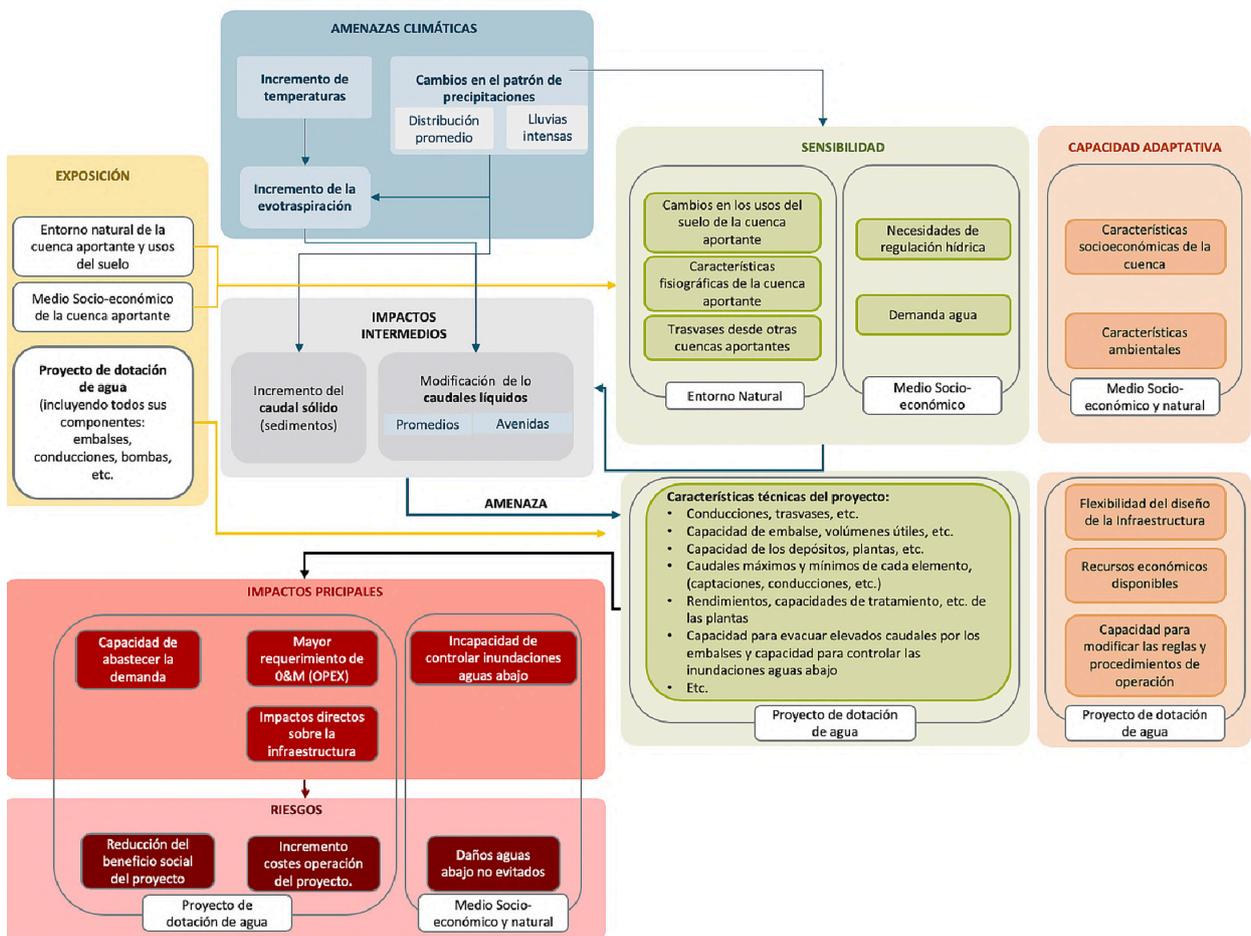
Como se viene indicando en todo el documento, es interesante que estos escenarios climáticos se combinen con escenarios de otros aspectos determinantes o “drivers”, que en el caso de la energía hidroeléctrica serían: precio de venta de la energía, el costo de oportunidad/financiación, la evolución de los usos del suelo, la evolución de otras demandas y trasvases de recurso hídrico, etc.

A partir de esta información, se estimaría el LCOE en cada uno de los escenarios manejados.

6.3.5 Resumen de componentes de riesgo

Los proyectos hidroeléctricos tienen unas implicaciones sociales y ambientales más complejas que los proyectos energéticos anteriormente comentados (fotovoltaicos y eólicos). Además, su interacción con el clima es también más compleja, ya que intervienen aspectos “aguas arriba” del proyecto. Por ello, los componentes del riesgo climático de estos proyectos son muy diversos, complejos. La siguiente figura resume estos para un proyecto de hidroeléctrico típico. De nuevo se ha de destacar que por el elevado número de posibles objetivos con los que pueden contar estos proyectos, pueden existir particularidades que no se recojan en la misma.

➤ **Figura 42:** Componentes de riesgo para los proyectos hidroeléctricos



Nota: Dependiendo de la ubicación del proyecto y sus características, las tendencias indicadas pueden ser diferentes (p.ej. incremento de las lluvias promedio, mayores caudales, mayor capacidad de generación energética).

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

La tabla siguiente se sintetizan los aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo climático de un proyecto hidroeléctrico.

► **Tabla 23:** Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo climático de un proyecto hidroeléctrico

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de infraestructura hidroeléctrica	Indicadores de riesgo a considerar en proyectos de infraestructura hidroeléctrica
Amenaza	Cambios en el recurso.	Incremento de temperaturas.
	Cambios en la eficiencia y operación.	Cambios en el patrón de precipitaciones. Incremento de la evapotranspiración. Modificación de los caudales líquidos. Incremento del caudal sólido (sedimentos).
Exposición	Proyecto hidroeléctrico.	Equipamiento electromecánico, considerando sus características como potencia, rendimientos, etc. que determinarán la energía generada bajo diferentes escenarios de cambio climático. Obras de infraestructura (presa, vertedores, etc.) que, de alguna manera, puedan ser representados por un valor monetario. Cambio en la frecuencia de las tareas de operación y mantenimiento (limpieza de embalses y conducciones, reparación y mantenimiento de turbinas, etc.).
	Población potencialmente afectada y demanda de agua (caudal ecológico).	Población potencialmente afectada por inundaciones aguas abajo del proyecto. Caudales máximos que causan inundaciones y daños aguas abajo del proyecto. Caudales mínimos que causan alteraciones ecosistémicas aguas abajo del proyecto y/o comprometen otros usos del agua (abastecimiento, riego, etc.). Usos consuntivos aguas abajo que el proyecto debe atender.
	Sistema Energético (regulación, demanda, etc.).	Cambio en el rendimiento ante diferentes condiciones de operación de todos los elementos que integran el proyecto de infraestructura. Esto incluye los cambios en el rendimiento de la infraestructura, a consecuencia de variaciones en los volúmenes de los embalses, caudales de las conducciones y captaciones, caudales ecológicos, características y rendimientos del equipo electromecánico, etc. Evolución de la demanda del sistema energético. Adecuación de las reglas de operación a los requisitos y condiciones demandados para garantizar el suministro energético.
Sensibilidad	Características y cambios en las características hidrológicas de la cuenca aportante.	Comportamiento hidrológico de la cuenca y muy especialmente cambios en los usos del suelo que puedan modificar las relaciones entre precipitación y caudal (por ejemplo, cambio en la respuesta hidrológica de la cuenca por mayor presencia de vegetación) y/ o alterar la susceptibilidad del suelo a la erosión (que por ejemplo puede incrementarse con la deforestación).
	Otras cuencas aportantes (aguas arriba).	Aportes de recursos desde otras cuencas disponibles para hacer frente a potenciales cambios en los recursos propios de la cuenca. Se ha de tener presente que las mismas también se pueden ver afectadas por el cambio climático y otras tendencias.

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de infraestructura hidroeléctrica	Indicadores de riesgo a considerar en proyectos de infraestructura hidroeléctrica
Capacidad adaptativa	Diseño del equipamiento e infraestructura.	Adecuación de componentes y particularidades de las instalaciones a las características del sitio y su capacidad para adaptarlos a la evolución de las variables climáticas (disponer de desarenadores, sistemas de control adecuados, flexibilidad de diseño para adaptarse a cambios en el caudal, posibles cambios de la potencia, etc.).
	Capacidad de intervención social en la cuenca.	Características socioeconómicas de la cuenca, incluyendo los usos del suelo y la capacidad para plantear usos alternativos que favorezcan una gestión sostenible de cuenca. Evolución de las variables socioeconómicas. Áreas protegidas. Mecanismos de gobernanza en la cuenca.
	Capacidad de intervención en las zonas protegidas frente a inundaciones.	Características y potenciales intervenciones en población potencialmente afectada por inundaciones aguas abajo del proyecto.
	Capacidad de intervención en las actividades consumidoras de agua.	Evolución de las demandas de agua que atiende el proyecto. Posibilidades para reducir y controlar las demandas de recurso hídrico.
	Rendimiento y características económicas del proyecto.	Evolución de los recursos económicos: rentabilidad, flujo de caja que generará el proyecto (evolución de la energía generada), evolución de las políticas retributivas (ingresos por cada kWh aportado a la red eléctrica para los proyectos conectados en red). Estos indicadores determinan la capacidad para poder implementar medidas de adaptación, diseños más resilientes y adaptados al cambio climático, etc.
	Flexibilidad de las normas de operación y otros condicionantes de operación.	Capacidad para operar con diferentes rangos y directrices en cuanto a la gestión de los embalses, operación de la planta, etc.
	Complementariedad con otras cuencas.	Posibilidad de plantear trasvases entre cuencas o cambios en los volúmenes trasvasados.
	Sistema energético.	Complementariedad de la planta con otras fuentes de energía, capacidad del sistema para proveerse de otras fuentes, reducir el consumo, etc.

Fuente: Elaboración propia.

Un aspecto que cabe destacar de esta tabla es que se ha definido desde la perspectiva apuntada en el apartado 6.3.1, en el que se propone considerar que los límites de nuestro estudio incluyen la cuenca aportante. Por eso los aspectos que determinan la hidrología de la misma se incluyen en la sensibilidad del sistema estudiado, ya que definen como el mismo se ve afectado por cambios en las variables climáticas. También cabe destacar que, como se ha expuesto a lo largo de todo este apartado, los proyectos hidroeléctricos son extremadamente diversos en cuanto a su concepción (con embalse, de pasada, etc.) tecnología (pudiendo tener múltiples tipos de turbinas, equipamiento, etc.), objetivos (aprovechamientos puramente hidroeléctricos frente proyectos multipropósito), y otros aspectos que hacen que sea conveniente revisar el listado propuesto en función de las características concretas del análisis. Igualmente, la asignación de indicadores a los diferentes componentes de riesgo puede ser interpretada y modificada en función de las características y condicionantes del análisis.

6.4 Dotación de agua

Los proyectos de dotación de agua presentan una gran similitud con los del sector hidroeléctrico, ya que ambos hacen uso del recurso agua y ambos se ven impactados más por los cambios en el régimen medio que por las variaciones en los extremos. Además, presentan una gran interacción ya que normalmente las presas y embalses compatibilizan ambos usos y la relación de los mismos podría verse modificada por el cambio climático. Por ello, si efectivamente estamos ante proyecto multipropósito (generación de energía y abastecimiento de agua) se recomienda complementar la lectura de este apartado con la del apartado 6.3.

Los proyectos de dotación de agua son generalmente complementarios de los de saneamiento (alcantarillado, depuración, etc.), pero que en el presente apartado se ha optado por centrar el análisis en los primeros, siendo analizados los proyectos de recolección y tratamiento de aguas urbanas en el apartado que analiza el sector de “áreas urbanas”. Es recomendable por tanto también tener presente el contenido del apartado 6.6. Como se expondrá en el mismo, en el caso del saneamiento, el análisis del drenaje pluvial es un aspecto clave y el análisis de las precipitaciones extremas juega a un papel determinante de cada a concebir infraestructura adaptada al cambio climático.

Un aspecto característico de los proyectos de dotación de agua es que se centran en cubrir unas demandas de consumo urbano, industrial, riego, etc. Por ello es muy común que los mismos se planteen desde el análisis de las demandas que se han de cubrir, y no desde los recursos disponibles, como es el caso de los proyectos hidroeléctricos donde el planteamiento es optimizar el aprovechamiento del recurso disponible. Por ello, los pasos fundamentales que se propone seguir para este tipo de proyectos se resumen en:

- Contextualización del proyecto.
- Evaluación del recurso y su evolución, así como de las variables climáticas y no climáticas que tienen impacto en el servicio de dotación de agua (con un foco especial en el análisis de la demanda y su evolución durante el periodo de diseño).
- Análisis de la evolución de los eventos extremos a largo plazo (precipitación extrema, ...).
- Estimación de la evolución de la capacidad de suministro.
- Análisis del impacto de los eventos extremos sobre la infraestructura.
- Cálculo de la rentabilidad o atractivo del proyecto.

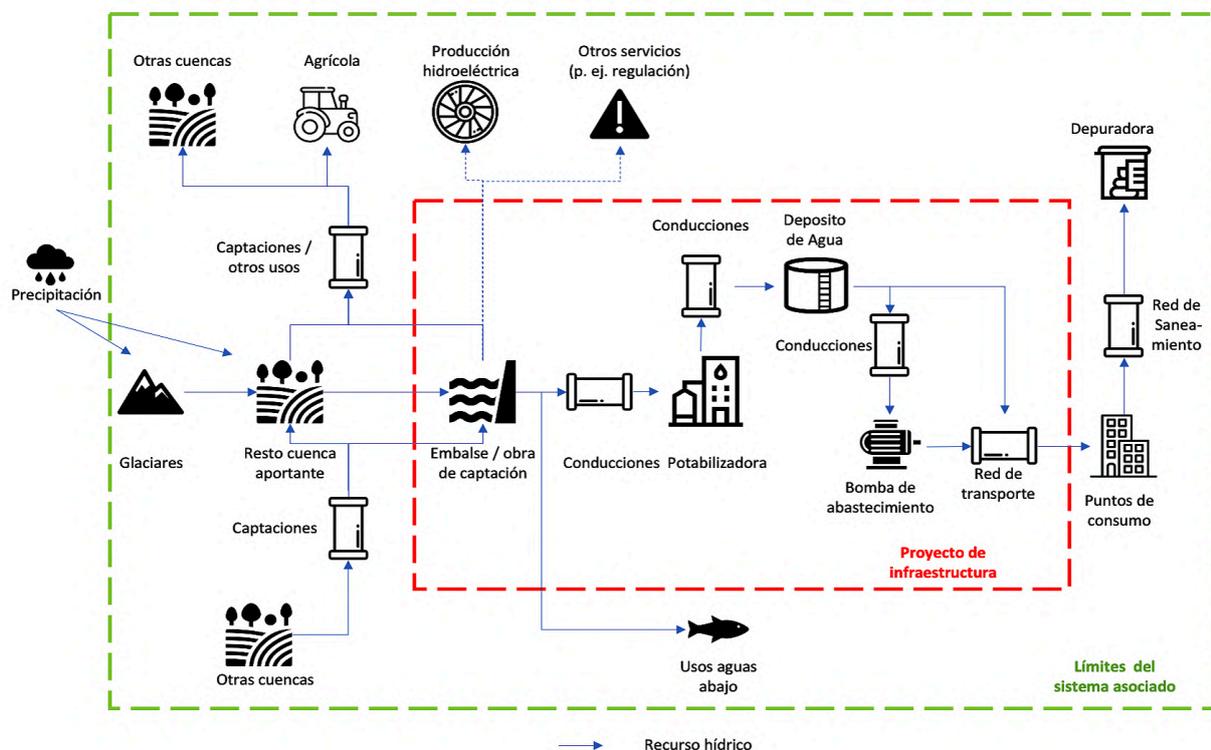
6.4.1 Paso 1. Contextualización del proyecto respecto al CC

El contexto para la evaluación de riesgos climáticos de un proyecto de dotación de agua quedaría definido de manera esquemática como se representa en la Figura 43. En ella se muestran los elementos a tener en cuenta de un proyecto de dotación de agua genérico, así como otros elementos externos que afectan al mismo y que se engloban en lo que denominaremos “límites del sistema asociado”. Este mapa conceptual nos permite mostrar los elementos que podrían estar expuestos a los efectos del cambio climático de forma directa o indirecta y delimitar cuales de ellos se consideran dentro del alcance del presente informe.

Este esquema comparte muchos elementos con lo expuesto en el apartado de análisis de riesgo de los proyectos hidroeléctricos (apartado 6.3) y lo expuesto en el apartado de análisis transversal de la hidrología (apartado 5.2). En este sentido, se ha de tener presente que muchos proyectos de embalses cuentan con una finalidad multipropósito, y sus objetivos pueden ser tanto la generación hidroeléctrica como el suministro de agua urbana o de riego, u otros fines como el control de avenidas. Cabe destacar que, en estos casos, el suministro de agua (y otros cometidos como la protección de la población y los bienes) suele contar con una clara prioridad sobre la generación hidroeléctrica. Asimismo, al margen de que algunos elementos del sistema puedan ser comunes o análogos, existe un planteamiento claramente diferenciado entre el sector de suministro de agua y los proyectos hidroeléctricos. Generalmente, los

proyectos hidroeléctricos se ajustan a los recursos hídricos disponibles, mientras que, en el caso de los proyectos de suministro de agua, es la demanda de recurso la que rige en mayor medida el diseño y operación de la infraestructura.

Figura 43: Contexto de evaluación de un proyecto de dotación de agua: propuesta de límites del sistema objeto de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Como se viene insistiendo en todos los sectores, este esquema genérico se ha de adaptar a las características del proyecto. Concretamente en este tipo de proyectos, sus límites pueden ser muy variables, ya que podemos estar ante un sistema integral de abastecimiento y saneamiento (donde los límites de la infraestructura serían mayores a los presentados en la imagen anterior, incluyendo la red de saneamiento o la depuración) o solamente ante una nueva captación que alimenta a una planta preexistente, donde los límites podrían ser menores a los dibujados.

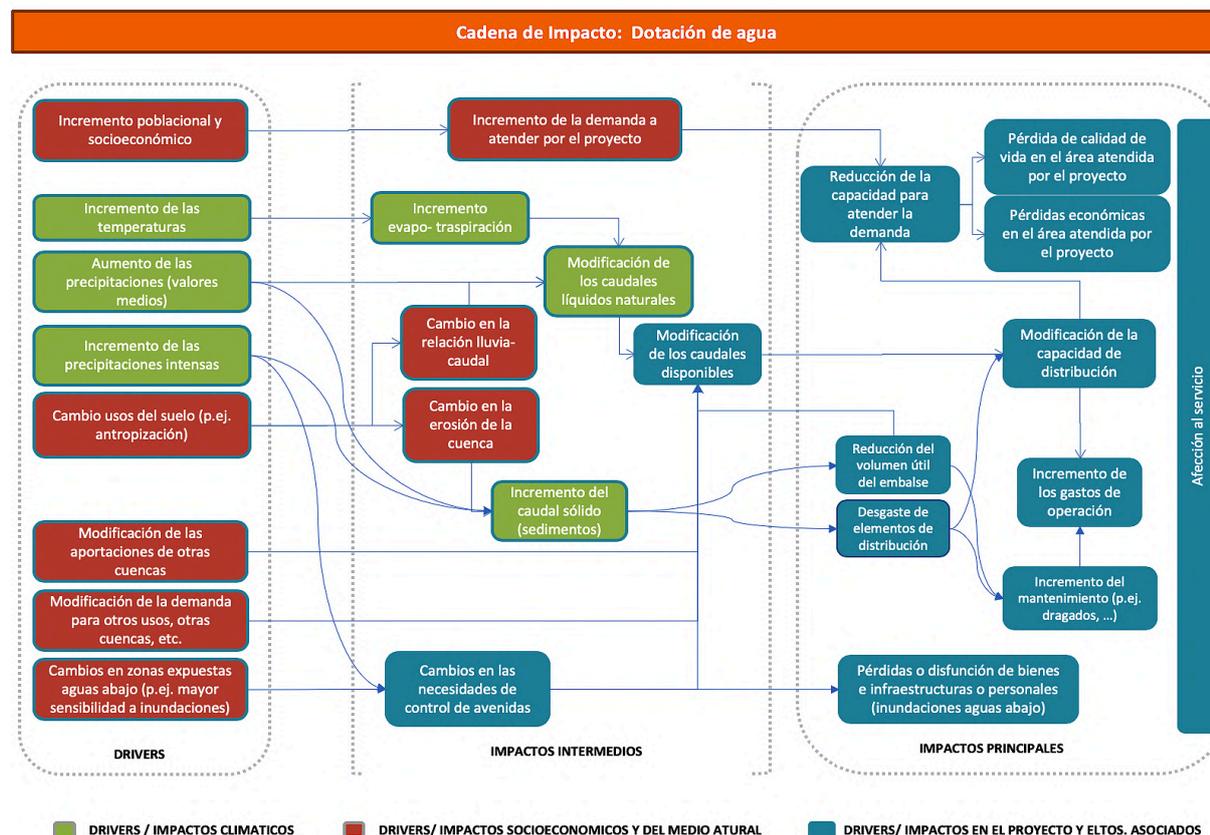
En todo caso, es conveniente tener una visión del conjunto de sistema para estudiar el riesgo climático sobre nuestro proyecto, ya que este análisis requiere de la consideración de un amplio abanico de factores climáticos y no climáticos que podrían resumirse en:

- La cuenca hidrográfica: se puede apreciar en la figura que la captación de agua se ve directamente influenciada por las características de la cuenca aportante del proyecto, que (en combinación con la climatología y otros factores) determinarán los caudales disponibles, un aspecto que generalmente es determinante de la viabilidad de los proyectos de abastecimiento. Algunos de los aspectos más importantes del comportamiento hidrológico de las cuencas son su morfología, geología, litología, usos del suelo, etc.
- El propio proyecto de captación y distribución de agua, incluyendo todos sus componentes como las obras civiles, conducciones, planta potabilizadora, etc., cuya operación se puede ver afectada por cambios en los caudales líquidos (variando la disponibilidad) y sólidos (modificando la colmatación de embalses).
- La red de distribución a la que se aporta agua (red de transporte y distribución de agua a nivel local y regional) que determinará la demanda, requisitos de operación, retribución y pago al proyecto.
- La sociedad: que, aparte de determinar la demanda de agua, influye directamente en los usos del suelo de la cuenca, cuenta con unas necesidades de desarrollo económico y social, puede demandar servicios adicionales como la protección frente a inundaciones aguas debajo de los embalses multipropósito, etc.

El apartado siguiente analiza con más detalle las amenazas a tener en consideración en cada uno de los componentes del sistema planteado.

6.4.2 Paso 2. Identificación de amenazas y valoración de la exposición

Para la identificación de las amenazas y la valoración de la exposición del proyecto a las mismas, tras definir los límites del sistema estudiado y sus componentes, se debe generar la cadena de impacto para cada una de las amenazas que se consideren de interés. En la imagen siguiente se presentan las cadenas de impacto de un proyecto genérico en base a la contextualización anteriormente indicada. Al igual que se mencionaba para el sector hidroeléctrico, cualquiera de los aspectos que integran el sistema objeto de estudio podría evolucionar y afectar al conjunto del sistema. Sin embargo, para simplificar la cadena de impacto, se ha optado por incluir los aspectos más habituales y los que es más probable que sufran evoluciones o tendencias que alteren el funcionamiento global del sistema. Por ello, es conveniente ajustar las cadenas propuestas al proyecto concreto al que se aplica la metodología. Por ejemplo, en el caso de que el proyecto incluya embalses dependientes de glaciares, habría que añadir este aspecto.



Nota: dependiendo de la ubicación del proyecto es posible que los drivers tengan el sentido inverso al indicado, en cuyo caso, el sentido de los impactos también se verá invertidos (los aspectos que se indica que se ven incrementados podrían disminuir y los que se apunta que se verían reducidos se verían aumentados). Se muestran en verde los aspectos climáticos, en rojo otros aspectos que pueden tener un efecto significativo en el proyecto y en azul los impactos intermedios y principales.

Fuente: Elaboración propia.

La cuenca hidrográfica es el territorio situado aguas arriba de las presas y embalses que recolectan el agua de lluvia, aportando al sistema un **caudal** en los puntos de captación o en los embalses. Los caudales líquidos tienen un impacto directo en la capacidad de distribución y dotación de agua, pero también se ha de tener presente el tema de los **sedimentos**, que afecta a la infraestructura en diferentes aspectos (colmatación, desgaste de elementos de distribución, etc.) afectando a su funcionamiento.

La relación entre las precipitaciones (y resto de características climáticas como temperatura, etc.) y los aportes (líquidos y sólidos) de una cuenca depende de diferentes características. Algunas de ellas son relativamente complejas de modificar (el relieve, etc.) pero otras sí que pueden verse alteradas sensiblemente, como es el caso de los usos del suelo, que tendrán un efecto notable en la escorrentía de la cuenca y su erodabilidad. Por ello, la gestión integrada de cuencas ofrece una oportunidad única para adaptar tanto las presas y embalses, como el conjunto del territorio y su sociedad a la evolución de las variables climáticas. En el apartado 5.2 (Hidrología) se incluye más información sobre los indicadores de sensibilidad de la cuenca y los planteamientos para evaluarlos.

Impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de agua

Lógicamente, el impacto más directo que el cambio climático puede tener sobre los proyectos de abastecimiento de agua es que reduzca los recursos hídricos disponibles hasta tal punto que se vea comprometida su capacidad para atender la demanda. Actualmente, los problemas hídricos se han agravado en algunos países latinoamericanos, y una mayor frecuencia e intensidad de las sequías ya afecta a las fuentes de provisión de agua de algunas ciudades (102).

Existen muchas definiciones para el término “sequía”. Esta complejidad y la falta generalizada de observaciones de humedad del suelo (un aspecto clave cuando tenemos que evaluar las afecciones de la sequía sobre la vegetación, cultivos, parques, etc. que en muchas cuencas son los principales demandantes de agua al margen de que nuestro proyecto esté específicamente orientado a atender estas demandas), ha conducido a que se hayan desarrollado varios índices para caracterizar la sequía (meteorológica, humedad del suelo e hidrológica). Hay índices basados en variables meteorológicas o hidrológicas medidas pero, en otros casos, pueden integrar simulaciones de modelos de superficie terrestre, hidrológica o climática (que proporcionan estimaciones de, por ejemplo, humedad del suelo o escorrentía). A modo de ejemplo, a continuación, se enumeran algunos de los índices que han sido empleados para analizar las sequías:

- Índice de Precipitación Estándar o *Standard Precipitation Index* (SPI), empleado por ejemplo por McKee et al. (103). y Lloyd-Hughes et al. (104).
- Índice de días secos consecutivos o *Consecutive Dry Days index* (CDD), empleado por ejemplo por Alexander et al. (105).
- Índice de severidad de sequía de Palmer o *Palmer Drought Severity Index* (PDSI), empleado en estudios como el realizado por Aiguo Dai (106).
- Índice de severidad de sequía *Drought Severity Index* (DSI).
- Anomalía de Precipitación y Evaporación potencial o *Precipitation and Potential Evaporation Anomaly* (PPEA), que es empleado bajo planteamientos de cambio climático por Burke et al. (107).
- Índice estandarizado de precipitación-*evapotranspiración* o *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* (SPEI).
- Anomalías de humedad del suelo simuladas o (*Simulated Soil moisture anomalies* (SMA).
- Persistencia de la humedad del suelo o *Soil Moisture Persistence*.
- Índice de estrés de sequía o *Drought Stress Index* (empleado por Guerreiro et al. (108)).

Los índices de sequía generalmente integran precipitación, temperatura y otras variables, enfatizan diferentes aspectos de las sequías y deben seleccionarse cuidadosamente con respecto a las características de la sequía que pueden afectar a nuestro proyecto. En particular, algunos índices tienen deficiencias específicas, especialmente en el contexto del cambio climático. Por esta razón, las evaluaciones de los cambios en las características de la sequía con el cambio climático pueden considerar varios índices, incluida una evaluación específica de su relevancia para la zona o sistema estudiado.

Aunque el empleo de estos índices es muy común en la bibliografía y nos permiten tener una visión de cómo el cambio climático afectará a la cuenca donde se encuentre nuestro proyecto, para poder tomar decisiones que afecten al diseño y dimensionamiento de la infraestructura es necesario conocer el efecto que este fenómeno tendrá en los caudales disponibles.

El **caudal líquido** disponible es resultante de la agregación en el espacio y en el tiempo de la escorrentía superficial y el flujo subterráneo. En la mayoría de las cuencas, su evolución se encontrará regida fundamentalmente por la **precipitación** en la cuenca aportante, que es la variable generadora de los flujos hidrológicos. La temperatura y la evapotranspiración son asimismo claves en el ciclo hidrológico. La **evapotranspiración** es el flujo que transporta agua del suelo a la atmósfera. Esta se ve muy condicionada por la **temperatura** y, a su vez, condiciona el reparto de la lluvia entre infiltración y escorrentía, afectando a la velocidad de respuesta de la cuenca y por tanto a la cantidad de agua aprovechable. Otras variables climáticas como el viento, la humedad del aire o la radiación solar también se utilizan para mejorar las estimaciones de evapotranspiración. Sin embargo, su efecto es lo suficientemente leve como para poder considerar a la precipitación y la temperatura como las variables que establecerán la evolución global de los caudales.

El proyecto se puede ver también afectado de diferentes modos por las cantidades de **sedimentos** que alcancen sus captaciones y embalses. Como se ha descrito para los proyectos hidroeléctricos (apartado 6.3) los embalses sufren procesos de colmatación independientemente de su cometido. La magnitud de este proceso es tal que se considera que, a nivel global, está reduciendo la capacidad neta de los embalses, por lo que su gestión es clave para garantizar el uso sostenible y a largo plazo de los embalses (109). Por ello, el análisis de la colmatación es una práctica común en el diseño de cualquier embalse de mediana entidad, pero generalmente no se aborda considerando el previsible impacto del cambio climático, algo que, al menos para zonas con procesos erosivos importantes, debería ser tenido en cuenta. También las obras de captación de menor entidad como azudes o tomas de captación pueden verse afectadas por sedimentos que reduzcan su funcionalidad. En este tipo de obras generalmente el análisis de la gestión de las cargas de sedimentos es más infrecuente o se desarrolla con menor detalle (un ejemplo de estudio en el que se analiza este tipo de infraestructuras es (110).

Generalmente, los efectos del cambio climático sobre el desgaste de los elementos de distribución (bombas, conducciones, etc.) no son estudiados en los análisis de vulnerabilidad climática. No obstante, estos procesos afectan a las bombas de manera relativamente similar a lo anteriormente expuesto para las turbinas, inyectores, etc. de los proyectos hidroeléctricos, existiendo diferentes estudios que relacionan la concentración de sedimentos y el daño causado en estos equipos ((111), (112))

En definitiva, una mayor carga de sedimentos alterará el rendimiento y el costo de operación y mantenimiento (mayor mantenimiento, dragados, operaciones de lavado de embalses, etc.).

Aspectos sociales de los proyectos de abastecimiento de agua

Siendo la sociedad en su conjunto la que determina la **demanda global de agua**, tanto para el consumo humano como para otros usos (agricultura, energía, etc.), el estudio de sus proyecciones es fundamental para conocer la previsible evolución del sistema de dotación y distribución de agua. Generalmente esta proyección se aborda teniendo en cuenta directrices y recomendaciones nacionales (por ejemplo (113)) y considerando, entre otros, aspectos como:

- Estimaciones de población.
- Consumo por habitante, teniendo presente que en gran medida depende del nivel socioeconómico.
- Consumo de actividades industriales, ganaderas, etc.
- Consumo de otros centros institucionales.
- Pérdidas.

Estos aspectos establecerán los caudales medios y horarios máximos a atender por el proyecto que, como se viene comentando, determinarán los parámetros generales de las inversiones a realizar. El impacto del cambio climático sobre esta demanda es muy complejo de evaluar y, aunque evidente (incrementará la evapotranspiración y por tanto pérdidas de cualquier reservorio expuesto, las necesidades de refrigeración, etc.) generalmente puede ser obviado frente a las variables principales (población y renta).

También se ha de tener presente que, especialmente en el caso de la población ubicada en las cuencas, tendrá una **influencia directa en los usos del suelo**, que como se ha comentado tienen un impacto definitivo en el comportamiento hidrológico de las cuencas aportantes de los proyectos. Es por ello que resulta interesante realizar un análisis de las previsibles tendencias en este sentido.

Aparte de la modificación de los usos del suelo se ha de tener presente que la sociedad puede requerir una **demanda de recursos hídricos** adicional a los que cubre el proyecto objeto de estudio. No se ha de considerar las cuencas como “recolectores de agua” exclusivamente para nuestro proyecto, ya que en las mismas es muy probable que existan otros usos en la actualidad o previstos en el futuro (o incluso que estén previstos trasvases que detraigan o aporten recursos).

Es por todo ello por lo que se ha de considerar en el diseño el previsible **desarrollo económico y social** de la población de la cuenca en equilibrio con la preservación y la evolución de las demandas de recursos hídricos.

También se ha de tener presente que algunos proyectos de abastecimiento cuentan con embalses que contribuyen a laminar las avenidas y **proteger de inundaciones** aguas abajo. Este aspecto puede modificar y condicionar su operativa. No obstante, este es un aspecto que generalmente se encuentra regulado normativamente, y el margen de maniobra por parte de los operadores es muy limitado.

Resumen de *drivers* climáticos y no climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura de dotación de agua

Como se viene comentando, para abordar el análisis del cambio climático sobre los proyectos de dotación de agua es preciso considerar un sistema amplio y complejo, y será muy importante delimitar el mismo en función de las características concretas del proyecto y los recursos disponibles para estudiarlo. Evaluar cuales de todos los aspectos anteriormente comentados en el proyecto pueden tener un impacto en su operación es fundamental para poder abordar el análisis de riesgos sin invertir excesivos recursos pero, al mismo tiempo, sin dejar de analizar aspectos clave.

Se ha de tener presente además que el planteamiento de un sistema tan ambicioso como el descrito anteriormente para evaluar los efectos del cambio climático difiere en gran medida del análisis que se realiza en muchos proyectos hídricos, en los que se considera que el clima es estacionario y por tanto los caudales futuros serán similares a los apreciados en el pasado (planteamiento que evita considerar el análisis del clima y la hidrología de la cuenca) o incluso que el sistema en el que se integra el proyecto de dotación presentará unas características más o menos similares a las actuales. De este modo, analizar los riesgos de un proyecto de dotación de agua considerando y sin considerar el cambio climático y otras tendencias puede requerir de una cantidad de información y recursos marcadamente diferente.

La siguiente tabla resume el impacto de todos los parámetros mencionados sobre el proyecto, resaltando aquellos aspectos que pueden suponer un mayor impacto y merecen, por tanto, un análisis más detallado.

Tabla 24: Variables que inciden en los proyectos de dotación de agua y tipo de impacto

Elementos expuestos	Drivers climáticos (todos referidos a la cuenca aportante)			Drivers no climáticos				Impactos intermedios (referidos a la ubicación del embalse, captación, etc.)		
	Temperatura	Precipitación (cambio en los valores medios)	Precipitaciones fuertes	Usos del suelo aguas arriba	Demandas de recurso y trasvases desde / hacia otras cuencas	Requerimientos de control de avenidas	Demanda de agua a atender por el proyecto	Caudales líquidos (valores medios)	Caudales líquidos (fuertes avenidas)	Caudales sólidos
Embalse/captación	Menor recurso disponible a través de la evapo-transpiración	Determina el recurso hídrico disponible	Generación de fuertes caudales que alcanzan los embalses y otras infraestructuras	Erodibilidad de los suelos y, por tanto, caudales sólidos Comportamiento hidrológico de la cuenca Calidad de las aguas sin tratar	Impacto en la demanda	Mayor necesidad de regulación de caudales y control de avenidas		Impacto directo en la capacidad de atender la demanda	Reglas y procedimientos de operación de embalses para evitar daños aguas abajo	Impacto en capacidad de embalses (colmatación)
Elementos de distribución										Desgaste en proyectos con alta carga de sedimentos
Servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Impacto en la calidad del servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio

Nota: se destacan en color naranja más oscuro los impactos de las variables climáticas y no climáticas que generalmente tendrán una mayor trascendencia. Con color naranja claro otros impactos que generalmente también tendrán cierta importancia o que pueden llegar a ser muy significativos.

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, dentro de los parámetros climáticos, cabe destacar la variación de los **caudales líquidos** como la variable con un impacto más directo en la capacidad de distribución. También los **caudales sólidos** son importantes en ciertas ocasiones (embalses con potenciales problemas de colmatación y elementos de distribución con un elevado ritmo de desgaste). En proyectos multipropósito (con objetivos de control de inundaciones abajo), los **caudales elevados** (asociados a fuertes lluvias) también pueden ser importantes.

➤ **Tabla 25:** Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura hidráulica y tipo de impacto

Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/Consecuencia
Precipitación Temperatura	Cambio en el régimen de caudales líquidos y sólidos.	Ver líneas siguientes.
Cambio en el régimen de caudales líquidos	Cambio en el recurso hídrico disponible y, por tanto, en la capacidad de atender la demanda de recurso.	Cambios en el rendimiento económico del proyecto y en el servicio dado.
Cambio en el régimen de caudales sólidos	Cambio en la capacidad de embalse y, por tanto, en la capacidad de atender la demanda de recurso (colmatación o pérdida de capacidad de reservorio). Define las necesidades de mantenimiento y operación (frecuencia de sustitución y necesidades de mantenimiento y operación de elementos sometidos a desgaste por sedimentos (bombas, etc.)).	Cambio en la capacidad de embalse y por tanto en su valor. Cambios en el rendimiento económico del proyecto/viabilidad y en el servicio dado. Integridad de la infraestructura - CAPEX - OPEX – rentabilidad del proyecto.
Eventos extremos (caudales intensos)	Modificación y condicionamiento de la operativa de los proyectos (especialmente de aquellos con objetivos de control de inundaciones aguas abajo).	Cambios en el rendimiento económico del proyecto y en el servicio dado. Integridad de la infraestructura - CAPEX - OPEX (posibles cambios en los daños evitados o no evitados aguas abajo).

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Métodos y herramientas disponibles para hacer el análisis de las amenazas climáticas

Los impactos sobre la descarga fluvial inducidos por el cambio climático se obtendrán mediante un proceso en dos pasos. El primero consiste en la caracterización de los impactos sobre las variables meteorológicas. El segundo, en la utilización de los modelos hidrológicos para transformar estos cambios en las variables meteorológicas en variaciones sobre las dinámicas hidrológicas, que estarán afectadas también por otros factores no climáticos como son los usos del suelo y otros usos de los recursos hídricos.

En la tabla siguiente se sintetizan los métodos, fuentes de datos, modelos y demás herramientas para valorar las amenazas climáticas de los proyectos de este tipo. Los pasos dados son idénticos a los dados en el apartado 6.3.2 para el sector hidroenergético para la generación de información hidrológica presente y futura.

► **Tabla 26:** Fases para la evaluación de las amenazas climáticas sobre el diseño de un proyecto de dotación de agua

Evaluación del impacto del CC sobre el recurso y eventos extremos (análisis de las proyecciones climáticas)		
1	Distribución inicial de las principales variables que rigen el ciclo hidrológico.	<p>La forma de proceder, en este caso, sería similar a la mostrada en el apartado 6.3.2 bajo el mismo nombre.</p> <p>La información recopilada incluirá, principalmente, datos de precipitación y temperatura. En el caso de que se dispongan de datos de radiación solar incidente y evaporación, también se recopilarán. En la medida de lo posible, la caracterización climática se realizará a escala diaria, aunque la información mensual y anual se utilizará también para la calibración y validación de los diversos procesos de ajuste y limpieza de la información. Toda la información recopilada se utilizará para reconstruir mapas de las distintas variables en todo el dominio de estudio.</p> <p>Más detalle de los tratamientos de la información climática en el apartado 4.</p>
2	Generación de escenarios climáticos para la cuenca estudiada.	La forma de proceder, en este caso, sería similar a la mostrada en el apartado 6.3.2 bajo el mismo nombre.
2.1	Generación de escenarios de usos del suelo para la cuenca estudiada.	La forma de proceder, en este caso, sería similar a la mostrada en el apartado 6.3.2 bajo el mismo nombre.
3	Simulación y calibración de un modelo hidrológico.	<p>La forma de proceder, en este caso, sería similar a la mostrada en el apartado 6.3.2 bajo el mismo nombre.</p> <p>La modelización hidrológica tiene por objetivo caracterizar la producción de escorrentía y los flujos fluviales (tanto líquidos como sólidos) a partir de una caracterización de las dinámicas climáticas. Para ello, se alimenta el modelo, debidamente ajustado y calibrado, con la información recopilada en los apartados anteriores.</p> <p>La calibración de los modelos hidrológicos permite determinar los parámetros de los modelos que mejor representan las dinámicas en las cuencas estudiadas; obteniéndose de esta manera la mejor representación matemática del funcionamiento de las cuencas, mediante el estudio de cómo las dinámicas climáticas (valores de las variables climáticas que se desprenden de los modelos de circulación global y regional certificados por el IPCC) inducen variaciones en las dinámicas hidrológicas.</p>
4	Generación de escenarios hidrológicos futuros.	<p>La forma de proceder, en este caso, sería similar a la mostrada en el apartado 6.3.2 bajo el mismo nombre.</p> <p>Para caracterizar la producción de escorrentía y los flujos fluviales (tanto líquidos como sólidos) se debe alimentar el modelo hidrológico generado con la información recopilada. El modelado hidrológico se realiza en la escala local, en la ubicación seleccionada para el proyecto</p>

► **Fuente:** Elaboración propia.

6.4.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad de un proyecto de infraestructura depende de la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la capacidad para hacer frente y adaptarse. La sensibilidad es el grado en que el sistema de estudio se ve afectado de forma positiva o negativa por la variabilidad de las variables climáticas. A continuación, se detalla los factores que afectan a la sensibilidad asociada a cada uno de los elementos expuestos identificados en el apartado anterior.

► **Tabla 27:** Fases para la evaluación de la sensibilidad de un proyecto de dotación de agua

Evaluación del impacto del CC sobre la cuenca hidrográfica y el recurso		
1	Estimación de la disponibilidad de recurso.	<p>Como se veía en el apartado 6.4.2, la modelización climática e hidrológica permitirá calcular los caudales hidrológicos en cada uno de los puntos de captación y embalses del proyecto, tanto en el escenario actual como en diferentes escenarios futuros.</p> <p>Con ello, se estimarán las consecuencias de la modificación de los caudales sobre la disponibilidad de recurso. Esto se realizará confrontando las demandas estimadas en diferentes escenarios socioeconómicos con los recursos que se estima que se encontrarán disponibles para los escenarios climáticos análogos (p.ej. para el mismo periodo temporal). Cabe tener presente que algunos proyectos de captación aprovechan una fracción pequeña de los recursos totales disponibles (p.ej. municipios pequeños que se abastecen de grandes ríos). En estos casos es posible que una eventual reducción del caudal disponible no afecte significativamente a nuestro proyecto.</p> <p>Dado que en la mayoría de las ubicaciones los recursos varían de una temporada del año a otra, es conveniente tener muy presente en este estudio la estacionalidad (o centrar el análisis en la época de estiaje). Intentar alcanzar una resolución temporal muy elevada (p.ej. diaria) generalmente no aportará beneficios al análisis a escala mensual, por lo que puede ser no aconsejable en la mayoría de las ubicaciones.</p>
Evaluación del impacto del CC sobre las infraestructuras de captación y tratamiento inicial del agua		
2	Estimación del comportamiento de los embalses.	<p>La forma de proceder, en este caso, sería similar a la mostrada en el apartado 6.3.3 bajo el mismo nombre.</p> <p>Es importante considerar cómo se realizará la gestión de embalses en los escenarios futuros, considerando las dinámicas estacionales que podrían verse alteradas. De este modo, podría ser que la gestión anual, mensual o diaria de los embalses se vea revisada para optimizar el aprovechamiento del recurso.</p> <p>Asimismo, las aportaciones de sedimentos generados junto a las proyecciones de caudales sólidos han de considerarse para evaluar los caudales máximos embalsables, ya que una reducción de agua embalsada reduce, a su vez, la capacidad de regulación de los embalses y la disponibilidad de recurso. La colmatación de los embalses podría llevar a la pérdida de su capacidad útil, siendo necesario adelantarse a esa situación, en la medida de lo posible, para planificar las medidas oportunas.</p> <p>En muchos casos, los embalses tienen el papel de controlar avenidas y proteger frente a inundaciones aguas abajo. Este aspecto podría modificar y condicionar su operativa y deberá ser tenido en cuenta en el modelado. No obstante, este es un aspecto que generalmente se encuentra regulado normativamente, y el margen de maniobra por parte de los operadores es muy limitado.</p> <p>Para todo ello, se modela el embalse (o sistema de embalses) mediante un modelo de gestión, como el HEC-ResSim o el software Aquatools, que permita evaluar tanto las entradas como las salidas de los embalses, incorporando la información de las reglas de operación, los volúmenes del embalse y la colmatación de los embalses por aporte sedimentario.</p>
3	Estimación del desgaste de los elementos mecánicos.	<p>La presencia de sedimentos afectará a las plantas de tratamiento, especialmente a los equipos que están en contacto con el agua.</p> <p>En el caso de las turbinas de las centrales hidroeléctricas que comentábamos en el apartado anterior, las relaciones eran "superlineales" (una concentración del doble de sedimentos incrementa en más del doble el ritmo de desgaste). En los documentos revisados en cuanto al desgaste de las bombas ((111), (112)) se apunta a una relación lineal entre desgaste y concentración de sedimentos. No obstante, existe una muy variable tipología de bombas, y sería conveniente realizar una revisión más concienzuda en función de las características del proyecto.</p> <p>En otros componentes de las plantas de tratamiento (decantadores, compuertas, etc.) también la cantidad de sedimentos puede tener efectos menores o despreciables.</p>

Evaluación del impacto del CC sobre la red de distribución de agua

4	Modelización del sistema de distribución y las demandas.	<p>Las consecuencias de la modificación de los caudales sobre la disponibilidad del recurso no pueden ser evaluadas sin analizar el conjunto del sistema de distribución y demanda, ya que el mismo opera de manera coordinada para satisfacer la demanda local.</p> <p>Para abordar la simulación del sistema, es necesario construir un escenario de expansión que represente una evolución de la población y la entrada en funcionamiento de nuevas instalaciones demandantes, evolución socioeconómica, pérdidas, otras fuentes consumidoras como industrias, ganadería, etc.</p> <p>Generalmente, el efecto del cambio climático sobre la red de distribución es muy reducido o muy complejo de evaluar.</p>
---	--	---

Evaluación del impacto del CC sobre la sociedad

5	Evolución de la demanda.	<p>Como se viene insistiendo, la evolución de la demanda (para uso urbano, regadío, generación de energía, etc.) en los escenarios futuros es clave a la hora de diseñar proyectos de dotación de agua. Dado que es un aspecto que debe ser evaluado en conjunto con el sistema de distribución, ya se ha comentado en el punto 3. Solo cabe destacar que el efecto del cambio climático sobre la demanda</p>
6	Control de avenidas.	<p>En muchos casos, los embalses tienen el papel de controlar avenidas y proteger frente a inundaciones aguas abajo. Este aspecto podría modificar y condicionar su operativa y es, por ello, considerado en el modelado de gestión de embalses (visto en la fase 2 de esta tabla).</p>

➤ Fuente: Elaboración propia.

Todo lo reflejado en la tabla anterior apunta hacia un análisis cuantitativo de la vulnerabilidad que permita tomar decisiones en relación con los parámetros de proyecto. No obstante, también el análisis cualitativo o semicuantitativo es frecuente para el estudio de la vulnerabilidad, especialmente desde el planteamiento de las sequías y los mecanismos internacionales y nacionales existentes para hacer frente a estos fenómenos. Existen ejemplos de estudios basados en indicadores que evalúan la vulnerabilidad (o incluso el riesgo) ante sequías combinando índices de amenaza (como por ejemplo los índices comentados en el apartado 6.4.2), de sensibilidad social, ambiental, etc. Estos estudios se han realizado a nivel nacional (por ejemplo (114)) y local (como el estudio presentado en (115)).

En cuanto a la **capacidad de adaptación**, cabe destacar que los proyectos de dotación y distribución de agua (y las instituciones que los promueven y operan) contribuyen de manera global a la riqueza global y el bienestar de la sociedad. Por ello, con carácter general, cuentan con un presupuesto específico para **intervenir en la cuenca** aportante, siendo este un aspecto que determina en mayor medida su capacidad para promover la preservación de la cuenca aportante. A diferencia de los proyectos hidroeléctricos, cabe destacar que las entidades responsables del abastecimiento prestan generalmente una mayor atención a la preservación de la calidad del agua (controlando focos de contaminación, etc.), un aspecto que, para las centrales hidroeléctricas, al margen de lo ya comentado en relación a los sedimentos, puede ser secundario.

La capacidad de adaptación **en la infraestructura** generalmente es menor y más compleja, especialmente si se aborda una vez que se ha construido la misma. En cambio, una característica muy interesante de estos proyectos es que las acciones **“aguas abajo del proyecto”** pueden tener una interesante relación entre coste y beneficio. Por ello, aunque el proyecto constructivo de un sistema de abastecimiento se limite a la infraestructura de captación o a las etapas de potabilización, es conveniente tener presente que su capacidad de adaptación dependerá en gran medida de las posibilidades para reducir la demanda a través de campañas de ahorro de agua, controlar las pérdidas de la red de suministro, optar por sistemas de regadío eficientes, etc.

6.4.4 Paso 4: Evaluación del riesgo

Como en el resto de los sectores de esta guía, el riesgo es considerado como función de la probabilidad (relacionado con la amenaza) y la consecuencia (relacionado con la exposición y vulnerabilidad). En este caso, se propone que las consecuencias sean analizadas para diferentes escenarios climáticos y socioeconómicos.

Abordar un análisis cuantitativo del riesgo climático de proyectos de dotación de agua requiere de importantes recursos y abundante información hidrometeorológica de la(s) cuenca(s) aportante(s). En caso de que se disponga de ellos, es posible generar una serie de modelos acoplados que establezcan la relación entre los diferentes *drivers* climáticos y no climáticos y la provisión de agua.

Sería adecuado establecer diferentes escenarios climáticos y para cada uno de ellos establecer:

- Una probabilidad de que acontezca dicho escenario.
- Unas consecuencias de su materialización para el proyecto, que serían:
 - Sobre el servicio, es decir, sobre su capacidad para abastecer la demanda de agua.
 - Sobre su rendimiento financiero, sintetizado en el OPEX, que se podría ver modificado en función de las necesidades de mantenimiento del sistema (dragados, mantenimiento, etc.).
 - En el caso de que el proyecto cuente también con el objetivo de reducir las inundaciones aguas abajo, las consecuencias de estas inundaciones.

En todo caso, es interesante contar con un periodo de análisis de una cierta longitud (varias décadas) para valorar estos aspectos. El estudio de un periodo corto podría no capturar la variabilidad interanual adecuadamente y no incluir un número suficiente de situaciones en las que la operación de la infraestructura se vea superada. Por ejemplo, si no se captura en el análisis un número significativo de sequías podría arrojar conclusiones erróneas.

➤ **Tabla 28:** Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto de dotación de agua

Evaluación de la probabilidad de ocurrencia		
1	Evaluación de la probabilidad de los escenarios analizados.	<p>La evaluación del riesgo implica un análisis probabilístico de diferentes evoluciones plausibles del clima y sus consecuencias en la viabilidad del proyecto.</p> <p>Aunque se expone más detalladamente en el apartado 4, merece la pena resaltar que, si bien con los modelos comentados es posible calcular las repercusiones de cada escenario estudiado, establecer una probabilidad para cada uno de los escenarios (climáticos y no climáticos) es ciertamente complejo. Ante la falta de elementos de decisión acerca de porque cualquiera de los RCP existentes podría tener más posibilidades de acontecer en el futuro, se propone considerar todos ellos como equiprobables. En cuanto a otros aspectos de los escenarios climáticos, como la selección de aquellos modelos de entre todos los que integran CMIP5 que son más acertados, las técnicas de regionalización o ajuste de sesgo a la ubicación concreta del proyecto más adecuadas, etc. también es complejo y se recomienda una combinación de las salidas de diferentes modelos.</p> <p>No obstante, generalmente no se puede asociar fácilmente una probabilidad a los escenarios climáticos (por ejemplo, no es posible indicar que un RCP4.5 es más o menos probable que un RCP 8.5 en determinada década del futuro) y, o bien suelen ser considerados equiprobables, o, como práctica más habitual, se analizan las series o eventos de especial interés (sequía, fuerte avenida, etc.) de manera independiente y los resultados que se busca obtener son del tipo “ante este escenario, estas serían las previsible consecuencias”.</p>

Evaluación de las consecuencias del CC sobre la capacidad para abastecer la demanda de agua

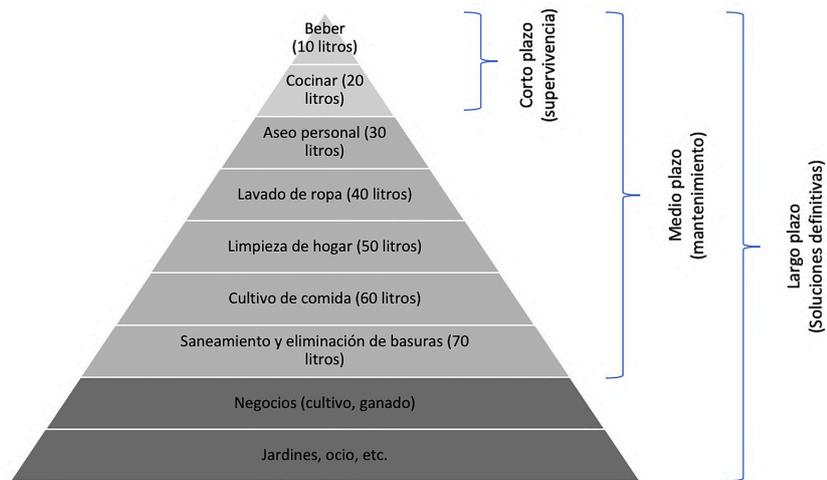
2 Evaluación de las consecuencias del CC sobre la capacidad para abastecer la demanda de agua.

Los efectos del cambio climático sobre la operación de la infraestructura de abastecimiento de agua pueden originar cortes de suministro que afectarán a la población y actividades dependientes.

Cuanto mayor sea la población afectada, mayores serán las consecuencias y por tanto el riesgo.

En este sentido se ha de tener presente que generalmente existirá una priorización para atender las demandas que vendrá establecida por la normativa existente y por las propias necesidades y prioridades de los individuos. En la imagen siguiente se incluye, a modo de ejemplo, una jerarquía propuesta por (116) ante situaciones de crisis.

Figura 45: Jerarquía en el uso del agua en función de su disponibilidad, expresada en litros/día



Fuente: Adaptado de (116)

Como se puede apreciar en esta imagen, el suministro tiene el cometido de atender en primer lugar las necesidades más directamente vinculadas con la supervivencia a corto plazo. Generalmente, una vez satisfechas estas y otras necesidades más o menos básicas los recursos restantes se destinan a fines productivos o de ocio.

Es por ello, que la operación de los proyectos de abastecimiento urbano, al margen de que estén operados por empresas públicas o privadas, son consideradas en primer lugar como un servicio público. Ante graves problemas de abastecimiento, la consecuencia directa serían mermas en el servicio que pueden ser simuladas y cuantificadas en termino de desabastecimiento (p.ej. % demanda por habitante atendido).

No obstante, es complejo transformar el daño social generado por estos déficits en términos económicos. Una opción es considerar las alternativas disponibles para atender a la población desabastecida, como camiones cisterna (ver (117)), pozos, etc.

Además de estos costes y molestias “sociales”, la falta de agua también implica daños económicos directos como pueden ser la disminución de la producción agrícola de áreas de regadío abastecidas por nuestro proyecto, el cese de operación de instalaciones industriales dependientes, etc. Para evaluar estos aspectos es preciso emplear modelos y datos específicos de las actividades productivas.

Por último, se ha de tener presente que los impactos de las sequías dependen de la vulnerabilidad y de la habilidad de las comunidades para enfrentar el fenómeno, lo que a su vez está influido por sus condiciones socioeconómicas. Esto tiene un efecto perverso e inesperado.

Evaluación de las consecuencias del CC sobre el proyecto

4	Evaluación de las consecuencias del CC sobre el OPEX.	<p>El OPEX contempla costos relacionados el régimen de operación y mantenimiento, necesarios para el funcionamiento adecuado de la instalación.</p> <p>El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá determinar la evolución de estos costos y realizar ajustes en la rentabilidad a largo plazo de la instalación que podrá verse alterada por los sedimentos (caudal sólido), con impacto directo en las necesidades de dragado de embalses y de mantenimiento de los mismos a través de operaciones de lavado, etc.</p> <p>Los sedimentos también pueden afectar al ritmo de desgaste de ciertos equipos como las bombas, incrementando su ritmo de desgaste y reduciendo su vida útil.</p>
5	Evaluación de las consecuencias del CC sobre el CAPEX.	<p>Como se viene comentando, el cambio climático puede alterar los procesos erosivos, lo que modificaría las cantidades de sedimentos que alcanzan la infraestructura. Esta situación incrementa el ritmo de los procesos de colmatación y la velocidad de desgaste de elementos como las bombas. Si no es posible establecer medidas de mantenimiento que mantengan la vida útil de estos bienes en el escenario base, ambos aspectos aceleran la pérdida de valor de estos activos, algo que puede ser cuantificado en términos de pérdida de capital.</p>

Evaluación de las consecuencias aguas abajo de operar para protección contra inundaciones

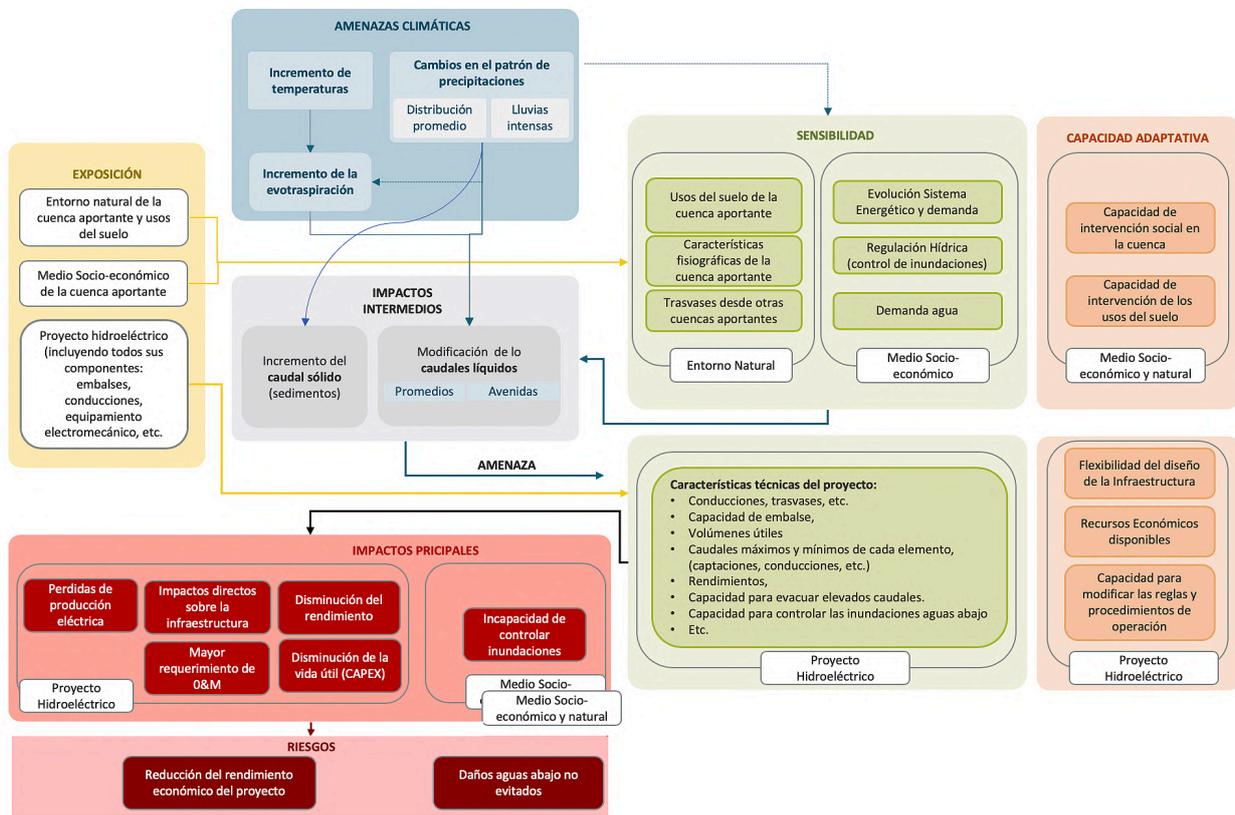
6	Evaluación de los impactos causados y evitados aguas abajo.	<p>El cambio climático, y más concretamente, los cambios en las frecuencias e intensidad de fuertes avenidas determinarán la capacidad de los embalses que cuenten entre sus objetivos la protección frente a inundaciones aguas abajo.</p> <p>Pero también las tendencias sociales y poblacionales establecerán cuales son las consecuencias que tendrán estas avenidas aguas abajo. Por ejemplo, podría darse el caso de que los desarrollos urbanos aguas abajo, la ausencia de mantenimiento de los cauces, etc. limiten en el futuro los caudales que el proyecto hidroeléctrico puede liberar sin causar problemas aguas abajo, condicionando su operación. Otro aspecto que se puede tener presente es que, el crecimiento económico origine que los daños causados aguas abajo cada vez tengan un mayor valor económico, por lo que es aún más interesante evitar los mismos.</p>
---	---	---

➤ Fuente: Elaboración propia.

6.4.5 Resumen de componentes de riesgo

La siguiente figura se resumen los diferentes componentes de riesgo de un proyecto de dotación típico. De nuevo se ha de destacar que por el elevado número de posibles objetivos con los que pueden contar estos proyectos, pueden existir particularidades que no se recojan en la misma.

➤ **Figura 46:** Componentes de riesgo para los proyectos de dotación de agua



Nota: Dependiendo de la ubicación del proyecto y sus características, las tendencias indicadas pueden ser diferentes (p.ej. incremento de las lluvias promedio, mayores caudales, mayor capacidad de generación energética).

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

La tabla siguiente se sintetizan los aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo climático de dotación de agua.

➤ **Tabla 29:** Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo climático de un proyecto de dotación de agua

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de dotación de agua	Indicadores de cambio climático a monitorizar en proyectos de dotación de agua
Amenaza	Cambios en el recurso.	Incremento de temperaturas.
	Cambios en la eficiencia y operación.	Cambios en el patrón de precipitaciones. Incremento de la evapotranspiración. Incremento del caudal sólido (sedimentos). Modificación de los caudales líquidos.
Exposición	Proyecto de captación y dotación de agua.	Equipamiento, considerando sus características como caudales, capacidades, rendimientos, etc. que determinarán su operación. Obras de infraestructura (presa, vertedores, etc.) que, de alguna manera, puedan ser representados por un valor monetario. Cambio en la frecuencia de las tareas de operación y mantenimiento (limpieza de embalses y conducciones, reparación y mantenimiento de turbinas, etc.).
	Población potencialmente afectada y demanda de agua (caudal ecológico).	Población potencialmente afectada por inundaciones aguas abajo del proyecto. Caudales máximos que causan inundaciones y daños aguas abajo del proyecto. Caudales mínimos que causan alteraciones ecosistémicas aguas abajo del proyecto y/o comprometen otros usos del agua (abastecimiento, riego, etc.). Usos consuntivos aguas abajo que el proyecto debe atender.
Sensibilidad	Características y cambios en las características hidrológicas de la cuenca aportante.	Comportamiento hidrológico de la cuenca y muy especialmente cambios en los usos del suelo que puedan modificar las relaciones entre precipitación y caudal (por ejemplo, cambio en la respuesta hidrológica de la cuenca por mayor presencia de vegetación) y/ o alterar la susceptibilidad del suelo a la erosión (que por ejemplo puede incrementarse con la deforestación).
	Otras cuencas aportantes (aguas arriba).	Aportes de recursos desde otras cuencas disponibles para hacer frente a potenciales cambios en los recursos propios de la cuenca. Se ha de tener presente que las mismas también se pueden ver afectadas por el cambio climático y otras tendencias.

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de dotación de agua	Indicadores de cambio climático a monitorizar en proyectos de dotación de agua
Capacidad Adaptativa	Diseño del equipamiento e infraestructura.	Adecuación de instalaciones y equipamiento a las características del sitio y su capacidad para adaptarlos a la evolución de las variables climáticas (flexibilidad de diseño para adaptarse a cambios en el caudal, posibles cambios en las capacidades, etc.).
	Capacidad de intervención social en la cuenca.	Características socioeconómicas de la cuenca, incluyendo los usos del suelo y la capacidad para plantear usos alternativos que favorezcan una gestión sostenible de cuenca. Evolución de las variables socioeconómicas. Áreas protegidas. Mecanismos de gobernanza en la cuenca.
	Capacidad de intervención en las zonas protegidas frente a inundaciones.	Características y potenciales intervenciones en población potencialmente afectada por inundaciones aguas abajo del proyecto.
	Capacidad de intervención en las actividades consumidoras de agua.	Evolución de las demandas de agua que atiende el proyecto. Posibilidades para reducir y controlar las demandas de recurso hídrico.
	Rendimiento y características económicas del proyecto.	Evolución de la demanda de agua. Retribución por los servicios prestados. Costes de suministros, combustibles, etc.
	Flexibilidad de las normas de operación y otros condicionantes de operación.	Capacidad para operar con diferentes rangos y directrices en cuanto a la gestión de los embalses, operación de las instalaciones, etc.
	Complementariedad con otras cuencas.	Posibilidad de plantear trasvases entre cuencas o cambios en los volúmenes trasvasados.
	Sistema energético.	A considerar en proyectos multipropósito: Complementariedad de la planta con otras fuentes de energía, capacidad del sistema para proveerse de otras fuentes, reducir el consumo, etc.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

En la redacción de esta tabla se ha considerado la perspectiva apuntada en el apartado 6.4.1, según la cual, dentro de los límites de nuestro estudio conviene incluir la cuenca hidrográfica aportante de nuestro proyecto de abastecimiento. Los aspectos que determinan su hidrología se incluyen en la tabla dentro de los apartados sensibilidad del sistema estudiado, ya que definen como nuestro proyecto se verá afectado por cambios en la precipitación y otras variables climáticas (por ejemplo, definen las relaciones lluvia – caudal). Al margen de que, como en el resto de sectores, esta tabla se ha de ajustar por tanto a los planteamientos que hayamos establecido al inicio del análisis (estudiar solo el proyecto, su cuenca, la población servida, etc.) es conveniente revisar el listado de aspectos e indicadores propuesto en función de las características concretas del proyecto planteado. La asignación de indicadores a los diferentes componentes de riesgo puede ser interpretada y modificada en función de las características y condicionantes de la evaluación realizada.

6.5 Vial

La red de transporte terrestre presenta en la actualidad una vital importancia para el desarrollo de una sociedad. En la mayoría de América Latina, la infraestructura viaria sustenta el movimiento de personas y mercancías. Las carreteras y autopistas suponen los elementos de interconexión entre los distintos nodos del tejido socioeconómico, los productivos y los de consumo. El desarrollo de infraestructura viaria con suficiente capacidad y cobertura de las necesidades de la demanda de comercio permite cubrir esas demandas y por tanto contribuir al crecimiento económico.

Sin embargo, las vías de transporte terrestre no deben ser entendidas desde un punto de vista individual, sino que deben estudiarse como parte del sistema del cual forman parte. La capacidad de funcionar como una red aporta a la infraestructura viaria un hecho diferencial y multiplicador de sus efectos positivos que no debe de ser menospreciado.

El grado de calidad, conservación y mantenimiento que puede presentar una vía determina en gran medida los costos de transporte asociados que a su vez repercuten en los mercados y en los niveles de precios y de renta. De modo paralelo, los cambios que puede experimentar la infraestructura debido al impacto de variables climáticas pueden afectar también a estas mismas variables. Es por ello por lo que el análisis de este tipo de infraestructura frente a estos impactos climáticos resulta de vital importancia y requieren de especial atención.

La consideración del cambio climático en el diseño de los proyectos viales puede redundar en ahorros significativos durante su etapa de explotación o vida útil (118). Los pasos fundamentales a seguir para ello se resumen en:

- Contextualización del proyecto.
- Identificación de las amenazas y la valoración de la exposición del proyecto a las mismas.
- Definición de escenarios de cambio climático y horizontes temporales y análisis de la evolución de las amenazas que inciden en el proyecto en cada uno de ellos.
- Análisis del impacto de los eventos climáticos detectados sobre la infraestructura y su operación.
- Diseño del proyecto para hacer frente a los eventos climáticos detectados.
- Evaluación de la rentabilidad o atractivo del proyecto.

No obstante, el cambio climático también se ha de considerar durante la etapa de operación de las infraestructuras y medios de transporte, por ejemplo, a través del desarrollo de planes para hacer frente a eventos extremos que consideren los cambios previstos en su intensidad y frecuencia (119).

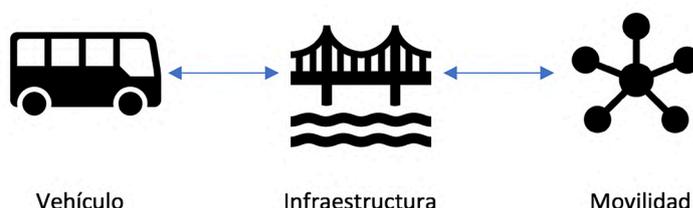
6.5.1 Paso 1. Contextualización del proyecto respecto al CC

La infraestructura vial se integra en la red de transporte que da servicio a una sociedad. Una infraestructura viaria puede ser entendida como un sistema en el cual se agrupan las distintas partes que lo conforman. Es gracias a la conjunción y a las interrelaciones que existen entre estas partes que la vía puede funcionar correctamente. Sin embargo, cualquier impacto sobre una de las partes puede implicar también que el impacto afecte negativamente al conjunto del sistema. El cambio climático afecta principalmente a tres grandes aspectos del transporte:

- **La infraestructura:** La integridad de los diversos componentes de la propia obra, y su capacidad para ofrecer servicio en las debidas condiciones de seguridad pueden verse afectados por las condiciones climáticas a las que se ven expuestos y por lo tanto a sus cambios.
- **Los vehículos:** El funcionamiento y la durabilidad de diferentes componentes de los vehículos están vinculados a las condiciones climáticas. La variación de las condiciones climáticas, tanto medias como extremas, planteará nuevos retos en el diseño de los vehículos para garantizar su eficiencia y seguridad.
Por ejemplo, con el aumento de la temperatura muchos tipos de vehículos pueden sufrir por sobrecalentamiento. En el caso concreto del transporte por carretera, los neumáticos son un elemento crítico para la seguridad que se deteriora más rápidamente con temperaturas elevadas.
- **La movilidad:** Como consecuencia de la variación climática variarán no solo los patrones de distribución de la población, sino también, los patrones de movilidad, encaminamiento y selección modal de viajeros y mercancías.

Un ejemplo serían los hábitos turísticos, que pueden desplazarse a zonas de clima más suave.

➤ **Figura 47:** Aspectos a considerar a la hora de evaluar los impactos del cambio climático en el transporte



➤ **Fuente:** Elaboración propia.

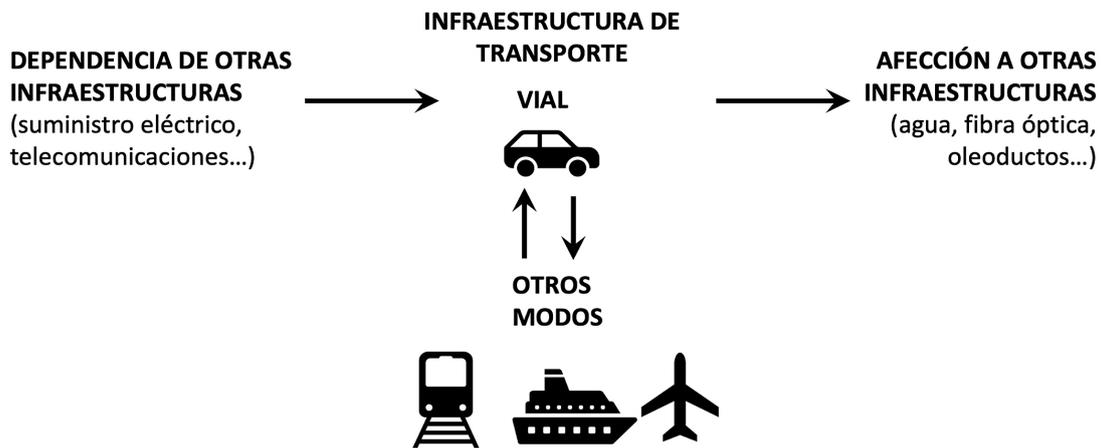
Esta guía se centra en la infraestructura, pero no debe olvidarse que un análisis a mayor escala debería contemplar la consideración de los otros dos y sus interrelaciones.

Otros aspectos que quedan fuera del alcance de esta guía, pero que sí se encuentran dentro del sistema más completo asociado al funcionamiento de la infraestructura vial y son susceptibles de verse afectados por variaciones climáticas serían:

- Otros medios de transporte, como el aéreo, ferroviario o naval, que convivan con el transporte por carretera. Como indicamos, al final la movilidad presenta muchas interconexiones entre los diferentes medios de transporte.
- Otros tipos de infraestructura que suministran servicios al transporte por carretera, como pueden ser el suministro eléctrico o las telecomunicaciones, que resultan vitales para llevar a cabo las actividades de explotación y mantenimiento de las carreteras (la operación de los centros de control, señales luminosas, paneles informativos, la operativa del transporte público...).
- Otros servicios que transcurren paralelos o se han instalado aprovechando el trazado y soporte de la propia vía, como pueden ser diversas infraestructuras de distribución de agua, fibra óptica u oleoductos (por ejemplo, puentes que soportan la vía, pero que también son aprovechados por cables, conducciones, etc.).

Un análisis a mayor escala debería abordar igualmente las interdependencias entre el funcionamiento de todos estos servicios y su infraestructura.

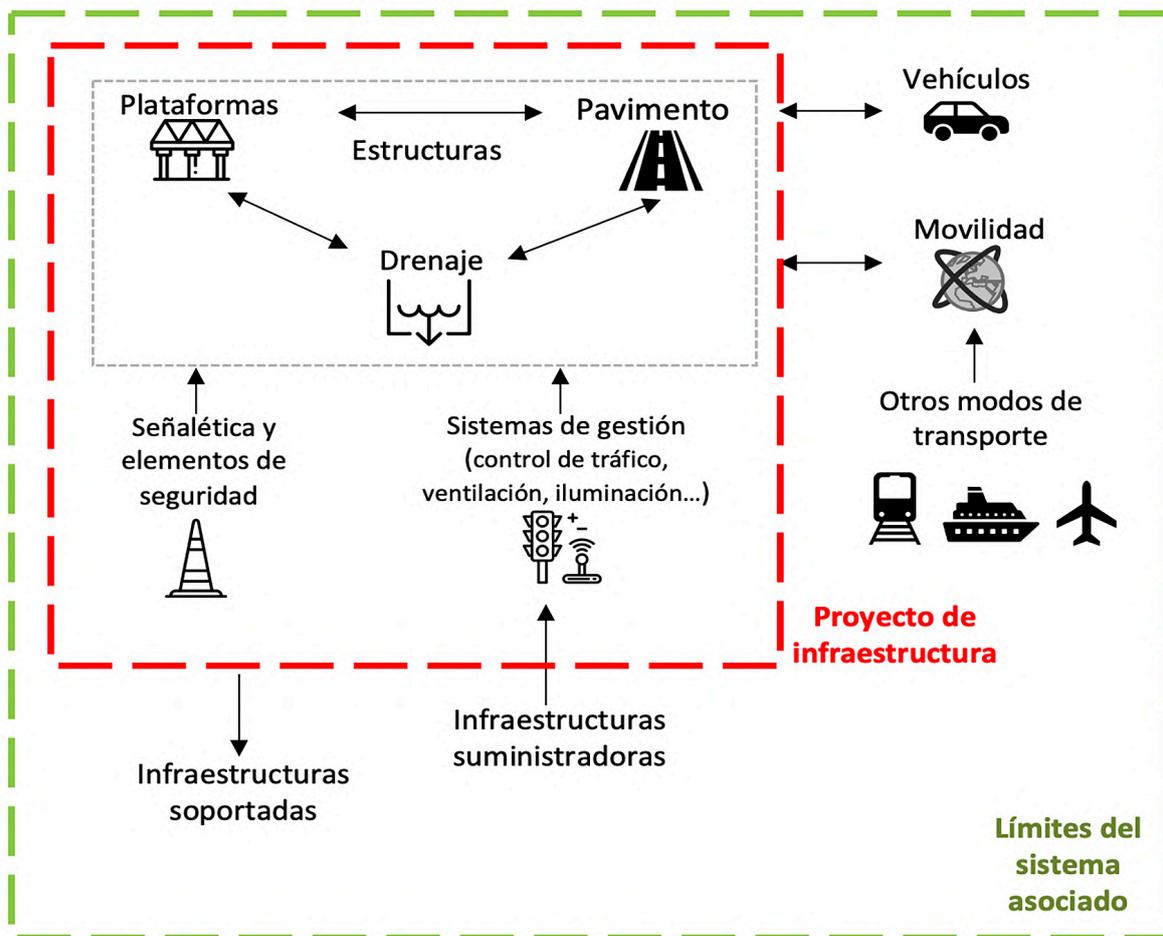
Figura 48: Interdependencias en el sector del transporte



Fuente: Elaboración propia.

Centrando el objeto del proyecto en la infraestructura viaria, se definen a continuación sus diferentes componentes, todos ellos susceptibles de verse afectados por las variaciones que se derivarán del cambio climático esperado. La figura resume los contenidos del proyecto objeto de estudio frente a los límites del sistema completo asociado.

➤ **Figura 49:** Contexto de evaluación: propuesta de límites del sistema objeto de estudio



➤ **Fuente:** Elaboración propia.

De acuerdo con la figura, el sistema de infraestructura viaria está conformado por las siguientes partes o subsistemas:

- Las plataformas o explanaciones, entendidas como los cimientos de la infraestructura, y que es la superficie sobre la cual se disponen el resto de los subsistemas.
- El pavimento, que es la zona de la vía más próxima a la superficie y sobre la cual circulan los vehículos.
- El drenaje, que incluye todos los elementos cuyo objetivo es la evacuación del agua de la vía. Incluye elementos específicos que permiten el paso transversal de cursos de agua o conducir el agua de lluvia para que no inunde el pavimento (cunetas, etc.) También el drenaje subterráneo, generalmente menos obvio pero muy importante para evacuar el agua del conjunto de la estructura.
- Los elementos de seguridad, entre los que se incluyen la señalización vertical, los pórticos de información, luminarias y similares.
- Las estructuras, que a su vez pueden dividirse en puentes y túneles, y que son entendidos como un subsistema propio debido a sus particulares características.

Aunque el sistema de una infraestructura viaria está definido por los subsistemas anteriores, existen fuertes relaciones entre una vía y otros sistemas que bien pueden afectar al impacto (como la tipología de la cuenca en la que la vía está localizada, ...) o pueden depender de ella como otras infraestructuras viarias, o en un sentido más amplio, el conjunto de la red de transportes de pasajeros y mercancías (incluyendo otros modos de transporte). El impacto sobre uno de los subsistemas de la infraestructura viaria no solo afecta a la vía y su funcionamiento, sino también al resto de sistemas relacionados. La inclusión de estos otros sistemas implica plantear el problema desde un punto de vista global, no local, y necesita de un tratamiento diferenciado al que en esta guía se plantea.

6.5.2 Paso 2. Identificación de amenazas y valoración de la exposición

Para la identificación de las amenazas y la valoración de la exposición del proyecto a las mismas, tras definir los límites del sistema estudiado y sus componentes, se debe generar la cadena de impacto para cada una de las amenazas que se consideren de interés para el proyecto. Para su elaboración, se comienza definiendo los *drivers* climáticos y sus impactos potenciales.

Drivers climáticos e impactos potenciales

En la evaluación del riesgo climático del sistema vial se deben considerar las variables climáticas cuyos cambios afecten a la fiabilidad y el funcionamiento de la infraestructura vial. Los cambios en las variables climáticas debido al cambio climático se denominan *drivers* climáticos.

El estudio debe incluir como las siguientes variables:

- Precipitación (lluvia y nieve).
- Temperatura.
- Viento.
- Ciclones tropicales.
- Solo si está en la costa: Aumento del nivel medio del mar, Oleaje, Marea meteorológica, Marea astronómica, etc.

Cambios en la nieve, lluvia o viento pueden resultar en retrasos, atascos, desvíos o daños sobre los activos del sistema, repercutiendo sobre los agentes involucrados en la gestión de la infraestructura viaria y también en los usuarios y la sociedad en general.

Cada impacto climático puede afectar potencialmente tanto al tráfico como a la infraestructura. El grado de afección depende de la magnitud del cambio en la variable climática considerada, de la localización de la infraestructura viaria, de la exposición y también del grado de vulnerabilidad de la vía.

Cabe distinguir, por tanto, dos grandes bloques en cuanto a las consecuencias esperadas de la variación del clima sobre la gestión de la infraestructura viaria construida y sus costos:

- Por un lado, el aumento de los costos de mantenimiento, incluyendo limpieza, adecuación o reparación.
En este caso, asociado principalmente a la variación de parámetros medios, con una mayor inversión en mantenimiento se elimina la afección a terceros.
- Por otro lado, el aumento de los costos de resolución de situaciones de sobrecarga o incapacidad de prestar servicio de la infraestructura.
En este caso, asociado principalmente al aumento de eventos meteorológicos extremos, se producen interrupciones y retrasos del tráfico, afectando a terceros. La capacidad de la infraestructura para hacer frente a la situación climática se ve sobrepasada pudiendo llegar a tener consecuencias catastróficas.

En base a todo lo anteriormente expuesto, la siguiente tabla resume las principales variables climáticas frente a los elementos de la infraestructura vial a los que afectan, resaltando aquellos que pueden suponer un mayor impacto y merecen, por tanto, un análisis detallado.

Tabla 30: Variables que inciden en los proyectos de infraestructura vial y tipo de impacto

Elementos del proyecto expuestos	Driver climático									Impactos intermedios	
	Torrencialidad de la precipitación	Temperatura elevada	Oscilación térmica	Olas de calor / sequías	Soleamiento	Subida del nivel del mar	Intensidad del viento	Nieve	Tormentas eléctricas	Avenidas extraordinarias en ríos	Variaciones del nivel freático
Pavimento	Deterioro de la superficie del pavimento	Envejecimiento acelerado	Envejecimiento acelerado		Envejecimiento acelerado			Acumulación de nieve			
Calzada	Inundación			Presencia de finos. Pavimento deslizante.		Inundación por subida extraordinaria	Obtención por arrastre de objetos. Visibilidad	Acumulación de nieve			Asentamientos. Desperfectos por hinchamiento/retracción del terreno.
Márgenes				Incendio							
Plantaciones				Desertificación.							
Taludes	Desestabilización Erosión.			Desestabilización (por afección a plantaciones)						Desestabilización. Erosión.	
Terraplenes	Desestabilización Erosión.			Desestabilización (por afección a plantaciones)		Sumerencia				Desestabilización. Erosión.	
Sistema de drenaje	Saturación			Presencia de finos. Obturación.			Obtención por arrastre de objetos			Saturación	
Cimentación (pilas de puentes, estribos, terraplenes...)										Socavación	
Señales, barreras, marcas viales.		Envejecimiento acelerado			Envejecimiento acelerado		Desestabilización de paneles / señales				
Sistemas de gestión del tráfico, iluminación, ventilación de túneles									Corte del funcionamiento por afección del suministro eléctrico		
Servicio	Afección al servicio	Afección al servicio			Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio

Nota: se destacan en color naranja más oscuro los que se consideran más importantes y generalizados.

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha indicado anteriormente, no todas las variables mencionadas impactan de igual manera. La tabla siguiente sintetiza las principales amenazas o *drives* climáticos a evaluar y sus efectos/impactos.

➤ **Tabla 31:** Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de infraestructura vial y tipo de impacto

Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/Consecuencia
Precipitación (cambios de patrones /aumento de la torrencialidad)	Inundación de la calzada por avenidas extraordinarias de ríos, saturación del sistema de drenaje y elementos de desagüe de la calzada, sedimentación acumulada u obstrucción del sistema de drenaje.	Integridad de la infraestructura - CAPEX - OPEX – rentabilidad del proyecto: <ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la inversión inicial por mayor dimensionamiento requerido para el drenaje. • Aumento del gasto en reparaciones/sustitución de elementos del sistema de drenaje. • Parada de operación debido a precipitación intensa: <i>aquaplaning</i>, bloqueo por arrastre de obstáculos, inundación... • Incremento del mantenimiento del sistema de drenaje debido al aumento de intensidad de la precipitación.
	Deterioro de la superficie del pavimento.	Integridad de la infraestructura - OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del mantenimiento del pavimento debido al aumento de intensidad de la precipitación. Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta seriamente dañada.
	Erosión e inestabilidad de taludes y terraplenes.	Integridad de la infraestructura - OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del mantenimiento de los taludes y sistema de drenaje debido al aumento de intensidad de la precipitación. Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta dañada.
	Socavación de la cimentación por avenidas extraordinarias en corrientes de agua.	Integridad de la infraestructura - CAPEX - rentabilidad del proyecto. Aumento de la inversión inicial en cimentaciones (de pilas y estribos de puentes), taludes o terraplenes paralelos a cauces de ríos. Aumento de la inversión inicial en obras de protección. Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta dañada.
	Variaciones del nivel freático. Asientos de la calzada Desperfectos en la calzada por efecto de la retracción/hinchamiento del terreno.	Integridad de la infraestructura - CAPEX - OPEX – rentabilidad del proyecto: <ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la inversión inicial para drenaje subterráneo. • Aumento del gasto en reparaciones de calzada. • Puede afectar al servicio si la infraestructura resulta dañada.
Temperatura ambiente	Cambios en el ritmo de deterioro de la superficie del pavimento (aparición de roderas y fisuras no estructurales por oxidación prematura del ligante).	Integridad de la infraestructura - OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del mantenimiento del pavimento debido al aumento de la temperatura. Gran importancia de los ciclos térmicos (que afectan a la contracción y dilatación), no solo la temperatura máxima.
	Ritmo de envejecimiento (envejecimiento acelerado de marcas viales por aumento de temperatura).	Integridad de la infraestructura - OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del gasto en mantenimiento por repintado de marcas viales.
	Ritmo de envejecimiento (rotura de elementos de unión por dilatación excesiva en barreras de seguridad metálicas (tramos largos)).	Integridad de la infraestructura - OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del gasto en mantenimiento por reposición de elementos de unión.

Driver climático	Efecto/Impactos Intermedio	Impacto económico/Consecuencia
Sequías y olas de calor	Afección sobre especies vegetales en medianas o márgenes.	OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del gasto en mantenimiento por reposición de plantaciones en caso de aumento de la amenaza.
	Estabilidad de taludes por afección sobre especies vegetales plantadas.	Integridad de la infraestructura - OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento de la inversión para estabilizar taludes en caso de aumento de la amenaza.
	Afección sobre el riesgo de incendio en los márgenes de la carretera.	Integridad de la infraestructura - CAPEX - OPEX – rentabilidad del proyecto. En caso de aumento de la amenaza: <ul style="list-style-type: none"> Incremento del gasto de mantenimiento en control de la vegetación en los márgenes. Aumento de la inversión en sistemas de control de incendios.
	Colmatación del sistema de drenaje por arrastre de finos en caso de desertificación.	Integridad de la infraestructura - OPEX – rentabilidad del proyecto. Aumento del gasto en mantenimiento para limpieza del sistema de drenaje.
	Calzadas y pavimentos con presencia de arrastres, calzadas deslizantes.	Afección a la circulación.
Soleamiento	Deterioro de pavimento y elementos de señalización afectados por la incidencia de rayos ultravioleta.	Integridad de la infraestructura - OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del gasto en mantenimiento por reposición de señales en caso de mayor soleamiento.
Nivel medio del mar	Sumergencia del terraplén.	Integridad de la infraestructura - CAPEX - rentabilidad del proyecto. Incremento de la inversión de capital inicial debido al aumento del nivel medio del mar. Puede afectar al servicio.
Eventos extremos (vientos fuertes, mar, tormentas eléctricas, nieve)	Escombros en la carretera, sistema de drenaje y condiciones de seguridad.	Reducción del nivel de servicio o parada de operación debido a vientos fuertes.
	Poca visibilidad, arena en la carretera, condiciones de seguridad.	Reducción del nivel de servicio o parada de operación debido a tormentas de arena. OPEX – rentabilidad del proyecto. Incremento del mantenimiento debido a tormentas de arena.
	Daños en barreras acústicas, paneles, pórticos y señales.	Integridad de la infraestructura - CAPEX - rentabilidad del proyecto. Incremento de la inversión de capital inicial debido a daños provocados por vientos fuertes. Afecciones al nivel del servicio o interrupciones para reparar los daños.
	Inundación costera.	Integridad de la infraestructura - CAPEX - rentabilidad del proyecto. Aumento de la inversión de capital inicial debido a daños provocados por inundación costera. Puede afectar al servicio.
	Daños puntuales en instalaciones de iluminación y gestión del tráfico. Daños puntuales en sistemas de ventilación en túneles.	Integridad de la infraestructura - CAPEX – OPEX - rentabilidad del proyecto: <ul style="list-style-type: none"> Aumento de la inversión inicial en seguridad de sistemas eléctricos en previsión de eventos de tormenta eléctrica. Aumento del gasto en reparación de sistemas eléctricos en caso de aumento de frecuencia/intensidad de eventos de tormenta eléctrica.
	Acumulación de nieve.	Perdida de nivel de servicio o parada de operación de la vía debido a la nieve acumulada. Integridad de la infraestructura - OPEX - rentabilidad del proyecto. Incremento del mantenimiento invernal debido a la acumulación de nieve/hielo y torrencialidad de precipitación en zonas frías.

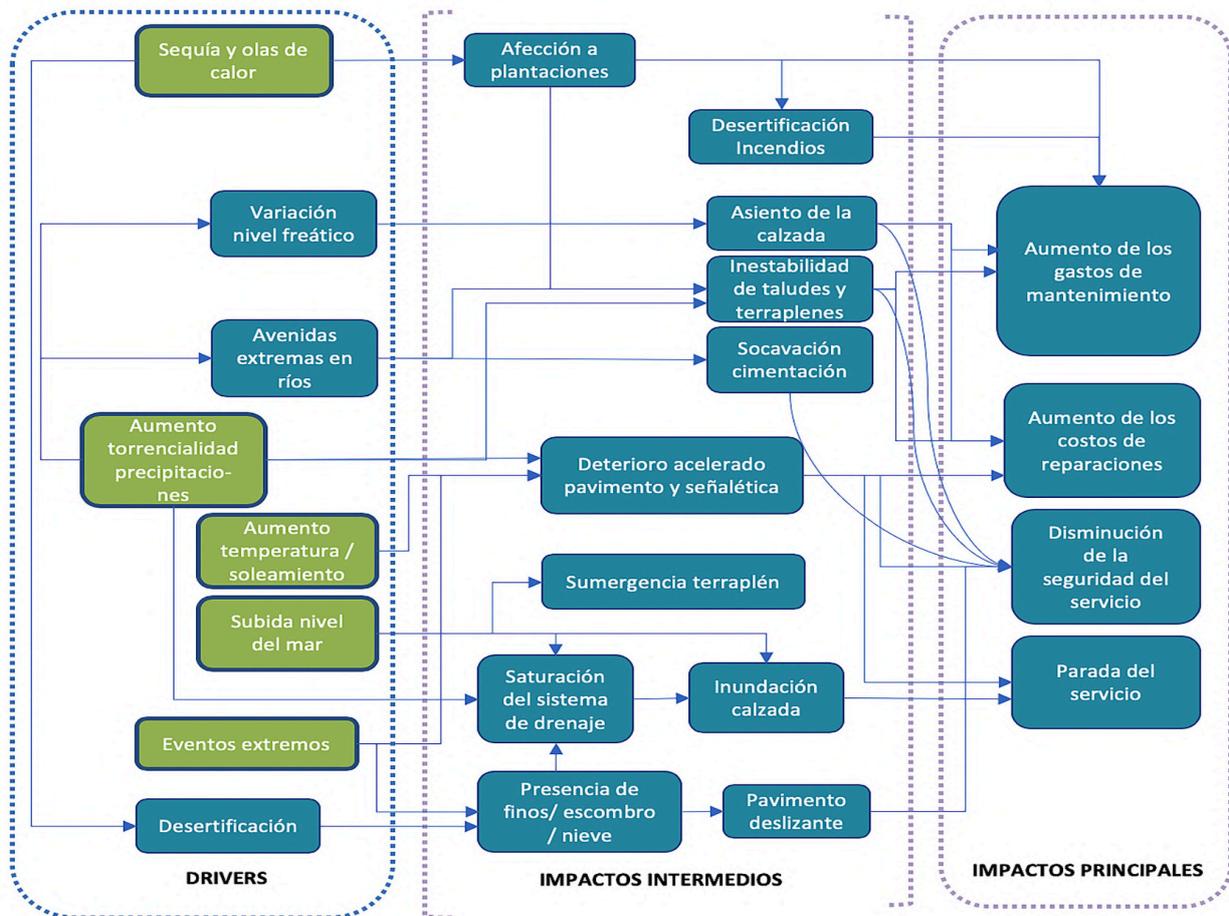
En este tipo de proyectos adquiere especial importancia la precipitación. Para diseñar adecuadamente una vía, especialmente en cuanto a aspectos como su drenaje, obras de seguridad y tipo de pavimento, se requiere conocer no solo precipitaciones anuales, sino precipitaciones mensuales y, casi siempre, precipitaciones máximas en 24 horas o valores horarios que permitan obtener curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para trabajar con valores máximos. En el caso piloto relativo a infraestructura vial (ver Tomo 3) se puede apreciar la metodología planteada para la determinación de las curvas IDF y su proyección a futuro.

Identificadas las principales variables climáticas que aumentarán las solicitudes a la infraestructura vial, para que esta pueda mantener su servicio en las debidas condiciones de seguridad. Cabe mencionar también el caso de un impacto positivo que se producirá en zonas en las que **disminuirán las nevadas y heladas consecuencia del aumento de temperaturas:**

- Con la disminución del número y severidad de nevadas y heladas, disminuye la necesidad de mantenimiento invernal (vertido de sal, empleo de máquinas quitanieves...) y mejoran las condiciones de explotación de las carreteras (se evita el cierre de puertos, la accidentalidad por pavimento deslizante...).
- Además, teniendo en cuenta que el efecto de la nieve y el hielo sobre las carreteras no se limita a las condiciones de circulación del tráfico, sino que también interviene en el envejecimiento prematuro de las capas de rodadura del pavimento, se puede afirmar que dicho envejecimiento del pavimento se ralentizará por efecto de la disminución de los ciclos hielo deshielo y de la menor cantidad de fundentes utilizados.
- Por otro lado, el hielo también incide sobre el estado de las estructuras, por lo que su disminución reducirá la degradación de las mismas por esta causa.
- Por último, el hielo también contribuye a un aumento de los desprendimientos en taludes de roca, que se reducirían por tanto con el aumento de temperaturas.

En el siguiente esquema se resumen las cadenas de impacto de los *drivers* climáticos más destacados dentro de todo el conjunto expuesto en la tabla anterior:

➤ **Figura 50:** Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos de infraestructura vial



Nota: dependiendo de la ubicación del proyecto es posible que los drivers tengan el sentido inverso al indicado, en cuyo caso, el sentido de los impactos también se verá invertidos (los aspectos que se indica que se ven incrementados podrían disminuir y los que se apunta que se verían reducidos se verían aumentados). Se muestran en verde los aspectos climáticos, en rojo otros aspectos que pueden tener un efecto significativo en el proyecto y en azul los impactos intermedios y principales.

Métodos y herramientas disponibles para hacer el análisis de las amenazas climáticas

En la tabla siguiente se sintetizan los métodos, fuentes de datos, modelos y demás herramientas para valorar las amenazas climáticas principales de los proyectos de este tipo.

➤ **Tabla 32:** Fases para la evaluación de las amenazas climáticas sobre el diseño de un proyecto de infraestructura vial

Definición de escenarios de cambio climático y horizontes temporales																							
1	Definición de escenarios de cambio climático y horizontes temporales.	<p>Gran parte de las carreteras y vías que se proyectan y construyen actualmente, con una vida útil nominal de hasta 50 o 100 años, basan su diseño en registros históricos del clima, sin tener en cuenta las variaciones del clima esperadas. Sin embargo, debido al cambio climático, los registros históricos ya no son una base fiable para predecir situaciones futuras, siendo necesario contemplar escenarios futuros y definir el horizonte temporal más apropiado para cada estudio.</p> <p>En cuanto a escenarios, como se menciona anteriormente, el IPCC establece cuatro trayectorias de concentración representativas (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y) que son similares hasta 2030, año a partir del cual divergen. Se recomienda, por tanto, considerar al menos dos escenarios potenciales, uno probable (RCP4.5) y otro más pesimista (RCP8.5).</p> <p>Entre estos escenarios, se deben considerar tres horizontes temporales: corto, mediano y largo plazo (por ejemplo, 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099). Es necesario establecer un horizonte a medio plazo, ya que la infraestructura viaria suele tener una vida útil de 30 años y los agentes del sector viario pueden estar más interesados en los cambios a medio plazo que en los cambios a largo plazo. Los estudios de variabilidad climática también pueden considerar escenarios plausibles de cambio climático de alto nivel, que son escenarios de cambio climático extremo fuera de los rangos estándar de los percentiles 10 a 90 presentados en el IE5 del IPCC.</p> <p>En todo caso, dentro de los componentes de una infraestructura viaria se distinguen elementos con vidas útiles muy diferentes, desde la estructura de un viaducto que se puede proyectar con una vida útil nominal de 100 años, a los elementos de señalización con vidas útiles esperadas mucho menores. Por ello, en función del elemento a considerar, se deberá distinguir también el horizonte de tiempo más apropiado a tener en cuenta en función de su vida útil esperada.</p> <table border="1" style="margin: 10px auto;"> <thead> <tr> <th>Elemento de la infraestructura vial susceptible de verse afectado por el CC</th> <th>Vida útil de diseño / Vida esperada</th> <th>Horizonte climático a considerar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Señalización</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Pavimento</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Drenaje</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Taludes</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Estructura Viaducto</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Una tabla como la anterior recopilaría, en la fase inicial de diseño de la infraestructura, los horizontes de tiempo (corto, medio o largo plazo) a tener en cuenta a la hora de valorar las opciones para el diseño de cada elemento en función de su vida esperada.</p>	Elemento de la infraestructura vial susceptible de verse afectado por el CC	Vida útil de diseño / Vida esperada	Horizonte climático a considerar	Señalización			Pavimento			Drenaje			Taludes			Estructura Viaducto			...		
Elemento de la infraestructura vial susceptible de verse afectado por el CC	Vida útil de diseño / Vida esperada	Horizonte climático a considerar																					
Señalización																							
Pavimento																							
Drenaje																							
Taludes																							
Estructura Viaducto																							
...																							

Evaluación del impacto del CC sobre las variables climáticas (análisis de las proyecciones climáticas)

2	Análisis de las proyecciones climáticas.	<p>La variabilidad climática y las proyecciones futuras se pueden cuantificar a través de indicadores climáticos.</p> <p>Los impactos relativos a los escenarios definidos se evaluarán en relación a un clima de referencia o base que represente las condiciones actuales (al menos 30 años). La situación óptima sería la de contar con estaciones hidro-meteorológicas en las inmediaciones de la ubicación de la carretera instaladas con anterioridad a su construcción, de modo que se pudiera contar con registros históricos de los diferentes indicadores climáticos/meteorológicos específicos de dicha ubicación. En caso de no ser así, se recomienda la consideración de su instalación en la fase de diseño de la carretera para poder registrar y analizar la evolución de dichas variables desde las fases tempranas de su desarrollo. En cualquier caso, si no se dispone de dicha información histórica específica de la ubicación, se deberían analizar como parte de los estudios de diseño los registros existentes más cercanos o los estudios más generales disponibles del clima de la región.</p> <p>Dado que se va a incluir la consideración del cambio esperado para estos parámetros climáticos, se deberán considerar en la fase de diseño no solo los valores históricos o monitorizados a tiempo real, sino también las estimaciones de su evolución según los escenarios y modelos climáticos vigentes en ese momento.</p> <p>A continuación, se listan algunos ejemplos de los posibles indicadores para algunos de los factores climáticos destacados por su afección a la infraestructura vial: temperatura, viento y precipitación.</p> <p>Evaluación de los cambios en la temperatura: Para evaluar los impactos en los pavimentos, taludes, seguridad y salud de los trabajadores debido a los cambios de temperatura, es necesario conocer el número de olas de calor y las temperaturas medias y extremas. Para evaluar los posibles efectos de la temperatura sería recomendable monitorizarla y analizar la evolución de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura diaria máxima y mínima. • Temperatura mínima anual. • Temperatura máxima anual. • Número de días con muy altas temperaturas (este umbral de temperatura depende de la localización analizada) mensuales y anuales. • Número de días con muy bajas temperaturas (este umbral de temperatura depende de la localización analizada) mensuales y anuales. • Número de ciclos de hielo-deshielo mensuales y anuales. • Número de olas de calor mensuales y anuales. • Cambio absoluto/relativo en la temperatura media anual. <p>Aunque se analicen evoluciones con una frecuencia máxima diaria, el registro de la señal de temperatura debería tener una frecuencia mínima horaria (de la que se derivan después por ejemplo máximos o mínimos diarios). Realmente las estaciones actuales habitualmente registran valores con un intervalo diezminutal.</p> <p>Evaluación de los cambios en el viento: Para evaluar los impactos debidos a cambios en el viento (tales como daños en las barreras acústicas, paneles, señales, pórticos,...) es necesario conocer los cambios en la intensidad del viento y el número de días en que se excede un cierto umbral. Es recomendable por tanto monitorizar y analizar la evolución de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Velocidad máxima del viento y dirección en que se produce (racha máxima) diaria, mensual y anual. • Dirección predominante del viento (más habitual en tiempo) mensual y anual, y velocidades máximas mensuales y anuales en dicha dirección. • • Número de días mensuales y anuales de viento fuerte, muy fuerte, y huracanado. <p>Al igual que ocurría con la temperatura, aunque se analicen evoluciones con una frecuencia máxima diaria, el registro de la señal de viento debería tener, al menos, una frecuencia horaria (de la que se derivan después, por ejemplo, máximos o mínimos diarios). Realmente las estaciones actuales registran habitualmente valores medios y extremos de intensidad y dirección con un intervalo diezminutal.</p>
---	--	---

Evaluación del impacto del CC sobre las variables climáticas (análisis de las proyecciones climáticas)

2	Análisis de las proyecciones climáticas.	<p>Al igual que ocurriría con la temperatura, aunque se analicen evoluciones con una frecuencia máxima diaria, el registro de la señal de viento debería tener, al menos, una frecuencia horaria (de la que se derivan después, por ejemplo, máximos o mínimos diarios). Realmente las estaciones actuales registran habitualmente valores medios y extremos de intensidad y dirección con un intervalo diezminutal.</p> <p>Evaluación de los cambios en la precipitación: Para determinar los eventos de inundación debido a los cambios en la precipitación y evaluar los impactos en el sistema de drenaje, es necesario conocer la frecuencia e intensidad de la precipitación. Sería recomendable, por tanto, monitorizar y analizar la evolución de:</p> <ul style="list-style-type: none">• Cantidad de precipitación (mm o l/m²) horaria, 24-horaria, diaria, mensual y anual.• Número de días mensuales y anuales con registros de lluvia fuerte (>15mm/h), muy fuerte (>30mm/h) o torrencial (> 60 mm/h).• Número de días mensuales y anuales sin precipitación.• Índice de sequía.• Índice de torrencialidad.• Cambio absoluto/relativo en la precipitación media anual. <p>Existen otros parámetros relacionados con la precipitación y la posibilidad de inundación/encharcamiento que no suelen estar disponibles en las estaciones meteorológicas habituales, pero resulta interesante analizar:</p> <ul style="list-style-type: none">• Saturación de humedad del terreno en parcelas colindantes.• Nivel freático en parcelas colindantes. <p>Se recomienda por tanto considerar la instalación de dispositivos de medición específicos en el diseño de la carretera.</p> <p>Además, es importante resaltar el caso concreto del diseño del sistema de drenaje, para cuyo dimensionamiento óptimo se requiere disponer de curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) de un pluviógrafo próximo, por lo que se recomienda igualmente considerar su instalación en fase de diseño en caso de no disponerlo.</p>
---	--	--

➤ Fuente: Elaboración propia.

6.5.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad

En este paso se entran en juego tanto la sensibilidad de la infraestructura (propensión a verse afectada o sufrir alteraciones en caso de verse expuesta a un evento meteorológico o variación climática) como su adaptabilidad (capacidad de ajustarse satisfactoriamente a los cambios consecuencia del evento, moderando los daños potenciales, aprovechando las consecuencias positivas o soportando las consecuencias negativas).

El riesgo originado por los impactos recogidos en la Tabla 31 se puede caracterizar en términos económicos a través de directrices, normas, índices, formulaciones semi-empíricas y juicio experto, y utilizando los indicadores climáticos. Los impactos se podrían clasificar según su consecuencia económica:

- Impactos de aumento de la inversión de capital inicial (CAPEX).
- Impactos de aumento del gasto de mantenimiento (OPEX).
- Impactos de aumento de las pérdidas económicas por parada de operación.

Según las soluciones de diseño, en algunos casos se combinarán las tres opciones y en otros se asumirán únicamente alguna de las anteriores. Así, por ejemplo, una mayor inversión inicial puede llegar a evitar el aumento de los costos de mantenimiento y el riesgo de parada de operación. En otros casos puede ser suficiente con un aumento del mantenimiento sin modificar el diseño o solución inicial (ni por tanto su inversión). Pero habrá otros casos en los que soluciones de compromiso combinarán parte de los tres, asumiendo por ejemplo que, con un leve aumento de la inversión inicial, elevando los gastos de mantenimiento y asumiendo el cierre en ocasiones extraordinarias, la infraestructura vial presta el servicio requerido.

➤ **Tabla 33:** Fases para la evaluación de la sensibilidad de un proyecto de infraestructura vial

Evaluación del impacto del CC sobre el diseño inicial		
1	Diseño del proyecto para hacer frente a eventos climáticos.	<p>El aumento de los gastos de capital inicial está relacionado con una mayor inversión inicial al seleccionar soluciones o dimensionar elementos de la vía con mayor capacidad para que puedan hacer frente a determinados eventos climáticos que se espera aumenten su intensidad o frecuencia. En este apartado podrían incluirse, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La selección de trazados más complejos para evitar terrenos menos estables o inundables evitando riesgo de inestabilidad de taludes o inundación de la calzada por fuertes precipitaciones. • El sobredimensionamiento del sistema de drenaje o puentes para hacer frente a precipitaciones torrenciales y avenidas de ríos. • El empleo de mezclas más resistentes a la temperatura en la ejecución de pavimentos. • Etc.
Evaluación del impacto del CC sobre el mantenimiento		
2	Planificación de labores de mantenimiento derivadas de la exposición a eventos climáticos.	<p>El aumento de los gastos de mantenimiento está relacionado con el aumento de la necesidad de ejecutar labores de limpieza o reparaciones menores derivadas de la exposición a determinados eventos climáticos que se espera aumenten su intensidad o frecuencia. En este apartado podrían incluirse, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las labores de retirada de obstáculos arrastrados a la calzada por lluvia, viento o tormentas. • La limpieza de sedimentos u obstrucciones del sistema de drenaje depositados tras la lluvia y agravado por la erodabilidad del terreno (desertificación y arrastre de finos). • La reparación del pavimento envejecido por efecto de la temperatura. • La reposición de señales envejecidas por el soleamiento o afectadas por el viento. • Etc.
Evaluación del impacto del CC sobre la operación de la infraestructura		
3	Identificación de servicios afectados por colapso o parada de operación derivada de la exposición a eventos climáticos.	<p>El aumento de las pérdidas por parada de operación es el más complejo de evaluar ya que afecta a otros sistemas. En cualquier caso, el diseño de la infraestructura vial debe enfocarse a eliminar este impacto asegurando la capacidad de mantener el servicio en las condiciones climáticas esperadas en la ubicación, para lo cual el diseño debe considerar no solo registros históricos sino también proyecciones del clima esperado a futuro. En este apartado podrían incluirse, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pérdidas de horas de trabajo por personas atascadas que no llegan a sus puestos de trabajo. • Pérdidas por bloqueo de mercancías que no llegan a sus mercados de venta. • Gastos de desvío de circulación a rutas alternativas. • Gastos de desvío de la demanda de transporte a modos alternativos (ferrocarril, aéreo...). • Etc. <p>En el peor de los casos, los eventos meteorológicos extremos pueden tener consecuencias catastróficas implicando como efecto más grave la pérdida de vidas humanas. Y como efecto físico para la infraestructura, la necesidad de reposición de la misma debido a su colapso, con un elevado costo económico. Algunos ejemplos podrían ser el colapso de un puente derivado de la socavación de la base de sus pilas en una avenida extraordinaria o el derrumbe de un tramo de carretera por el deslizamiento de un talud provocado por su desestabilización en situaciones de precipitaciones extrema.</p>

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, se muestra un ejemplo de caracterización del impacto de aumento de la intensidad de precipitación en el pavimento de una carretera:

EJEMPLO DE CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO

Infraestructura: Carretera.

Driver climático: Cambios en la intensidad de la precipitación.

Efecto: Deterioro de la superficie del pavimento.

Impacto: Incremento del gasto de mantenimiento del pavimento.

Indicador climático: Precipitación media mensual.

Metodología de evaluación del impacto:

Se considera que el pavimento está diseñado para requerir una intervención de rehabilitación debido al desgaste provocado por la precipitación cada 30 años. El aumento de la precipitación provoca el deterioro de la superficie del pavimento de la carretera, por lo que se necesitarán intervenciones de rehabilitación más frecuentes.

En base a la relación entre la **variación en la precipitación media mensual presente y futura (ΔMMP)**, el número de años entre las intervenciones de rehabilitación y el estudio del Banco Mundial(*), se pueden definir por ejemplo tres categorías para determinar el grado del impacto económico debido al aumento en la intensidad de precipitación:

Categoría 1: Si $0 < \Delta\text{MMP} < 0,5$
 $\Delta T = 1 - (\Delta\text{MMP} \cdot 0,4)$

Categoría 2: Si $0,5 < \Delta\text{MMP} < 1,5$
 $\Delta T = 0,8 - (\Delta\text{MMP} - 0,5) \cdot 0,22$

Categoría 3: Si $\Delta\text{MMP} > 1,5$
 $\Delta T = 0,6 - (\Delta\text{MMP} - 1,5) \cdot 0,12$

Donde:

MMP = Precipitación media mensual.

MMP_F = Precipitación media mensual en el futuro.

MMP_P = Precipitación media mensual en el presente.

$$\Delta\text{MMP} = \frac{(\text{MMP}_F - \text{MMP}_P)}{(\text{MMP}_P)} = \text{Variación esperada en la precipitación media mensual.}$$

ΔT = Variación del tiempo entre reparaciones.

Ejemplo:

Si $\Delta\text{MMP} = 0,5 \rightarrow \Delta T = 0,8$.

Tiempo entre reparaciones: $0,8 \times 10 = 8$ años.

Número total de reparaciones: $50/8 = 6$ reparaciones \rightarrow Una intervención más de lo planeado inicialmente.

(* **Nota:** Estudio relacionado perteneciente a la literatura: *Modelo de deterioro del pavimento incluido en el HDM-4* (Banco Mundial). Análisis de sensibilidad del modelo descrito en el estudio *"Análisis de sensibilidad de los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos"* (Publicación Técnica N°253, Sanfandila, Oro, 2004).

El aumento del número de operaciones de rehabilitación del pavimento, del ejemplo anterior, se puede traducir en un riesgo que podrá ser un aumento de la inversión de capital inicial, o un aumento de los gastos de mantenimiento. En función de cómo se exprese el impacto, se utilizarán datos relativos a la inversión inicial de la carretera o de los gastos de mantenimiento. El siguiente apartado analiza cómo evaluar este riesgo.

6.5.4 Paso 4: Evaluación del riesgo

Como en el resto de los sectores de esta guía, el riesgo es considerado como función de la probabilidad (relacionado con la amenaza) y la consecuencia (relacionado con la exposición y vulnerabilidad).

Sería adecuado establecer para cada escenario climático:

- Una probabilidad de que acontezca dicho escenario.
- Unas consecuencias de su materialización para el proyecto, que afectará al servicio dado a la población (fluidez, etc.) y al riesgo financiero del proyecto, que contempla dos factores:
 - El aumento de la inversión de capital inicial (CAPEX).
 - El incremento de las pérdidas económicas (OPEX), englobando el incremento del gasto de mantenimiento y las pérdidas económicas generadas por la variabilidad climática (si la evaluación se restringe a los límites físicos del proyecto, pudiendo incorporar este análisis otros aspectos como pérdidas asociadas a interrupciones del tráfico, etc. que aporte una visión más global del impacto económico del cambio climático a través de su afección a la vía).

Para poder abordar un análisis de alternativas, y poder tomar decisiones acerca de que opciones de diseño son más adecuadas para compatibilizar el presupuesto del proyecto con un nivel de riesgo climático aceptable generalmente es interesante plantear escenarios que combinen diferentes posibles evoluciones del clima con las potenciales medidas para hacer frente a estos cambios. De este modo, los escenarios para los que habría que evaluar el riesgo serían, por ejemplo, los siguientes:

- Un escenario base sin consideración del cambio climático, que nos daría una visión inicial del CAPEX y el OPEX.
- Un escenario base considerando el cambio climático pero sin adaptar la infraestructura, en el que el CAPEX sería similar, pero el OPEX, se vería alterado.
- Uno o varios escenarios con medidas que supondrían una mayor inversión (CAPEX) y para los que habría que valorar su repercusión en el OPEX (y, tal vez, otros aspectos asociados al servicio que presta la vía) siguiendo los planteamientos expuestos en los apartados anteriores.

La comparación del riesgo asociado a cada escenario (que tiene en cuenta su coste de implementación y su eficacia para reducir los costes futuros) permitirá tomar decisiones robustas en cuanto al diseño de las vías. Lógicamente el planteamiento de un análisis tan complejo solo es recomendable para proyectos con un elevado presupuesto en los que se prevea que el cambio climático puede alterar sustancialmente su operación o integridad. Para proyectos con recursos limitados o que por sus características sea muy probable que no se vean afectados por el cambio climático, es recomendable reducir el número de escenarios y aspectos a evaluar (por ejemplo, considerando un reducido número de escenarios, evaluando solo los tramos concretos de las vías más vulnerables, considerando solamente las medidas que a priori sean más convenientes, etc.)

En la tabla siguiente se exponen los planteamientos para abordar el análisis del nivel de riesgo de cada uno de los escenarios considerados.

➤ **Tabla 34:** Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto de infraestructura vial

Evaluación de la probabilidad de ocurrencia		
1	Evaluación de la probabilidad de los escenarios analizados.	<p>La evaluación del riesgo implica un análisis probabilístico de diferentes evoluciones plausibles del clima y sus consecuencias en la viabilidad del proyecto.</p> <p>Aunque se expone más detalladamente en el apartado 4, merece la pena resaltar que, si bien con los modelos comentados es posible calcular las repercusiones de cada escenario estudiado, establecer una probabilidad para cada uno de los escenarios (climáticos y no climáticos) es ciertamente complejo. Ante la falta de elementos de decisión acerca de porque cualquiera de los RCP existentes podría tener más posibilidades de acontecer en el futuro, se propone considerar todos ellos como equiprobables. En cuanto a otros aspectos de los escenarios climáticos, como la selección de aquellos modelos de entre todos los que integran CMIP5 que son más acertados, las técnicas de regionalización o ajuste de sesgo a la ubicación concreta del proyecto más adecuadas, etc. también es complejo y se recomienda una combinación de las salidas de diferentes modelos.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre el servicio dado		
2	Evaluación del efecto sobre la calidad del servicio.	<p>Aunque difícil de cuantificar económicamente, la calidad del servicio dado a la sociedad es un parámetro que permite ponderar las consecuencias de la materialización del riesgo climático. Cuanto mayor sea la población afectada, mayores serán las consecuencias y por tanto el riesgo. Resulta, por tanto, recomendable tener en cuenta este parámetro y la evolución prevista en los diferentes escenarios que se analicen.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre el CAPEX		
3	Evaluación de la diferencia de costo asociada a diseños adaptados a las condiciones futuras.	<p>El aumento de la inversión de capital inicial evalúa cuantitativamente el incremento en la inversión de capital inicial necesaria para hacer frente a los impactos de cambio climático, ya que estos provocan daños significativos a la infraestructura y se requiere cierta inversión para repararlos.</p> $\text{Aumento inversión capital inicial (\%)} = \frac{\Delta \text{CAPEX}}{\text{CAPEX}} \cdot 100$ <ul style="list-style-type: none"> • ΔCAPEX: Suma del aumento de la inversión de capital inicial de todos los impactos derivados del cambio climático. • CAPEX: Inversión inicial de la infraestructura. <p>El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá adaptar el diseño de la infraestructura, pudiendo impactar sobre los costos de inversión inicial y los costos asociados a sustitución de elementos por modificación de su vida útil en las condiciones futuras.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre el OPEX		
4	Evaluación de la diferencia de costo asociada a diseños adaptados a las condiciones futuras.	<p>El incremento de las pérdidas económicas engloba el incremento del gasto de mantenimiento y las pérdidas económicas generadas por la variabilidad climática.</p> $\begin{aligned} \text{Incremento de las pérdidas económicas (\%)} \\ = \frac{\Delta \text{OPEX} + \Delta \text{Beneficio}}{ \text{Beneficio} - \text{OPEX} } \cdot 100 \end{aligned}$ <ul style="list-style-type: none"> • ΔOPEX: Suma del incremento anual del gasto de mantenimiento de la infraestructura y de las pérdidas económicas generadas por incremento en el número de paradas de operación de todos los impactos. • OPEX: Gasto anual de mantenimiento de la infraestructura. • Beneficio: Beneficio anual de la infraestructura. <p>El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá determinar la evolución de estos costos y realizar ajustes en la rentabilidad a largo plazo de la instalación, que se verá modificada, como se ha visto, por los cambios que se den en los costos de mantenimiento y reparación y por paradas de operación.</p>

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Con los valores (%) de incremento de las pérdidas económicas y de aumento de la inversión de capital inicial se obtiene una estimación cualitativa del riesgo de cada uno de los escenarios estudiados. Esta estimación se puede aplicar con métodos semicuantitativos, por ejemplo, a través de una tabla que otorgue un valor único de riesgo a cada escenario en función de la inversión (CAPEX) y las pérdidas económicas generadas o evitadas (OPEX).

Tabla 35: Ejemplo de estimación cualitativa del riesgo de cada uno de los escenarios considerados en el análisis

			Incremento de las pérdidas económicas (%)		
			Bajo	Medio	Alto
			≤3%	3% – 8%	≥8%
Aumento de la inversión de capital inicial (%)	Alto	≥10%	ALTO	ALTO	ALTO
	Medio	3% – 10%	MEDIO	MEDIO	ALTO
	Bajo	≤3%	BAJO	MEDIO	ALTO

Fuente: Elaboración propia.

6.5.5 Resumen de componentes de riesgo

La siguiente tabla resume cómo se definen los diferentes componentes de riesgo en un proyecto de diseño de infraestructura vial, en base a la información presentada en los apartados anteriores.

- La primera columna “Componente del riesgo”, muestra los diferentes componentes del riesgo (amenaza, exposición, etc.).
- En la segunda columna “Aplicación en proyectos de infraestructura vial” se resumen los factores que pueden hacer que el proyecto de infraestructura se pueda ver más o menos afectado por el cambio climático, organizados según el componente del riesgo sobre el que influyen: factores que determinan la exposición del proyecto al cambio climático, los que determinan su sensibilidad, etc.
- La última columna “Indicadores de cambio climático en proyectos de infraestructura vial”, enumera los indicadores que habría que monitorizar para determinar si se está produciendo un cambio en el factor (de la segunda columna) y su potencial impacto sobre el proyecto.

Por ejemplo, los cambios que se produzcan en los usos del suelo o en el tráfico soportado (indicadores) modifican las características socioeconómicas consideradas en el proyecto (aplicación al proyecto), pudiendo suponer una mejora de la capacidad de adaptación de la infraestructura al clima futuro.

Esta tabla resumen sintetiza algunos de los aspectos comentados en los puntos anteriores, pero debe de ser ajustada para el proyecto concreto estudiado. Por ejemplo, como se ha apuntado en los sectores de hidroenergía (apartado 6.3) y dotación de agua (apartado 6.4), el planteamiento más interesante para abordar el previsible efecto de los cambios de precipitación en los caudales que han de gestionar las vías es estudiar toda la cuenca aportante. Es por ello que los parámetros que establecen las relaciones entre lluvia y caudal se consideran como un aspecto de la sensibilidad del sistema estudiado y la cuenca se incluye dentro de los límites del sistema en la Figura 43. En proyectos donde por los recursos disponibles, plazos, impactos previstos, etc. no sea conveniente abordar este análisis desde un planeamiento detallado, estos aspectos no deberían de ser tenidos en cuenta.

Tabla 36: Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo en un proyecto de infraestructura vial

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de infraestructura vial	Indicadores de riesgo a considerar en proyectos de infraestructura vial
Amenaza	Cambios en las condiciones climáticas de diseño de la vía.	Temperatura ambiente. Precipitación (lluvia y nieve) y humedad. Velocidad y dirección del viento. Nivel medio del mar. Nivel freático.
	Cambios en frecuencia y/o intensidad de eventos extremos que pueden afectar a la infraestructura.	Olas de calor, sequías. Nieve, heladas (temperatura ambiente y humedad). Inundaciones (por lluvias torrenciales, cercanía a cursos fluviales, zonas costeras, etc.). Tormentas, ciclones tropicales, oleaje.

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de infraestructura vial	Indicadores de riesgo a considerar en proyectos de infraestructura vial
Exposición	Vía e infraestructuras analizadas.	Características de la vía, teniendo presente todas las inversiones y desarrollos, pero especialmente el drenaje, pavimento, y otros componentes claves para determinar su operación, mantenimiento y vida útil en diferentes escenarios de cambio climático. Cambio en la frecuencia de las tareas de operación y mantenimiento.
	Servicio prestado por la vía.	Cambio en la frecuencia de las interrupciones del servicio. Capacidad de dar servicio a las localidades y puntos de interés que comunica la vía. Evolución del tráfico, nivel de servicio y otros indicadores de la contribución social que presta la vía.
Sensibilidad	Características ambientales.	Evolución del entorno, vegetación y obstáculos que puedan proteger la infraestructura contra eventos climatológicos extremos, etc.
	Características fisiográficas y socioeconómicas de la cuenca.	Evolución de la vegetación y usos del suelo de las cuencas que drenan hacia la vía y sus elementos asociados (obras de drenaje transversal, puentes, etc.).
Capacidad Adaptativa	Diseño de la infraestructura.	Adecuación de los elementos y materiales a las características del sitio y la evolución de las variables climáticas. Flexibilidad de diseño para adaptarse al cambio climático.
	Características socioeconómicas.	Desarrollo de las poblaciones atendidas por la vía (existencia y evolución de sistemas redundantes, rutas alternativas,...). Evolución de los usos del suelo. Evolución del tráfico soportado. Evolución de los recursos económicos para implementar medidas de adaptación.
	Redundancia.	Disponibilidad de rutas alternas.
	Características ambientales.	Evolución de la vegetación y capacidad de las cuencas en las que se encuentra la vía para implementar medidas de regulación del ciclo hidrológico.

➤ Fuente: Elaboración propia.

6.6 Áreas urbanas

Las áreas urbanas en todo el mundo están experimentando las presiones derivadas del cambio climático y se proyecta que enfrentarán impactos climáticos cada vez más severos en el futuro. Además, si bien la mitad de la población mundial vivía en centros urbanos en 2008, según las proyecciones socioeconómicas, esta proporción va a seguir creciendo en los próximos años. Este incremento de población sin la planificación adecuada, más acuciado en ciudades de menor escala en el caso de América Latina, hace que aumenten también los riesgos relacionados con el cambio climático urbano (incluido el aumento del nivel del mar y las mareas de tormenta, el estrés por calor, las precipitaciones extremas, inundaciones interiores y costeras, deslizamientos de tierra, sequía, aumento de la aridez, escasez de agua y contaminación del aire) con un aumento generalizado de los impactos en las personas (su salud, medios de vida y activos) y en las economías y ecosistemas locales y nacionales. Estos riesgos se amplifican en asentamientos informales y en áreas peligrosas y que carecen de infraestructura y servicios esenciales o donde no hay provisiones adecuadas para la adaptación.

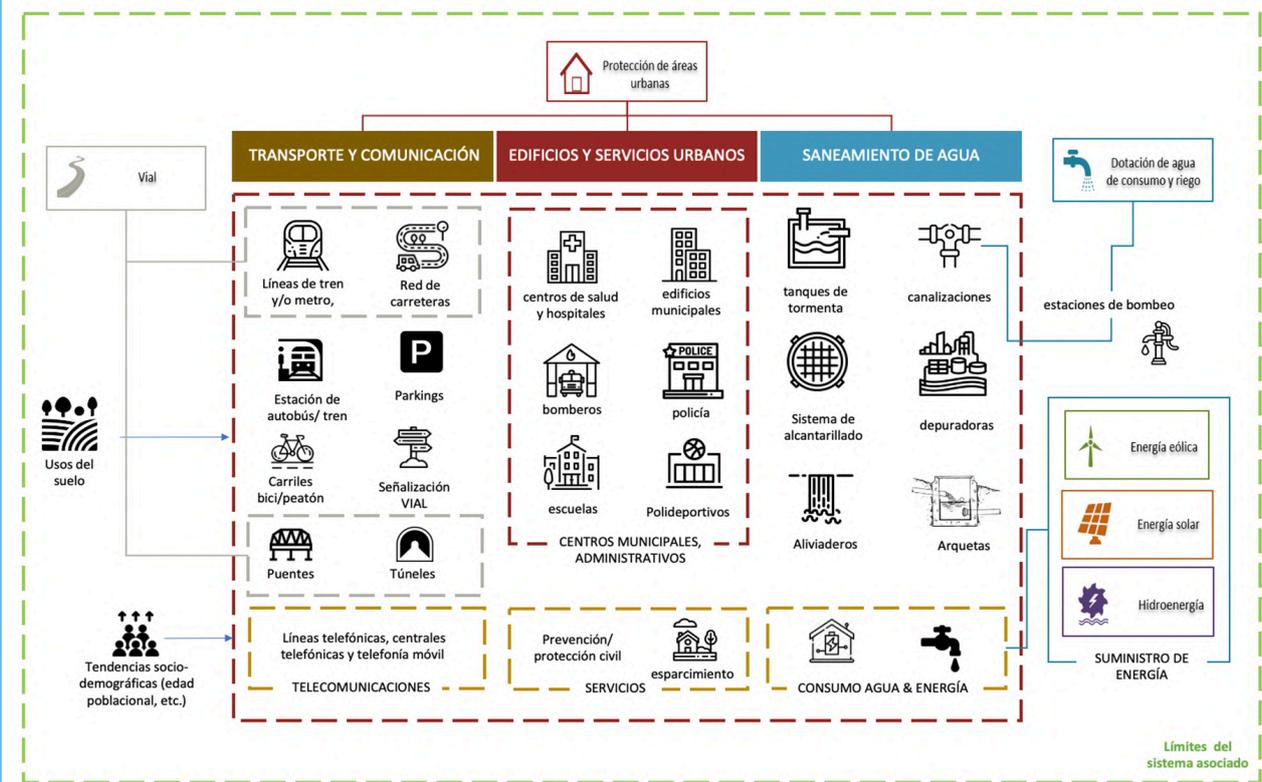
Por ello, la gestión del riesgo climático en los centros urbanos es esencial para la adaptación exitosa ante el cambio climático global y por ello debe ser una de las prioridades de los gobiernos. Adicionalmente, la adaptación al cambio climático puede contribuir a que las ciudades alcancen diversos objetivos deseables en torno a la calidad de vida, la prestación de servicios y la reducción del riesgo de desastres de todo tipo.

Las áreas urbanas se caracterizan por ser sistemas urbanos con un nivel de complejidad elevado, en las que se interrelacionan un gran número de servicios críticos urbanos. Gran parte de estos servicios críticos urbanos se analizan en detalle a lo largo de los distintos sectores identificados en el presente tomo, entre los que cabe mencionar los sectores relacionados con el transporte viario (apartado 6.5), energía (apartados 5.1, 6.1, 6.2 y 6.3) o dotación de agua (apartados 5.2 y 6.4). Teniendo presente el objetivo de la protección de las áreas urbanas, en el presente apartado se pone el foco en el objetivo de evaluar la complementariedad entre todos estos sectores identificados, y en completar el estudio con la consideración de otros servicios (o sectores) críticos que pueden verse afectados por el CC. Estos podrían agruparse en:

- **Transporte y comunicación:** La adaptación del transporte al cambio climático es una cuestión que está cobrando una atención creciente a nivel internacional. Por ello, es muy importante considerar/valorar los posibles impactos del cambio climático sobre la infraestructura de transporte. Además de los impactos físicos asociados directamente a la infraestructura, el cambio climático influirá, muy probablemente, en la demanda futura de transporte, en las pautas de movilidad de viajeros y mercancías y en la elección de los modos de transporte.
 - **Medio construido:** Los edificios construidos en un área urbana se caracterizan por dar a la población unos servicios esenciales: desde el hogar (vivienda propia) a otros servicios como la educación, salud, seguridad, bienestar, etc. Estas infraestructuras se diseñan para que sean funcionales, duraderas y seguras durante varias décadas. Debido a esto, la infraestructura puede resultar muy vulnerable al efecto del cambio climático y es importante estimar los cambios que pueden afectar a la funcionalidad e integridad de la infraestructura, pudiendo afectar a la calidad de ciertos servicios: eventos extremos (frecuencia e intensidad de olas de calor, sequías, inundaciones, vientos fuertes, tormentas, deslizamientos asociados a las mismas,...) y cambios en los valores promedio y los patrones (de temperatura, precipitación, etc.).
 - **Sistemas de saneamiento de agua:** Considerado como un servicio básico, los sistemas de saneamiento son una de las preocupaciones esenciales vinculadas a los efectos del cambio climático, debido que podrían verse interrumpidos como consecuencia de fenómenos climáticos extremos, desencadenando un incremento de las enfermedades. Los peligros para la salud pueden ser resultado de las temperaturas extremas, de un aumento de la temperatura del agua, de la escasez de agua, de la contaminación biológica del agua usada para diferentes fines (particularmente la producción y transformación de alimentos), etc. La creciente escasez de agua en ciertas zonas del planeta puede condicionar el acceso al saneamiento, reducir la capacidad de autolimpieza de los desagües, así como limitar la capacidad natural de los ecosistemas de asimilar los residuos generados. Por otro lado, las inundaciones pueden provocar infecciones, en particular en las grandes ciudades, a causa del desbordamiento de los sistemas de alcantarillado y tratamiento.
 - **Sistemas de drenaje urbano:** Debido a la intensiva impermeabilización de los suelos, el modelo actual de desarrollo urbano modifica profundamente el ciclo natural del agua en las ciudades con los consecuentes impactos tanto en el aumento de la vulnerabilidad de las poblaciones como en la salud de los ecosistemas acuáticos. La drástica reducción de la capacidad de infiltración del terreno hace que gran parte de la precipitación se transforme en escorrentía superficial, que se concentra rápidamente originando grandes caudales punta. Así, en episodios de precipitación intensa el sistema de saneamiento no tiene capacidad para transportar dichos caudales punta, vertiéndolos directamente al medio receptor mediante un sistema de aliviaderos, provocando también graves impactos en los ecosistemas acuáticos. Por otra parte, el lavado de las superficies urbanas aporta altas cargas de contaminación a la escorrentía que producen importantes impactos en los medios receptores.

La imagen siguiente, muestra algunos de los elementos de infraestructura críticos que conforman estos tres ámbitos de estudio en relación con el área urbana, así como la complementariedad con los sectores identificados en el presente tomo.

➤ **Figura 51:** Infraestructuras relacionadas con ámbitos de la protección de las áreas urbanas



➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Por tanto, teniendo presente el objetivo de la protección de las áreas urbanas, y la complementariedad con otros sectores estudiados, en el presente apartado se centra el análisis en los sistemas de drenaje urbano, como elemento crítico dentro del actual modelo de desarrollo urbano con afección directa al ciclo natural del agua en las ciudades y en consecuencia, en los impactos del cambio climático en los elementos que conforman el sistema urbano.

Los pasos fundamentales a seguir se pueden resumir en:

- Contextualización del proyecto.
- Evaluación del recurso hídrico y su evolución, así como de las variables climáticas que tienen impacto en la red de drenaje urbano, así como su rendimiento.
- Caracterización del clima de la cuenca (de ámbito urbano): estudiando especialmente la precipitación y centrandolo en los valores extremos.
- Generación de escenarios climáticos para esta variable.
- Análisis de los eventos extremos de precipitación y modelización de impactos.
- Evaluación de la capacidad de operación de la red de drenaje y saneamiento (saturación o no de la red de saneamiento urbano) en las próximas décadas, así como de las variables climáticas que tienen impacto en las mismas.
- Análisis del impacto de eventos extremos de precipitaciones en la infraestructura de drenaje, y posible afección a otras infraestructuras (transportes, etc.) y fallos en cascada.
- Cálculo de la rentabilidad o atractivo del proyecto estudiado, así como del impacto económico que el cambio climático puede tener en otros aspectos de la operación de la red de drenaje y saneamiento urbano: mantenimiento, cortes de servicios, embalsamientos, etc.

6.6.1 Paso 1. Contextualización del proyecto respecto al CC

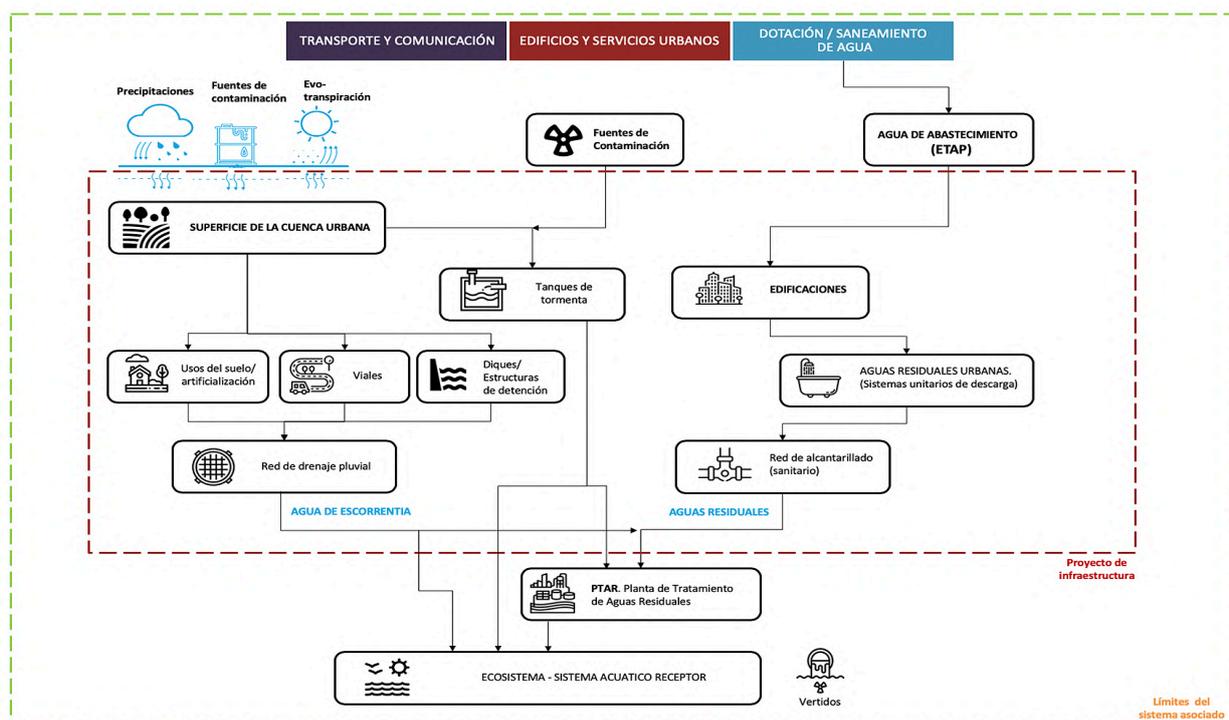
Este primer paso se centra en mostrar los elementos que podrían estar expuestos a los efectos del cambio climático de forma directa o indirecta y delimitar cuales de ellos se consideran dentro del alcance de la presente guía.

Para hacer esta **contextualización del proyecto respecto al CC**, serán necesarias las siguientes actividades:

- Recopilación de información disponible de caracterización del sistema de drenaje urbano, en relación al diseño, ubicación, extensión, redes separativas (aguas pluviales y fecales), elementos de la red de saneamiento (tuberías, arquetas, sumideros, bombeos, depósitos, aliviaderos, etc.), cuenca aportante (pluviales), edificación, viales, permeabilidad del terreno, modelo digital del terreno, etc.
- Recopilación de información disponible sobre el cambio climático y/o variabilidad climática, teniendo en cuenta eventos históricos:
 - ¿Qué incidentes relacionados con la variabilidad climática/cambio climático han ocurrido ya en esta área urbana en años anteriores y qué consecuencias han tenido?.
 - ¿Cuáles son los impactos y riesgos climáticos clave ya observados en el área de proyecto?.
 - ¿Hay información sobre la frecuencia, intensidad, temporalidad y duración de eventos extremos y sus consecuencias?.
- Recopilación de información sobre las amenazas climáticas actuales y futuras y la identificación preliminar de los posibles impactos locales del cambio climático.
 - ¿Qué rangos de evolución futura del clima para los parámetros climáticos identificados como relevantes para el proyecto son proyectados para la región/área del mismo?.
 - ¿Cuál es la frecuencia, intensidad, temporalidad y duración estimada para eventos extremos en el futuro (considerar el tiempo de vida del tipo de proyecto)?.
 - ¿Cuánto de robusta es la información sobre la evolución futura del clima que se va a utilizar? ¿Cuáles son los niveles de confianza?.
- Identificación de impactos potenciales significativos.
- Análisis de los estudios locales existentes.

En la siguiente imagen se muestra los elementos que afectan más directamente al **sistema de drenaje urbano**, objeto de análisis a abordar en el presente apartado, priorizando así las intervenciones relativas a este sistema, y en la medida de lo posible, proporcionando recomendaciones a otros tipos de intervenciones que pudieran afectar a dicho sistema de drenaje, como dotación de agua, tratamiento de aguas residuales y otras infraestructuras urbanas.

➤ **Figura 52:** Componentes típicos del sistema de drenaje urbano



Nota: como en el resto de los diagramas de este tipo propuestos a lo largo de este documento, es conveniente adaptar el esquema general planteado a las características del proyecto que se esté estudiando. Los sistemas de drenaje más simples pueden no contar con elementos como los tanques de tormenta, etc.

Dentro de las actuaciones que se pueden contemplar en el marco de análisis de un proyecto de infraestructura del sistema de drenaje urbano, caben actuaciones a distintos niveles y/o escalas (calles, barrios, distritos, etc.) en función del modelo de desarrollo urbano de cada uno de los municipios. En la medida en que el posible alcance de las actuaciones posibilite la priorización por redes separativas en el sistema de drenaje urbano, esta se considera la alternativa preferente, proyectando el encauzamiento de las aguas de drenaje pluvial hacia cauces naturales, mientras que las aguas del alcantarillado sanitario se derivan hacia Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) para ser tratadas convenientemente. No obstante, cabe la posibilidad de que aquellas actuaciones a considerar en (principalmente pequeños) proyectos de infraestructura relacionados con drenaje urbano, no posibiliten (total o parcialmente) la instalación de dichas redes separativas y sea necesario optar por redes unitarias que integran ambos sistemas de drenaje pluvial y alcantarillado sanitario (por ejemplo, actuaciones en una pequeña parte del sistema urbano que cuenta únicamente con una red unitaria). Esta posibilidad se contempla igualmente en el esquema recogido en la Figura 53.

Es importante señalar, que el enfoque tradicional de los sistemas de drenaje se centra en la gestión de caudales punta, dirigiendo las aguas de lluvia tan rápido como sea posible lejos del lugar de origen, para su vertido o, en el mejor de los casos su tratamiento.

Además, la problemática de la gestión de aguas cobra especial importancia en ciudades costeras donde se debe afrontar también el efecto de la subida del nivel del mar como riesgo adicional del efecto del cambio climático.

Por tanto, esta gestión integral de las aguas en los entornos urbanos se enfrenta a los siguientes retos clave:

- **reducir los volúmenes de escorrentía** y retrasar su entrada en la red de saneamiento.
- **mejorar la calidad del agua de escorrentía**, para reducir los costos asociados a su tratamiento en las Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).
- **aprovechar las aguas de lluvia para distintos usos**, lo cual reduce el uso de agua potable, por lo que se reduce la energía consumida en los procesos de tratamiento y aducción.

La gestión del agua en los municipios es una de las actividades gestionadas por los gobiernos locales que requiere un mayor consumo energético. Por tanto, una buena gestión integral de sistema de drenaje urbano puede ayudar también a reducir el consumo energético de diversas formas.

Por último, los cambios en el uso del suelo, (por ejemplo, la creación de infraestructura verde urbana, que mejora la permeabilización del suelo frente a la generalizada artificialización e impermeabilización del suelo), puede también tener efectos colaterales con respecto al **efecto "isla de calor"** en la ciudad, y generar, al mismo tiempo, nuevos usos recreativos y otros servicios ambientales en las ciudades.

Así, en un contexto de cambio climático, que anuncia el incremento de la frecuencia de fenómenos extremos como lluvias torrenciales, la minimización de la vulnerabilidad de las poblaciones urbanas ante las inundaciones apunta hacia la necesidad de **optimizar; 1) la convivencia de la red de drenaje artificial**, mejorando su funcionamiento hidráulico y energético, **y 2) optimizar la red de drenaje natural**, ganando espacio funcional para poder captar agua y sacarlo de la red de drenaje artificial, teniendo presente para este objetivo la propia gestión de la cuenca urbana como una medida estrategia del gobierno local y/o regional que regule/restringa los usos del suelo, así como el propio desarrollo físico del modelo urbano.

6.6.2 Paso 2. Identificación de amenazas y valoración de la exposición

Tal y como se ha comenzado a explicar en el apartado anterior, cada uno de estos elementos se van a ver afectados de manera diferente por distintas amenazas asociadas al cambio climático y la variabilidad climática.

Este paso tiene como objetivo desarrollar una **imagen completa de los drivers climáticos actuales y futuros** del cambio climático de un proyecto de infraestructura en un área urbana, asociado a cada uno de los elementos identificados, así como otros factores de estrés (*drivers* no climáticos) que pueden también implicar otros potenciales impactos.

Primero se debe trabajar en la identificación de las amenazas que puede enfrentar el área urbana en estudio, y por ende, los proyectos de infraestructura que se desarrollen en la misma. En este sentido, es importante mencionar que la existencia de una amenaza no significa necesariamente estar expuesto a ella y, por lo tanto, estar afectado.

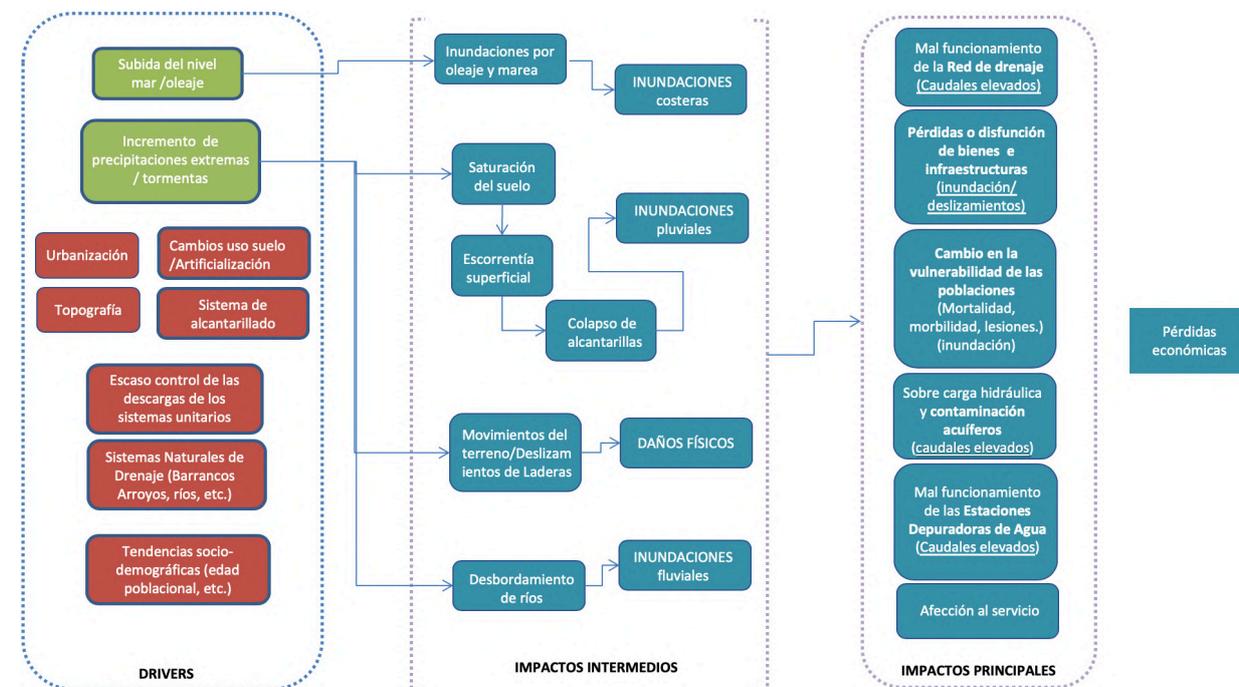
Para trabajar estos conceptos son necesarias las siguientes actividades:

1. Escenarios climáticos y proyecciones a nivel local.
2. Cadenas de Impacto.
3. Modelización de impactos y estudios locales (**análisis de las amenazas**).
4. Definición de umbral.
5. Identificación / localización del receptor del impacto (**valoración de la exposición**).

Métodos y herramientas disponibles para hacer las cadenas de impacto

El propósito de las cadenas de impacto es doble (120), por un lado, generar un diagrama gráfico que explique los principales impulsores (*drivers* climáticos y no climáticos) que afectan a los principales elementos del proyecto de infraestructura, así como la identificación de impactos potenciales esperados, tanto intermedios como principales. Esta representación gráfica facilita el intercambio de ideas entre las partes interesadas. Teniendo en cuenta, que en este caso se ha focalizado el estudio en el **sistema de drenaje urbano**, a continuación, se muestra la cadena de impacto de dicho sistema frente a eventos que causen inundaciones.

Figura 53: Cadenas de impacto del cambio climático para proyectos de drenaje urbano



Nota: dependiendo de la ubicación del proyecto es posible que los drivers tengan el sentido inverso al indicado, en cuyo caso, el sentido de los impactos también se verá invertidos (los aspectos que se indica que se ven incrementados podrían disminuir y los que se apunta que se verían reducidos se verían aumentados). Se muestran en verde los aspectos climáticos, en rojo otros aspectos que pueden tener un efecto significativo en el proyecto y en azul los impactos intermedios y principales.

Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se observa en la cadena de impacto, los *drivers* climáticos que afectan directamente al sistema de drenaje son las principalmente las **precipitaciones extremas** y, en caso de ciudades costeras, también la **subida del nivel del mar y oleaje extremo**. Estas pueden provocar distintos tipos de impactos intermedios que van desde saturación del suelo o colapso de alcantarillas, hasta movimientos del terreno o daños en los activos físicos. Estos, a su vez, terminan produciendo unos impactos principales que será necesario minimizar y/o gestionar a través de distintas medidas de adaptación. Los principales impactos se podrían agrupar en:

- Impacto sobre el CAPEX (vida útil de la infraestructura).**
- Impacto sobre el OPEX (operación y mantenimiento).**
- Otros impactos.**

Para cada uno de ellos, a continuación, se describen las amenazas o “*drivers*” que pueden originarlos:

a) Impacto del cambio climático sobre el CAPEX: vida útil de la infraestructura

El CAPEX engloba dos tipos de costos: los relacionados con el equipo físico y que no dependen de donde se ubique (arquetas, sumideros, tuberías, colectores, etc. y otros aspectos técnicos) y aquellos costos que dependen directamente de la ubicación y de factores ambientales y socioeconómicos (clima, orografía, distancia a la infraestructura esencial, usos y precio del suelo, ...).

El cambio climático puede afectar al valor de los equipos, estructuras, etc. de este tipo de proyectos. Estos equipos se suelen diseñar considerando los envites del clima y que tendrán que enfrentarse a ciertos caudales que es muy improbable que se registren durante su vida útil, tales como las grandes avenidas producidas por eventos de precipitaciones extremas. La mayoría de estos equipos resistirán sin daños (o con daños reducidos) caudales muy superiores a los caudales medios, no obstante, pueden verse afectados por posibles colapsos y roturas frente a estos cada vez más frecuentes eventos de lluvias extremas, granizada, etc.

De este modo, el impacto del cambio climático en estos términos, además de afectar en la vida útil de la infraestructura (por afección de posibles sedimentos que arrastre el agua, al igual que en el caso de en el sector de hidroenergía), se puede observar en los daños catastróficos que pueden provocar. De la misma manera, los efectos producidos por caudales extremos también afectan a la vida útil de las instalaciones, siendo aconsejable estudiar su evolución para ser capaces de determinar con mayor exactitud los costos de la instalación y necesidades de sustitución de equipos. En este sentido, como en prácticamente cualquier instalación o infraestructura, en ubicaciones puntuales podrían tener impacto:

- Inundaciones pluviales, fluviales, etc.: Son amenazas relativamente importantes en este tipo de instalaciones a no ser que se encuentre en una zona especialmente poco vulnerable.
- Movimientos del terreno/Deslizamientos de Laderas: Generalmente son poco importante, pero podría ser una amenaza en ubicaciones concretas. Podría originar pérdidas o disfunción de las instalaciones.

Dada esta complejidad, es habitual considerar valores de CAPEX específicos para una determinada ubicación y mantenerlos constantes a lo largo del tiempo. No se han detectado estudios que hayan considerado estos efectos en el contexto de evolución del clima y hayan cuantificado su efecto sobre la infraestructura.

b) Impacto del cambio climático sobre el OPEX: operación y mantenimiento

El OPEX contempla partidas económicas relacionados con gastos de funcionamiento necesarios para una adecuada operativa del sistema de drenaje, tales como seguros, mantenimiento y reparación de equipos (incluido cambio periódico de determinadas piezas o componentes, dragado de canales de drenaje, etc.).

Como ya se ha observado, una mayor frecuencia e intensidad de **eventos extremos de precipitaciones**, puede originar posibles **colapsos, roturas del equipamiento, cambios en las necesidades de limpieza**, etc., incrementando el OPEX (mayores necesidades de mantenimiento, mayores costos de los seguros, etc.). En la medida que se disponga de datos, se recomienda valorar los cambios que podrían producirse en este valor a lo largo de la vida útil del proyecto y evaluar si esta aproximación es adecuada.

c) Otros impactos

Como consecuencia de todo ello y afectado, por tanto, por varios de los *drivers* descritos, estaría el impacto sobre servicio que el proyecto presta a la población. Este servicio se verá afectado, principalmente, cuando la infraestructura de drenaje vea superada su capacidad y se acumule agua en partes de la población, causando pérdidas y disfunciones a la sociedad (vías interrumpidas, servicios afectados, viviendas inundadas, etc.) Estos impactos son complejos de valorar, pero su magnitud puede ser muy importante si se ven afectadas infraestructuras críticas, zonas monumentales, etc.

Resumen de *drivers* climáticos y no climáticos que inciden en los proyectos de drenaje urbano

La siguiente tabla resume los parámetros mencionados y su impacto potencial sobre el proyecto, resaltando aquellos que pueden suponer un mayor impacto y merecen, por tanto, un análisis detallado.

Tabla 37: Variables que inciden en los proyectos de drenaje urbano y tipo de impacto

Elementos expuestos	Drivers climáticos		Drivers no climáticos						
	Subida del nivel del mar y oleaje extremo	Aumento de precipitaciones fuertes y avenidas intensas	Urbanización	Cambio de usos del suelo / artificialización	Topografía	Sistemas de alcantarillado	Escaso control de las descargas de sistemas unitarios	Sistemas Naturales de Drenaje (Barrancos, Arroyos, ríos, etc.) Tendencias socio-demográficas (edad poblacional, etc.)	Tendencias sociodemográficas (edad poblacional, etc.)
Cuenca urbana	Influencia en inundación costera y condición de contorno de otras inundaciones	Influencia en saturación del suelo, deslizamientos y desbordamientos	Influencia en la capacidad de drenaje urbano y de permeabilidad suelo	Influencia en la capacidad de drenaje urbano y de permeabilidad suelo	Influencia en la capacidad de drenaje urbano y de permeabilidad suelo			Influencia en la capacidad de drenaje urbano y de permeabilidad suelo	
Medio construido (artificialización)	Influencia en la capacidad de drenaje urbano y de permeabilidad suelo	Influencia en la capacidad de drenaje urbano y de permeabilidad suelo			Influencia en la capacidad de drenaje urbano y de permeabilidad suelo				
Red de drenaje pluvial	Influencia en su capacidad	Influencia en su capacidad	Influencia en su capacidad	Influencia en su capacidad	Influencia en su capacidad		Influencia en su capacidad		Influencia en su capacidad
Red de alcantarillado sanitario	Influencia en su capacidad	Influencia en su capacidad	Impacto en su capacidad	Impacto en su capacidad		Influencia en su capacidad			Influencia en su capacidad
Servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	Afección al servicio	

Nota: se destacan con color naranja oscuro los impactos de las variables climáticas y no climáticas que generalmente tendrán una mayor trascendencia. Con color naranja claro otros impactos que generalmente también tendrán importancia o que pueden llegar a ser muy significativos.

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, dentro de los parámetros climáticos, cabe destacar la subida del nivel del mar y el incremento de las precipitaciones extremas y tormentas. Por ello se propone considerar como principales amenazas o *drivers* climáticos las indicadas a continuación.

➤ **Tabla 38:** Principales drivers climáticos que inciden en los proyectos de drenaje urbano y tipo de impacto

Driver climático	Efecto/Impacto intermedio	Impacto económico/Consecuencia
Subida del nivel mar / oleaje	Inundación por oleaje y mareas.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por oleajes /golpes de mar / mareas.
	Inundación costera.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por subida del nivel del mar.
Precipitaciones extremas/ tormentas	Saturación del suelo.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por inundaciones pluviales (embalsamientos).
	Escurrimiento superficial.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por inundaciones pluviales (avenidas de agua).
	Colapso de alcantarillas.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por saturación de la red de alcantarillado.
	Inundaciones pluviales.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por inundaciones pluviales. Puede afectar al servicio.
	Caudales elevados.	Parada/mal funcionamiento de la red de drenaje debido a caudales elevados. Mal funcionamiento de las Estaciones Depuradoras de Agua (Caudales elevados).
	Movimientos del terreno/ deslizamientos de laderas.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por cortes de vías de transporte y comunicación. Puede afectar al servicio.
	Desbordamiento de ríos. Inundaciones fluviales.	Pérdidas o disfunción de bienes e infraestructura por inundación fluvial Puede afectar al servicio.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Métodos y herramientas disponibles para hacer el análisis de amenazas

Una vez identificadas las amenazas, es necesario tener un conocimiento más profundo de cada una de ellas, para lo que se propone una aproximación cuantitativa con dos enfoques bien diferenciados: el primer enfoque basado en **observaciones o método empírico** (estaciones de medida y sensores de variables ambientales e hidrológicos para control de inundaciones); y el segundo basado en **modelización física** (para mapeo de inundaciones).

Con respecto a las observaciones, se dispone de mediciones in situ a través de muestreos de campo, así como valores recogidos históricos de aquellas variables climáticas que se requiera analizar. Así como las proyecciones climáticas o tiempos de retorno asociadas a cada una de esas variables.

La modelización a través de software tiene la ventaja de que requiere de menos recursos que las observaciones y por tanto es aplicable tanto a meso- como a micro-escala. La modelización permite crear distintos escenarios (precipitación extrema) y obtener una estimación de la amenaza de inundaciones. Existen modelos de inundaciones urbanas desarrollados para estudiar la conversión de lluvia en escurrimiento y su efecto en las zonas urbanas (las tablas descriptivas en detalle de cada uno de estos modelos y métodos se describen en la sección del estado del arte de las metodologías).

Teniendo en cuenta, que en este caso se ha focalizado el estudio en el **sistema de drenaje**, la tabla siguiente describe los modelos y métodos utilizados para el análisis de riesgos de **inundación fluvial, pluvial y costera en ciudades**.

Tabla 39: Métodos/herramientas para el análisis de las amenazas climáticas en el área urbana

Modelo/ Método	CityCAT	EURO-SURGE	SOBEK (DEL-TARES)	EPA (SWMM)	MIKE (DHI)	INFOWORKS	SWAT
Amenaza	Inundación Fluvial/Pluvial	Inundación Costera	Inundación Fluvial/Pluvial	Escorrentía	Inundación Fluvial/Pluvial	Inundación Fluvial/Pluvial	Inundación Fluvial/Pluvial
Descripción	Modelo hidrodinámico que simula el flujo de agua superficial de la lluvia extrema.	El modelo combina estadísticas de valores extremos de los niveles del mar con funciones de daños por inundaciones. Es un enfoque "de arriba hacia abajo" transferible.	SOBEK es un potente conjunto de modelos para el pronóstico de inundaciones y la optimización de los sistemas de drenaje, el control de los sistemas de riego, el diseño de desbordamiento de alcantarillas, la morfología del río, la intrusión de sal y la calidad del agua superficial.	Aplicación que ayuda a predecir la cantidad y calidad de escorrentía dentro de las áreas urbanas.	MIKE (DHI) es una gama de productos de software que permiten analizar, modelar y simular con precisión cualquier tipo de desafío relacionado con el agua.	INFOWORKS es una gama de productos de software que permiten analizar, modelar y simular con precisión cualquier tipo de desafío relacionado con el agua.	SWAT Es un modelo a pequeña escala de cuenca hidrográfica que se utiliza para simular la calidad y cantidad de agua superficial y subterránea y predecir el impacto ambiental del uso de la tierra, las prácticas de gestión de la tierra y el cambio climático.
Licencia de uso	Público	Comercial	Comercial	Público	Comercial	Comercial	Publico
Datos de salida	Profundidad y velocidad del agua de la inundación en el dominio en varios pasos de tiempo.	Daño esperado	SOBEK simula los flujos complejos y los procesos relacionados con el agua en casi cualquier sistema.		Profundidad y velocidad de la lámina de agua de inundación.	Profundidad y velocidad de la lámina de agua de inundación.	Resultado de la modelización hidrológica (Escorrentía, sedimentos, etc.).

Nota: CityCat es una herramienta de reciente aparición, empleada fundamentalmente por centros de investigación (aunque no exclusivamente), y se comenta por sus interesantes capacidades y porque este tipo de agentes son muy activos en la simulación de inundaciones y otros efectos del cambio climático en ciudades. Para empresas y agentes privados, se recomienda optar por otras opciones que actualmente tienen un mayor soporte comercial o público.

Fuente: Elaboración propia.

Un concepto básico para la caracterización de la amenaza urbana es el de lluvia de diseño o hietograma de diseño. Este hietograma, distribución temporal de la precipitación, se construye a partir de las curvas IDF. Estas curvas nos proporcionan el periodo de retorno de la precipitación para diferentes duraciones de la precipitación, de tal forma que, mediante el método de los bloques alternos, se puede construir un hietograma que responda al periodo de retorno considerado a distintos niveles de agregación.

Este hietograma de diseño es preferible construirlo con información de observaciones, aunque en casos en que no existan observaciones suficientes, podría construirse utilizando la información de TRMM, calibrada con las pocas observaciones que puedan existir.

Para actualizar el hietograma de diseño a las nuevas condiciones derivadas del cambio climático, normalmente se procede a actualizar las mayores agregaciones temporales del mismo, es decir, se calcula cuál sea la máxima lluvia diaria para el periodo de retorno considerado y se actualiza el hietograma según la diferencia observada con el periodo histórico.

Métodos y herramientas disponibles para hacer el análisis de la exposición

Una vez hecho el análisis de amenazas, es necesario valorar la exposición, en nuestro caso, se refiere al propio sistema de drenaje urbano. Para este análisis es interesante hacer una revisión de la cadena de impacto, rescatando las principales consecuencias, es decir los impactos económicos y/o sociales que van a darse en nuestro proyecto si se producen esas amenazas.

➤ **Figura 54:** Propuesta de niveles a ser estudiados en el análisis de la exposición



➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Para valorar la exposición se puede hacer de forma cualitativa, figura anterior, identificando aquellos elementos más expuestos o a través de la **selección de los indicadores** que representen los activos expuestos. Dependiendo de la amenaza concreta y elemento expuesto que se esté analizando, se definen unos indicadores u otros.

Por ejemplo, para el análisis de inundaciones pluviales, sobre la interrupción del tráfico en una ciudad, la exposición se mide por el número de usuarios de un segmento de carretera. Esto depende de la ubicación de la red de carreteras en relación con el peligro, la importancia de cada enlace en la red y el número de personas que usan el enlace. Esta evaluación se puede hacer de dos maneras:

- A través de la observación (por ejemplo, sensores en carretera) o el análisis (por ejemplo, la medición matemática de las propiedades de los enlaces de red) para evaluar la importancia de un enlace por carretera y el nivel de exposición.
- A través de un modelo de transporte que asigna viajes a enlaces en la red de carreteras.

Otra manera de evaluar la exposición es mediante el análisis de umbrales, identificando un valor crítico asociado a una variable climática (precipitación, temperatura) con una consecuencia negativa concreta.

El análisis de umbrales vincula los impactos del cambio climático (amenazas) a sus resultados potenciales. Estos umbrales se pueden definir a través de la investigación, la consulta de las partes interesadas o ambos, y contribuyen al desarrollo de un marco de conceptual para el análisis de vulnerabilidad. A modo de ejemplo se propone revisar el propuesto en Agnew M. y Goodess, C., 2016 (121).

Teniendo en cuenta que el análisis lo estamos centrando en el sistema de drenaje urbano consideramos que los elementos expuestos más relevantes se asocian al medio construido, principalmente:

- Usos del suelo.
- Edificaciones.
- Transportes y comunicaciones.
- Sistema de alcantarillado.
- Sistema de saneamiento urbano.
- Tanques de tormenta.

➤ **Tabla 40:** Posibles indicadores de exposición sobre un sistema de drenaje urbano

Medio construido		
1	Usos del suelo	Suelo expuesto a inundaciones y/o subida del nivel del mar (% de superficie expuesta).
		Suelo artificializado expuesto a inundaciones y/o subida del nivel del mar. (% de superficie de suelo artificializado con relación a la superficie expuesta).
		Suelo de actividades económicas expuesto a inundaciones y/o subida del nivel del mar. (% de superficie de suelo de actividades económicas con relación a la superficie expuesta).
		Suelo residencial expuesto a inundaciones y/o subida del nivel del mar. (% de superficie de suelo residencial con relación a la superficie expuesta).
		Suelo de equipamientos expuesto a inundaciones y/o subida del nivel del mar. (% de superficie de suelo de equipamientos con relación a la superficie expuesta).
		Suelo de infraestructuras básicas expuesto a inundaciones y/o subida del nivel del mar. (% de superficie de suelo de equipamientos básicos con relación a la superficie expuesta).
2	Transportes y comunicaciones	Suelo de comunicaciones y transporte expuesto a inundaciones y/o subida del nivel del mar. (% de superficie de infraestructuras de transporte y comunicaciones con relación a la superficie expuesta).
3	Edificaciones	Edificaciones expuestas a inundaciones y/o subida del nivel del mar. (% de superficie de suelo ocupado por edificaciones con relación a la superficie expuesta).
4	Red de drenaje pluvial	Infraestructuras de los sistemas de red de drenaje pluvial y/o alcantarillado sanitario (arquetas, sumideros, tuberías, estación de bombeos, etc.) y tanques de tormentas potencialmente expuestas a inundaciones y subida del nivel del mar. Porcentaje del número de las infraestructuras recogidas en estos sistemas, potencialmente expuestas, respecto del total existentes en el área urbana.
5	Red de alcantarillado (sanitario)	
6	Tanques de Tormenta	

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, el estudio de análisis de vulnerabilidad y riesgo se centrará sobre los elementos expuestos identificados anteriormente (medio construido), aunque colateralmente parece también interesante analizar de forma cualitativa el análisis de vulnerabilidad y riesgo sobre el medio natural (sistemas naturales de drenaje).

Planteamientos específicos para el análisis de los deslizamientos

Como se ha indicado en los apartados anteriores, este apartado se centra en la amenaza de las inundaciones, para las cuales se plantea una metodología concreta. Los deslizamientos y derrumbes son también una amenaza importante en muchas áreas de América Latina, e incluyen un diverso grupo de fenómenos. Aunque existen estudios interesantes que vinculan el cambio climático con los desprendimientos (es posible apreciar una revisión en 196), lamentablemente, los métodos y herramientas para evaluar la incidencia del cambio climático en todos ellos no se encuentran claramente consolidados. No obstante, a continuación, se incluyen algunos planteamientos para considerar este aspecto en el análisis de las amenazas urbanas

Las variables climáticas que influyen más directamente en los deslizamientos de tierra son:

- La precipitación total o media.
- La intensidad de lluvia.
- La temperatura del aire.
- Cambios globales de las variables climatológicas (aridez, etc.).

Estas variables afectan los derrumbes de manera directa (por ejemplo, una fuerte lluvia puede favorecer el derrumbe de una ladera al debilitar sus materiales) o indirecta (cambios en el clima pueden alterar la vegetación que cubre una ladera y que la misma sea más inestable).

De este modo el efecto del clima sobre estos fenómenos puede ser tanto local como generalizado e un amplia área (por ejemplo, si el cambio climático conduce a una situación de desertificación de una región). A la vez, puede ser debido a cambios en la frecuencia e intensidad de fenómenos esporádicos y/o cambio de patrones a largo plazo.

En todo caso, a la hora de evaluar este aspecto en el ámbito de proyectos concretos, toma un especial protagonismo la escala local y prácticamente un estudio de cada una de las laderas en las que se pueden dar estos procesos. El planteamiento general es considerar que su estabilidad se ve determinada por un equilibrio entre la resistencia al corte y esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla (123). La tabla siguiente sintetiza la relación entre las variables climáticas y los parámetros que determinan este equilibrio.

Tabla 41: Cambios directos y posibles respuestas de estabilidad de taludes al cambio climático

Cambio Climático	Condición / proceso afectado	Respuesta de estabilidad de la pendiente
Incremento en precipitación total	Condiciones de antecedentes más húmedos.	Se requiere menos lluvia en un evento para lograr un contenido crítico de agua.
		Reducción de la succión capilar del suelo: reducción de la cohesión. Las capas suavizadas pueden actuar como lubricantes.
		Mayores niveles freáticos: reducción de la resistencia al corte.
	Aumento de peso (sobrecarga).	Aumento de la densidad aparente, lo que conduce a una disminución de la resistencia al corte / relación de tensión en el material cohesivo.
	Mayores niveles freáticos por períodos más largos.	Alcance más frecuente del contenido crítico de agua durante los eventos de lluvia.
	Aumento de la lubricación de las superficies de contacto entre ciertos minerales.	Reducción de la fricción (solo ocurre con ciertos minerales laminados, por ejemplo, micas).
	Aumento de la descarga del río.	Aumento de la socavación del margen y la eliminación del soporte lateral y basal de las pendientes.
Niveles de lagos más altos, aumento de las capas freáticas de las pendientes.		
Aumento de los eventos de descenso y mayores fuerzas de arrastre, eliminación de la presión de confinamiento lateral más niveles de agua subterránea colocados en la recesión por inundación, aumentando la tensión de corte.		
Aumento de la intensidad de la lluvia.	La infiltración es más probable que exceda las tasas de drenaje del subsuelo. Rápida acumulación del nivel freático.	El desencadenamiento de deslizamientos de tierra por la reducción del esfuerzo normal efectivo conduce a la reducción de la resistencia al corte. Aumento de la presión del agua hendida.
	Aumento de flujo.	Aumento de la filtración y fuerzas de arrastre, desprendimiento de partículas y tuberías. La tubería elimina el soporte estructural subyacente. Mejora el drenaje a menos que ocurra un bloqueo.
Cambio en las trayectorias de los ciclones y otros sistemas climáticos con lluvia.	Áreas previamente no afectadas, sujetas a altas precipitaciones.	Ajuste rápido de pendientes al nuevo régimen climático.

Cambio Climático	Condición / proceso afectado	Respuesta de estabilidad de la pendiente
Incremento de la variabilidad en precipitación y temperatura.	Ciclos más frecuentes de humectación y secado.	Aumenta la fisuración, ensanchamiento de los sistemas de unión Reducción de la cohesión y la fricción de la masa rocosa.
Aumento de la temperatura	Reducción de las condiciones del agua antecedente a través de la evapotranspiración.	Antecedente inferior del estado del agua: se requiere más lluvia para activar los deslizamientos.
	Reducción de hielo intersticial y permafrost.	Reducción de la cohesión en masas de rocas articuladas, escombros y tierra.
	Deshielo rápido: escorrentía e infiltración.	Acumulación de presión intersticial y reducción de la resistencia.
	Reducción del volumen del glaciar.	Eliminación del soporte lateral a las pendientes laterales del valle
	Aumento del nivel del mar.	Erosión basal mejorada en costas, aumento de los niveles de agua subterránea en laderas costeras.
Mayor velocidad y duración del viento.	Evapotranspiración mejorada	Reducción de la humedad del suelo. Secado y agrietamientos mejorados.
	Arrastre de raíces mejorado por árboles.	Aflojar y desalojar bloques de juntas.
	Aumento de la acción de las olas en las costas (mejorado por los niveles más altos del mar).	Eliminación de la inclinación del soporte lateral.

➤ **Fuente:** Adaptado de “Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review” (124).

Considerar cada uno de estos aspectos en el análisis de la estabilidad de las laderas y los factores de seguridad de las mismas es ciertamente complejo, pero, en el caso de que este aspecto sea determinante para el Proyecto, es recomendable al menos evaluar cuales son las tendencias previstas para las variables comentadas anteriormente y, en caso de que puedan representar una amenaza creciente, plantear márgenes de seguridad más amplios de los que podrían deducirse de los registro climáticos históricos.

6.6.3 Paso 3: Análisis de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad de un proyecto de infraestructura depende de la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la capacidad para hacer frente y adaptarse. La sensibilidad es el grado en que el sistema de estudio se ve afectado de forma positiva o negativa por la variabilidad de las variables climáticas. A continuación, se detalla los factores que afectan a la sensibilidad asociada a cada uno de los elementos expuestos identificados en el apartado anterior.

En este caso, las variables climáticas que se deben considerar son las precipitaciones extremas y la subida del nivel del mar. Por tanto, es importante identificar los indicadores de sensibilidad asociados a estas variables que afectan a nuestro sistema. Es decir, cuáles son los parámetros a partir del cual el sistema se colapsa u ocurre un mal funcionamiento. Para identificar estos indicadores es importante mirar valores de eventos extremos pasados, para poder identificar esos umbrales de parada o mal funcionamiento.

Para caracterizar la vulnerabilidad, son necesarias las siguientes actividades:

- Definición del modelo de datos e indicadores de selección para la evaluación de sensibilidad y capacidad de adaptación.
- Agregación de indicadores y resultados de la evaluación de vulnerabilidad por cada amenaza (Opcional).
- Formulación de la vulnerabilidad a una amenaza o detección de punto de acceso.

Considerando los elementos expuestos del sistema de drenaje urbano, se ha considerado importante identificar posibles indicadores que miden lo vulnerable que son cada uno de los elementos expuestos de la forma siguiente:

➤ **Tabla 42:** Análisis de vulnerabilidad sobre el medio construido (sensibilidad)

Medio construido	
Elemento expuesto	Sensibilidad
Usos del suelo	Suelo artificializado sobre masas de agua subterráneas. Porcentaje de superficie de suelo artificializado que se encuentra localizado sobre masas de agua subterráneas. El suelo artificializado hace referencia a la totalidad de suelo que ha perdido su condición de natural. La correspondencia con suelo urbanizado se puede vincular con usos residenciales, industriales, equipamientos o servicios; infraestructuras viales, ambientales, energéticas o de otro tipo.
	Pérdidas por siniestros debidos a inundaciones y/o subida del nivel del mar. Promedio anual de las cantidades indemnizadas por inundaciones ocurridas a lo largo de un determinado periodo de años.
	Tipologías de actividades económicas que se encuentran expuestas.
Edificaciones	Densidad de edificaciones (viviendas).
	Porcentaje de edificaciones (viviendas) desocupadas respecto a las expuestas a inundaciones y subida del nivel del mar.
	Antigüedad media de las edificaciones. Antigüedad media de las edificaciones en el área urbana correspondiente al último año del que se dispone del dato.
	Porcentaje de edificaciones (inmuebles) localizados en planta baja respecto a los inmuebles expuestos a inundaciones y subida del nivel del mar.
	Valor catastral medio de las edificaciones (inmuebles) expuestas a inundaciones y subida del nivel del mar.
	Viviendas aisladas. Porcentaje de viviendas que no comparten el edificio con otras viviendas.
	Porcentaje de indemnizaciones totales correspondientes a siniestralidades por inundaciones y/o subida del nivel del mar.
Transportes y comunicaciones	Servicios de transporte y comunicaciones interrumpidos.
Red de alcantarillado (sanitario)	Caudal máximo, precipitación máxima que puede gestionar, volumen de capacidad de agua que llega a PTAR y posible sobrecarga de caudal de los elementos de los distintos tratamientos de la PTAR, etc.
Red de drenaje pluvial	Kilómetros de red separativa en relación con la global, volumen de capacidad de agua que llega a PTAR y posible sobrecarga de caudal de los elementos de los distintos tratamientos de la PTAR, Porcentaje de la red de colectores con diámetros superiores a 180 cm, Porcentaje de la red de colectores con pendiente media inferior a 5 m/km, número de limpiezas anuales y mantenimiento, etc.
Tanques de tormentas	Localización, volumen de retención (m ³), tiempo de retención (h), Caudal máximo de entrada (l/s), Caudal máximo de salida (l/s), velocidad máxima de salida (l/s), etc.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

➤ **Tabla 43:** Análisis de vulnerabilidad sobre el medio construido (capacidad adaptativa)

Medio construido	
Elemento expuesto	Capacidad Adaptativa
Usos del suelo	Superficie no artificializada (permeable). Porcentaje de superficie no artificializada (permeable) con respecto a la superficie expuesta a inundaciones y subida del nivel del mar.
	Suelo de espacios libres expuesto a inundaciones y/o subida del nivel del mar. Porcentaje de suelo de espacios libres con relación a la superficie expuesta a inundaciones y subida del nivel del mar.
	Espacios libres urbanos. Porcentaje de suelo de espacios libres con relación a la superficie de suelo artificializado.
	Suelo no urbanizable expuesto a inundaciones y/o subida del nivel del mar. Porcentaje de suelo no urbanizable con relación a la superficie expuesta a inundaciones y subida del nivel del mar.
Edificaciones	Edificios equipados con zonas verdes. Porcentaje de edificios que cuenta con un entorno de zonas verdes como parte de su equipamiento con relación al número total de edificios.
	Infraestructuras básicas (edificaciones) con capacidad de tomar parte en la gestión de las posibles situaciones de crisis que se puedan generar por inundaciones y/o subida del nivel del mar, identificados en el área urbana. Estas posibles infraestructuras se pueden corresponder con centros municipales y administrativos, polideportivos municipales, hospitales, centros de salud, bomberos, seguridad ciudadana, estación de autobuses, etc.
Transportes y comunicaciones	Red de transportes y comunicación (carreteras, viales, etc.) con presencia de zonas verdes próximas. Presentan mayor capacidad de amortiguar los efectos de las inundaciones que sin estas Green áreas.
	Presencia de cámaras en las proximidades de red de transportes y comunicación (carreteras, viales, etc.). Presentan mayor capacidad de control del evento extremo de inundación, que en tramos sin estas cámaras próximas.
	Presencia de paneles en las proximidades de red de transportes y comunicación (carreteras, viales, etc.). Presentan mayor capacidad de aportar información o consignas, en relación con el evento extremo de inundación, que en tramos sin estos paneles próximos.
	Red de transportes y comunicación (carreteras, viales, etc.) con doble sentido de circulación. Presentan mayor capacidad de adaptación y recuperación (y de minimizar el evento de crisis) en relación, que en tramos sin doble sentido.
Red de alcantarillado (sanitario)	Tipología de la red: unitaria/separativa, longitud total de la red y ubicación, red de colectores principales del sistema: diámetro, longitud, pendiente, velocidad del recorrido, capacidad hidráulica, recursos / régimen de mantenimiento, etc.
Red de drenaje pluvial	Porcentaje de superficie ocupada por rejillas de saneamiento con respecto a la superficie expuesta a inundaciones por oleaje y subida del nivel del mar.
Tanques de tormentas	Equipamiento-Autómatas, criterios de dimensionamiento, etc.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

➤ **Tabla 44:** Análisis de vulnerabilidad sobre el medio natural (sensibilidad)

Medio natural	
Elemento expuesto	Sensibilidad
Medio Natural	Masas de agua subterráneas. Porcentaje de masas de agua subterráneas con relación a la superficie total del municipio. Se consideran las masas de agua subterráneas incluidas como condicionantes superpuestos, en relación con la posible vulnerabilidad de acuíferos.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

➤ **Tabla 45:** Análisis de vulnerabilidad sobre el medio natural (capacidad adaptativa)

Medio natural	
Elemento expuesto	Sensibilidad
Medio Natural	Porcentaje de superficie verde con respecto a la superficie expuesta a inundaciones y subida del nivel del mar.
	Superficie verde por habitante.
	Porcentaje de superficie de masa arbórea con respecto a la superficie expuesta a inundaciones y subida del nivel del mar.

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Para llevar a cabo el análisis cuantitativo, se puede analizar estadísticamente las correlaciones de todos los valores de los indicadores que intervienen, mediante la asignación de pesos iguales (o no) a estos u otros indicadores de sensibilidad y de capacidad adaptativa. Una vez definidos los pesos, se lleva a cabo la agregación de los distintos indicadores de sensibilidad, capacidad de adaptación, y finalmente de la vulnerabilidad.

Para agrupar los indicadores se pueden utilizar distintas metodologías (media aritmética, geométrica). Si se tiene en cuenta la aproximación del 5º Informe del IPCC (2014) la vulnerabilidad quedaría expresada de la siguiente manera:

$$V = (\alpha \times SE) - (\beta \times CA);$$

Donde α y β corresponden a los pesos de las variables sensibilidad (SE) y capacidad adaptativa (CA) respectivamente.

6.6.4 Paso 4: Evaluación del riesgo

Como en el resto de los sectores analizados, el riesgo es considerado como función de la probabilidad (relacionado con la amenaza) y la consecuencia (relacionado con la exposición y vulnerabilidad), en línea con el marco conceptual recogido en el quinto y último informe publicado hasta la fecha por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014).

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Consecuencia}$$

Es necesario, por tanto, establecer la probabilidad de que acontezca dicho escenario (amenaza) para cada escenario climático considerado. Posteriormente, al igual que en el apartado anterior, se analiza estadísticamente las correlaciones de todos los valores de los indicadores que intervienen, mediante la asignación de pesos iguales (o no), y una vez definidos los pesos y la agregación de los distintos indicadores, finalmente determinar el riesgo climático final del proyecto de drenaje urbano.

Figura 55: Ejemplo de valoración cualitativa

Consecuencia Probabilidad		Inexistente	Mínima	Menor	Significativa	Muy importante	Grave	Muy grave
		0	3	4	5	7	9	10
Improbable	1	0	3	4	5	7	9	10
Muy poco probable	2	0	6	8	10	14	18	20
Poco probable	3	0	9	12	15	21	27	30
Probable	4	0	12	16	20	28	32	40
Bastante probable	5	0	15	20	25	35	45	50
Muy probable	6	0	18	24	30	42	54	60

Fuente: Elaboración propia. Tecnalía, 2014.

Leyenda:

Probabilidad

- 1 Excepcionalmente improbable que suceda.
- 2 Muy improbable que suceda.
- 3 Improbable que suceda.
- 4 Tan probable que suceda como que no suceda.
- 5 Bastante probable que suceda.
- 6 Muy probable que suceda.

Consecuencias

- 0 Sin daños físicos y sin repercusiones.
- 3 Repercusiones irrelevantes en las cuentas anuales del activo. Daños físicos irrelevantes.
- 4 Menor. Repercusiones en las cuentas anuales del activo asumibles sin dificultad. Daños físicos leves.
- 5 Significativa. Repercusiones notables en las cuentas anuales del activo, pero asumibles. Daños físicos notables.
- 7 Importante Importantes repercusiones en las cuentas anuales del activo, asumibles con mayor dificultad que en el grado de impacto anterior. Daños físicos importantes pero asumibles.
- 9 Grave Graves repercusiones en las cuentas anuales, llegándose a contemplar la posibilidad de cierre del activo. Daños físicos difíciles de asumir.
- 10 Muy grave Las repercusiones económicas exigen el cierre o renovación total del activo.

Fuente: Elaboración propia (Tecnalía, 2014).

Adicionalmente, en línea con el marco de análisis de los otros sectores analizados, se considera adecuado estimar para cada escenario climático, las consecuencias de materialización del proyecto, considerando tanto el servicio dado a la población como el enfoque del riesgo financiero, en base a:

- El aumento de la inversión de capital inicial (CAPEX).
- El incremento de las pérdidas económicas (OPEX), que engloba el incremento del gasto de mantenimiento y las pérdidas económicas generadas por la variabilidad climática.

➤ **Tabla 46:** Fases para la evaluación del riesgo climático de un proyecto de drenaje urbano

Evaluación de la probabilidad de ocurrencia		
1	Evaluación de la probabilidad de los escenarios analizados.	<p>La evaluación del riesgo implica un análisis probabilístico de diferentes evoluciones plausibles del clima y sus consecuencias en la viabilidad del proyecto.</p> <p>Aunque se expone más detalladamente en el apartado 4, merece la pena resaltar que, si bien con los modelos comentados es posible calcular las repercusiones de cada escenario estudiado, establecer una probabilidad para cada uno de los escenarios (climáticos y no climáticos) es ciertamente complejo. Ante la falta de elementos de decisión acerca de porque cualquiera de los RCP existentes podría tener más posibilidades de acontecer en el futuro, se propone considerar todos ellos como equiprobables. En cuanto a otros aspectos de los escenarios climáticos, como la selección de aquellos modelos de entre todos los que integran CMIP5 que son más acertados, las técnicas de regionalización o ajuste de sesgo a la ubicación concreta del proyecto más adecuadas, etc. también es complejo y se recomienda una combinación de las salidas de diferentes modelos.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre el servicio prestado		
2	Evaluación del efecto sobre la actividad de la población.	<p>La pérdida o reducción del servicio que los sistemas de drenaje y resto de infraestructuras prestan a la sociedad, originan alteraciones del normal funcionamiento de las áreas urbanas. Cuanto mayor sea la población afectada por fallos o situaciones de saturación, más críticas sean las áreas afectadas, etc. mayores serán las consecuencias y por tanto el riesgo que se puede asociar a los impactos del cambio climático. Lógicamente no se puede comparar que se inunde una zona recreativa de uso esporádico que una central eléctrica crítica o un equipamiento sanitario irremplazable. Aunque es complejo cuantificar económicamente estos aspectos, resulta recomendable tener en cuenta este planteamiento y no limitar el análisis a los daños a las consecuencias directas del cambio climático (por ejemplo, otorgando un valor o puntuación diferenciado a la inundación de cada área de la ciudad).</p> <p>El análisis también puede tener presente que en ocasiones los impactos pueden ser en cascada y llegar a originar pérdidas de actividad de otras redes urbanas ((125)), especialmente si se ve interrumpido el servicio de telecomunicaciones y de energía ((126)), vitales para muchos equipamientos.</p> <p>Este análisis de las consecuencias de los impactos puede implicar el uso de diferentes escenarios socioeconómicos, de evolución del desarrollo urbanístico de la ciudad, nuevas infraestructuras, etc.</p>
Evaluación de las consecuencias del CC sobre el CAPEX		
3	Evaluación de la diferencia de costo asociada a diseños adaptados a las condiciones futuras.	<p>El CAPEX engloba costos de inversión relacionados con la infraestructura física (arquetas, sumideros, tuberías, colectores, etc. y otros aspectos técnicos) que dependerán de la ubicación y de factores ambientales y socioeconómicos (clima, orografía, vegetación, distancia a la infraestructura esencial, altura del terreno, usos y precio del suelo, ...).</p> <p>El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá adaptar el diseño de la instalación y guiar la selección de sus componentes. Esto puede tener impacto en:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costos de inversión inicial de los equipos y su instalación (correcto dimensionamiento de equipos, arquetas, tuberías, número de sumideros, colectores, etc.). • Costos asociados a sustitución de componentes por modificación de su vida útil en las condiciones futuras. Colapsos y/o roturas o desgaste por posibles sedimentos que arrastre el agua. <p>El aumento de la inversión de capital inicial evalúa cuantitativamente el incremento en la inversión de capital inicial necesaria para hacer frente a los impactos de cambio climático, ya que estos provocan daños significativos a la infraestructura y se requiere cierta inversión para repararlos.</p> $\text{Aumento inversión capital inicial (\%)} = \frac{\Delta \text{CAPEX}}{\text{CAPEX}} \cdot 100$ <p>ΔCAPEX: Suma del aumento de la inversión de capital inicial de todos los impactos derivados del cambio climático.</p> <p>CAPEX: Inversión inicial de la infraestructura.</p>

Evaluación de las consecuencias del CC sobre el OPEX

4	Evaluación de la diferencia de costo asociada a diseños adaptados a las condiciones futuras.	<p>El OPEX contempla costos relacionados el régimen de operación y mantenimiento de la planta, necesarios para el funcionamiento adecuado de la instalación.</p> <p>El análisis de las condiciones climáticas futuras permitirá determinar la evolución de estos costos y realizar ajustes en la rentabilidad a largo plazo de la instalación (costos vs. ingresos por producción) que se verá modificada, como se ha visto, por los cambios que se den en los costos de mantenimiento y reparación y por paradas de operación. Podrán verse alteradas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • por mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitaciones (avenidas). • por los sedimentos que arrastre el agua, con impacto directo en las necesidades de mantenimiento del equipamiento. <p>El incremento de las pérdidas económicas engloba el incremento del gasto de mantenimiento y las pérdidas económicas generadas por la variabilidad climática.</p> $\text{Incremento de las pérdidas económicas (\%)} = \frac{\Delta\text{OPEX} + \Delta\text{Beneficio}}{ \text{Beneficio} - \text{OPEX} } \cdot 100$ <p>ΔOPEX: Suma del incremento anual del gasto de mantenimiento de la infraestructura y de las pérdidas económicas generadas por incremento en el número de paradas de operación de todos los impactos derivados del clima.</p> <p>OPEX: Gasto anual de mantenimiento de la infraestructura.</p> <p>Beneficio: Beneficio anual de la infraestructura.</p>
---	--	---

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Con los valores (%) de incremento de las pérdidas económicas y de aumento de la inversión de capital inicial se obtiene una estimación cualitativa del riesgo de cada uno de los escenarios estudiados. Esta estimación se puede aplicar con métodos semicuantitativos, por ejemplo, a través de una tabla que otorgue un valor único de riesgo a cada escenario en función de la inversión (CAPEX) y las pérdidas económicas generadas o evitadas (OPEX).

➤ **Tabla 47:** Ejemplo de estimación cualitativa del riesgo de cada uno de los escenarios considerados en el análisis

			Incremento de las pérdidas económicas (%)		
			Bajo	Medio	Alto
			≤3%	3% – 8%	≥8%
Aumento de la inversión de capital inicial (%)	Alto	≥10%	ALTO	ALTO	ALTO
	Medio	3% – 10%	MEDIO	MEDIO	ALTO
	Bajo	≤3%	BAJO	MEDIO	ALTO

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

6.6.5 Resumen de componentes de riesgo

La siguiente tabla resume cómo se definen los diferentes componentes de riesgo en un proyecto vinculado al sistema de drenaje urbano, en base a la información presentada en los apartados anteriores.

- La primera columna “Componente del riesgo”, muestra los diferentes componentes del riesgo (amenaza, exposición, etc.).
- En la segunda columna “Aplicación en proyectos de sistemas de drenaje urbano” se resumen los factores que pueden hacer que el proyecto de infraestructura se pueda ver más o menos afectado por el cambio climático, organizados según el componente del riesgo sobre el que influyen: factores que determinan la exposición del proyecto al cambio climático, los que determinan su sensibilidad, etc.
- La última columna “Indicadores de cambio climático en proyectos de sistemas de drenaje urbano”, enumera los indicadores que habría que monitorizar para determinar si se está produciendo un cambio en el factor (de la segunda columna) y su potencial impacto sobre el proyecto.

Por ejemplo, los cambios que se produzcan en el nivel del mar (indicador) suponen una amenaza al introducir modificaciones en la escorrentía de diseño de la instalación (aplicación al proyecto).

► **Tabla 48:** Aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo climático de un proyecto vinculado a sistema de drenaje urbano

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de sistemas de drenaje urbano	Indicadores de riesgo a considerar en proyectos de sistemas de drenaje urbano
Amenaza	Cambios en el recurso (escorrentía).	Cambios en el patrón de precipitaciones.
	Cambios en la eficiencia y operación.	Incremento del nivel del mar.
Exposición	Medio Construido: Usos del suelo.	Suelo construido expuesto. (% de superficie expuesta y superficie útil expuesta).
		Suelo artificializado expuesto (pérdida de condición natural). (% de superficie de suelo artificializado con relación a la superficie expuesta).
		Suelo de actividades económicas expuesto. (% de superficie de suelo de actividades económicas con relación a la superficie expuesta y superficie útil expuesta).
		Suelo residencial expuesto. (% de superficie de suelo residencial con relación a la superficie expuesta y superficie útil expuesta).
		Suelo destinado a equipamientos expuesto. (% de superficie de suelo de equipamientos con relación a la superficie expuesta y superficie útil expuesta).
		Suelo destinado a infraestructuras básicas expuesto. (% de superficie de suelo de equipamientos básicos con relación a la superficie expuesta y superficie útil expuesta).
		Medio Construido: Transportes.
	Medio Construido: Edificaciones.	Edificaciones expuestas. (% de superficie de suelo ocupado por edificaciones con relación a la superficie expuesta y superficie útil expuesta).
	Medio Construido: Red de drenaje pluvial.	Infraestructuras del sistema de alcantarillado y/o saneamiento (arquetas, sumideros, tuberías, estación de bombeos, etc.) y tanques de tormentas potencialmente expuestas a inundaciones y subida del nivel del mar.
	Medio Construido: Red de alcantarillado (sanitario).	
Medio Construido: Tanques de Tormenta.	Ubicación de cada uno de los elementos que lo integran.	
Población y actividades en la zona servida por la infraestructura de drenaje.	Población (número de habitantes). Valor de las propiedades (o de aquellas partes de las mismas que puede verse inundada). Servicio que prestan las construcciones y actividades ubicadas en la zona (p.ej. más importante en el caso de infraestructuras críticas y menor en el caso de infraestructuras cuyo servicio puede ser prescindible).	

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de sistemas de drenaje urbano	Indicadores de riesgo a considerar en proyectos de sistemas de drenaje urbano
Sensibilidad	Medio Construido: Usos del suelo.	<p>Suelo artificializado sobre masas de agua subterráneas.</p> <p>Pérdidas por siniestros (inundaciones y/o subida del mar). Promedio anual de las cantidades indemnizadas por inundaciones ocurridas con anterioridad a lo largo de un determinado periodo de años.</p> <p>Tipos de actividades económicas expuestas.</p>
	Medio Construido: Transportes.	Servicios de transporte y comunicaciones interrumpidos.
	Medio Construido: Edificaciones.	<p>Evolución de la edificación de la zona: densidad de edificaciones (viviendas), edificaciones (viviendas) desocupadas, edificaciones (viviendas) aisladas, edificaciones (viviendas) localizados en planta baja.</p> <p>Evolución del valor catastral medio de las edificaciones (inmuebles).</p> <p>Compensaciones correspondientes a inundaciones (promedio de un determinado periodo previo).</p>
	Medio Construido: Red de drenaje pluvial.	<p>Precipitación máxima que puede gestionar.</p> <p>Volumen de capacidad de agua que llega a PTAR y posible sobrecarga de caudal de los elementos de los distintos tratamientos de la PTAR, etc.</p> <p>Km de red separativa en relación con la global.</p>
	Medio Construido: Red de alcantarillado (sanitario).	<p>Volumen de capacidad de agua que llega a PTAR y posible sobrecarga de caudal de los elementos de los distintos tratamientos de la PTAR.</p> <p>Porcentaje de red de colectores con diámetros > a 180 cm.</p> <p>Porcentaje red de colectores con pendiente media < 5m/km.</p> <p>Número de limpiezas anuales y mantenimiento, etc.</p>
	Medio Construido: Tanques de Tormenta.	Evolución de los diferentes parámetros de diseño: volumen de retención (m ³), tiempo de retención (h), caudal máximo de entrada y de salida (l/s), velocidad máxima de salida (l/s), masas de agua subterráneas.
	Medio Natural.	Evolución de la superficie no artificializada (permeable) de las cuencas que drenan hacia la infraestructura.

Componente del riesgo	Aplicación en proyectos de sistemas de drenaje urbano	Indicadores de riesgo a considerar en proyectos de sistemas de drenaje urbano
Capacidad adaptativa	Medio Construido: Usos del suelo.	Evolución de los usos del suelo: suelo de espacios libres expuesto, espacios libres urbanos, suelo no urbanizable expuesto, transportes y comunicaciones con presencia de zonas verdes próximas.
	Medio Construido: Transportes.	Presencia de cámaras.
		Presencia de paneles.
		Transportes y comunicaciones con doble sentido.
		Edificios equipados con zonas verdes.
	Medio Construido: Edificaciones.	Infraestructuras (edificaciones) con capacidad de tomar parte en la gestión de las posibles situaciones de crisis.
		Tipología de la red: Unitaria/separativa.
	Medio Construido: Red de drenaje pluvial.	Longitud total de la red y ubicación.
		Red de colectores principales del sistema: diámetro, longitud, pendiente, velocidad del recorrido, capacidad hidráulica.
		Recursos / régimen de mantenimiento, etc.
		Tipología de la red: Unitaria/separativa.
	Medio Construido: Red de alcantarillado (sanitario).	Longitud total de la red y ubicación.
		Red de colectores principales del sistema: diámetro, longitud, pendiente, velocidad del recorrido, capacidad hidráulica.
Recursos / régimen de mantenimiento, etc.		
Porcentaje de superficie ocupada por rejillas de saneamiento con respecto a la superficie expuesta a inundaciones por oleaje y subida del nivel del mar.		
Equipamiento-Autómatas.		
Medio Construido: Tanques de Tormenta.	Criterios de dimensionamiento, etc.	
	Porcentaje de superficie verde.	
Medio Natural.	Superficie verde por habitante.	
	Porcentaje de superficie de masa arbórea.	

➤ **Fuente:** Elaboración propia.

Como en el resto de tablas similares incluidas en los apartados anteriores, este conjunto de aspectos e indicadores a considerar deberá de ser ajustado a las características del análisis. En ocasiones, algunos de estos aspectos pueden ser considerados como parte de diferentes componentes del riesgo.



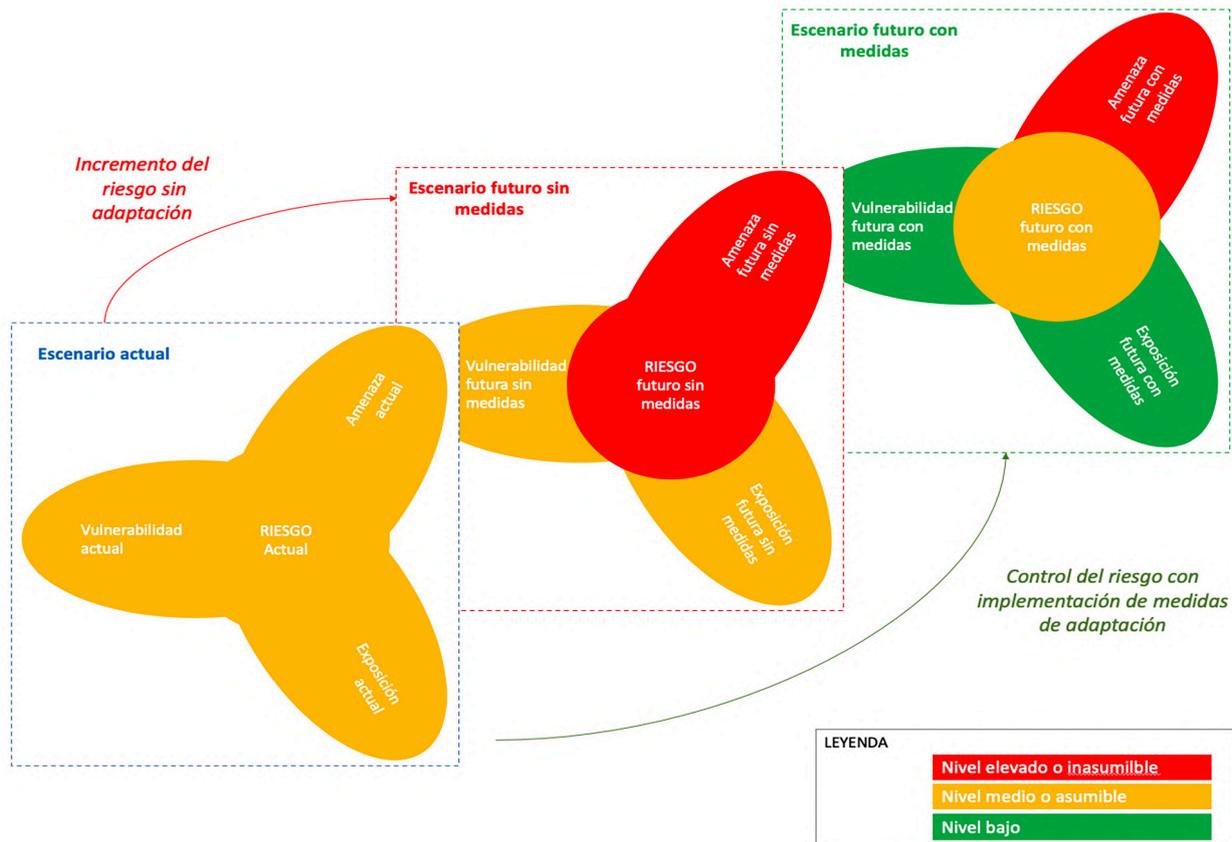
7 > Identificación y selección de opciones de adaptación

7.1 Descripción del planteamiento metodológico de la adaptación al cambio climático	184
7.2 Técnicas de valoración de las medidas de adaptación	188
7.3 Propuesta de medidas tipo	192



Diseñar y operar la infraestructura con riesgos climáticos prácticamente nulos sería extremadamente costoso, por lo que, generalmente, se diseñan para alcanzar un nivel medio o asumible de riesgo. Este puede ser valorado en el escenario actual considerando las amenazas a las que tiene que hacer frente (p. ej. empleando registros climáticos históricos), su exposición y vulnerabilidad. Debido al cambio climático las amenazas pueden verse incrementadas en severidad o frecuencia, por lo que los riesgos pueden verse incrementados en ausencia de medidas de adaptación hasta niveles elevados o inasumibles. En cambio, si se implementan medidas que reduzcan la vulnerabilidad de la infraestructura o su exposición (generalmente será complejo limitar las amenazas asociadas al cambio climático), se podrían mantener niveles de riesgo medios o asumibles.

Figura 56: Planteamiento para el control del riesgo climático de la infraestructura a través de la implementación de medidas de adaptación



Fuente: Elaboración propia.

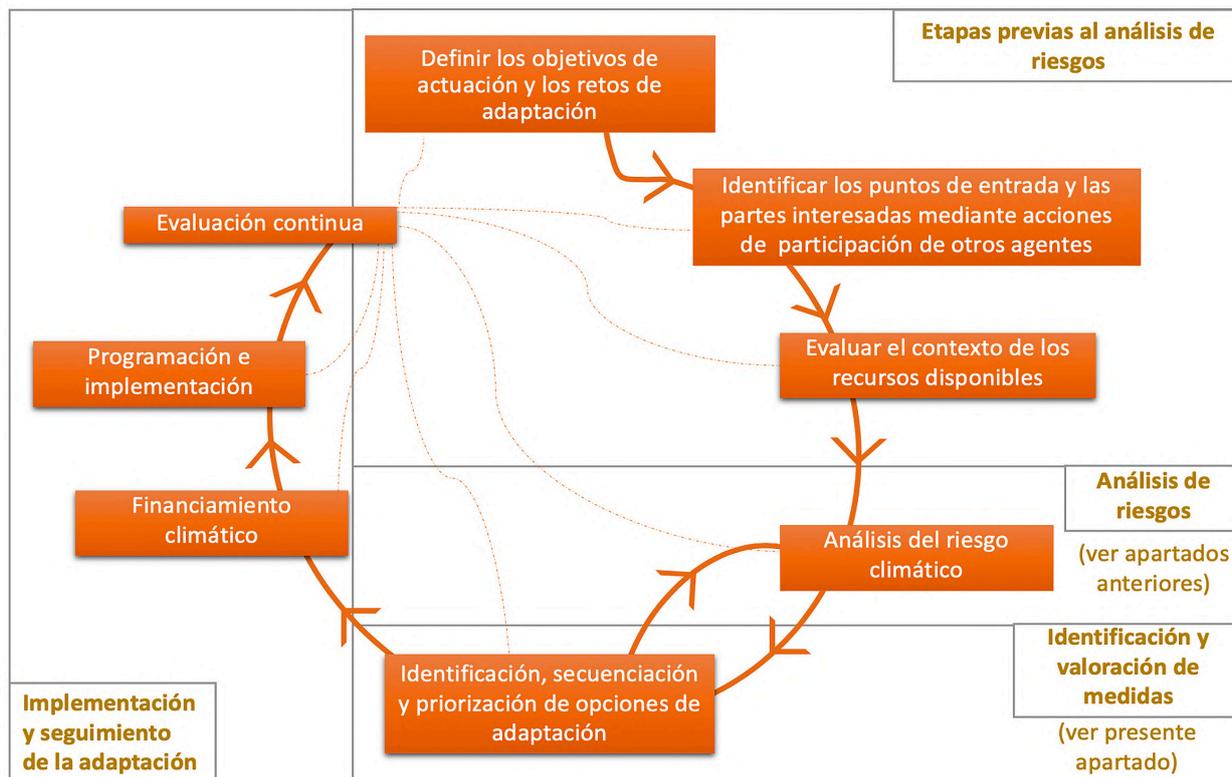
En este apartado se propone la metodología para la identificación y selección de las posibles opciones de adaptación sobre los parámetros de diseño de la infraestructura o sobre el entorno de la misma, tomando como base los resultados que se han obtenido en los pasos anteriores para la evaluación de riesgos.

7.1 Descripción del planteamiento metodológico de la adaptación al cambio climático de proyectos de infraestructura

En este apartado de la guía se han recogido las consideraciones a tener en cuenta para incluir criterios de adaptación en los proyectos de infraestructura. Para ello se definen las metodologías para valorar diferentes opciones de adaptación y recomendaciones “tipo” para promover la adaptación al cambio climático en cada uno de los sectores que considera la guía. Las medidas tipo se han recogido en los apartados siguientes, específicamente destinados a generar una base de datos de potenciales medidas de adaptación que oriente a los promotores de los proyectos.

Para exponer la lógica de la definición de medidas de adaptación, es preciso tener presente que realmente esta etapa forma solo una parte de un proceso más amplio que incluye tanto lo anteriormente expuesto en cuanto a análisis de riesgos, como otra serie de tareas que configuran un ciclo dinámico de planificación y gestión de la adaptación frente al cambio climático. Este ciclo que se esquematiza en la imagen siguiente se basa en lo propuesto por el proyecto EconoAdapt ((127)), pero realmente pueden encontrarse planteamientos muy similares en otras iniciativas citadas en el Estado del Arte del Tomo 2 como, por ejemplo, en las metodologías propuestas por CLIMADA (128), *The Urban Adaptation Support Tool* (129), etc.

Figura 57: Marco general para el análisis económico de la adaptación climática



Fuente: Elaboración propia basado en *Econoadapt toolbox* ((127)) y otras fuentes, (128) (129).

7.1.1 Tareas previas al análisis de riesgos climáticos y el análisis de opciones de adaptación

En prácticamente todas las metodologías planteadas para abordar el diseño de planes y medidas de adaptación se destaca que, antes de iniciar todo lo anteriormente expuesto en el apartado de análisis de riesgos, es conveniente en muchas ocasiones plantear una planificación estratégica del proceso adaptativo, ya que los aspectos sociales, ambientales y políticos pueden tener múltiples interrelaciones, derivadas, complejidades, etc.

- Definir los objetivos de actuación y los retos de adaptación.
- Identificar los puntos de entrada y las partes interesadas mediante participación de otros agentes.
- Evaluar el contexto y los recursos disponibles para abordar el análisis y planificación de la adaptación.

Estos puntos pueden ser bastantes obvios (e innecesario) en el caso de proyectos de inversión relativamente aislados en los que el objetivo de obtener el máximo rendimiento económico (lógicamente respetando todas las salvaguardas ambientales y sociales) prima sobre todos los demás. Pero en otros casos, como es el caso de intervenciones urbanas, grandes proyectos de infraestructura que afectan a una amplia zona, etc. puede ser conveniente dedicar recursos a estas tareas previas de diseño estratégico del proceso adaptativo, ya que los aspectos sociales, ambientales y políticos pueden tener múltiples interrelaciones, derivadas, complejidades, etc.

Por ello, especialmente en el caso de los proyectos de carácter más complejo, se recomienda preceder el análisis de riesgos de una evaluación de los objetivos para la adaptación que lo enmarque. Esto no solo permite enfocar el análisis de riesgos, sino que también ayuda a poder tomar decisiones tempranas para comenzar a adaptarse al cambio climático futuro.

Generalmente, el plantear un proceso de adaptación a largo plazo supone un aspecto complejo para organizaciones acostumbradas a objetivos y planes de actuación a corto plazo. En este contexto, en ocasiones, formular cuanto antes la pregunta “¿qué debo hacer en los próximos cinco años?” consigue lanzar el proceso de planificación de la adaptación y la priorización de acciones tempranas para la adaptación que puede catalizar una adaptación a largo plazo de la infraestructura y su gestión.

En todos los ámbitos de la planificación de la adaptación hay un énfasis creciente en integrar la adaptación a la política actual en vez de implementar medidas independientemente. Esto alinea el proceso de adaptación al desarrollo, que es un tema clave en muchos de los países de interés para CAF. Un componente de este proceso de integración es encontrar puntos de entrada relevantes, es decir, identificar oportunidades en el proceso de planificación nacional, sectorial o local donde la adaptación pueda integrarse mejor.

Para el análisis inicial del contexto es necesaria la caracterización de diferentes de ellos, como son:

- el contexto físico, analizando las características ambientales, el clima y el peligro;
- el contexto socioeconómico, definiendo los límites del objetivo, qué personas y actividades son relevantes;
- el contexto político, institucional y de las partes interesadas, realizando una lista de las personas, empresas e instituciones involucradas.

7.1.2 Desarrollo coordinado del análisis de riesgos climáticos y opciones de adaptación

Tras las etapas anteriores, el siguiente paso será analizar la información climática y, a partir de ella y las características del proyecto, los riesgos. Como se ha comentado en los apartados anteriores, mediante un enfoque iterativo, se estudiará primero la variabilidad climática actual y luego las proyecciones futuras del cambio climático.

En la imagen anterior se muestra una vinculación muy intensa entre el desarrollo del análisis de riesgos y el proceso de estudio de las medidas de adaptación. A continuación, se expone porque es interesante abordar estas tareas de manera coordinada.

Cabe destacar que en la evaluación de riesgos es necesario realizar uso de escenarios futuros, tanto climáticos como socioeconómicos. A modo de recordatorio, sería interesante que los mismos recojan aspectos como diferentes escenarios RCP, salidas de modelos climáticos generadas con diferentes modelos RCM o GCM, diferentes escenarios socioeconómicos, etc.

Como se ha indicado anteriormente, una manera eficiente de gestionar la cuantificación de los impactos del cambio climático es expresarlos como cambios en su nivel de riesgo, aspecto que incluye el análisis de varios componentes como la amenaza, exposición y vulnerabilidad del sistema estudiado. La evaluación de riesgos proporciona información importante para la toma de decisiones. No solo la cuantificación de cada uno de ellos puede permitir priorizar y secuenciar las actuaciones, sino que, al requerir el estudio de la amenaza enfrentada, así como de la exposición y vulnerabilidad de la población, componentes del proyecto más expuestos, etc. reúne un importante conjunto de datos que son fundamentales para planificar las estrategias de adaptación más adecuadas.

Para evaluar los impactos probables es interesante generar un modelo que sea capaz de cuantificar el riesgo. En ocasiones ese modelo (o conjunto de modelos) permitirán abordar el estudio desde una perspectiva cuantitativa de los impactos (p.ej. generando valoraciones de tipo económico), pero en otras ocasiones, por la complejidad de los aspectos estudiados, carencia de información, recursos o cualquier otro motivo, el mismo operará más bien sobre un planteamiento cualitativo. Sea como sea, es interesante a la hora de seleccionar y/o diseñar el mismo asegurarnos de que este modelo va a permitir alterar uno o más de los componentes de riesgo (amenaza, exposición, vulnerabilidad) para incorporar y comprender el efecto (es decir, la reducción del riesgo) asociada a la adaptación.

De este modo, el marco de modelización para la evaluación de riesgo se puede utilizar para calcular los impactos de los peligros provocados por el clima tanto considerando una medida de adaptación como sin ella. Contrastar los resultados futuros bajo los dos supuestos permitirá evaluar la efectividad de cada una de las medidas (o paquetes integrados de medidas). Es decir, añadiendo escenarios "con medidas" a los indicados anteriormente para valorar los escenarios "sin medidas" será posible valorar el interés de las medidas de adaptación desde su contribución a la reducción del riesgo.

A modo de ejemplo, pensemos en el análisis de riesgos climáticos de un proyecto hidráulico y el planteamiento de acciones de adaptación sobre el mismo. En ocasiones será posible establecer relaciones de tipo estadístico entre la precipitación y el caudal que podrá aprovechar esta obra hidráulica. Estas pueden mostrar una capacidad predictiva superior a la implementación de un modelo hidrológico y requerir de menor información, al no precisar de cartografía de tipos de suelo, usos de los mismos, modelo digital del terreno, etc. En un primer momento podría parecer, por tanto, que para el análisis de riesgos climáticos considerando diferentes RCP, escenarios socioeconómicos, etc. esta podría ser la opción más acertada y eficiente.

No obstante, en el caso de que nuestro proyecto sea de mediana importancia es posible que el condicionado ambiental y social imponga al mismo intervenir en la cuenca para garantizar su gestión sostenible. Es decir, necesariamente, en el diseño del proyecto o en su ejecución será preciso desarrollar medidas de adaptación y será interesante disponer de las herramientas adecuada para valorar su selección, dimensionamiento, priorización, etc. Si hemos optado por un modelo estadístico, seguramente será muy complejo emplear el mismo para valorar el efecto de las intervenciones en la cuenca, ya que es muy probable que no encontremos parámetros en el mismo que permitan valorar las potenciales medidas. En cambio, si hemos optado por la opción que en un primer momento parecía más compleja, como es el desarrollo y calibración de un modelo hidrológico, muy probablemente el mismo nos permita operar el mismo bajo condiciones que reflejen diferentes opciones de adaptación. Por ejemplo, en caso de plantear reforestaciones sería posible modificar los usos del suelo que emplea el modelo. Por tanto, tal y como se viene repitiendo, es sumamente interesante coordinar las etapas de análisis de riesgos y evaluación de medidas de adaptación, planificando las mismas previamente en base a las características de nuestro proyecto y objetivos.

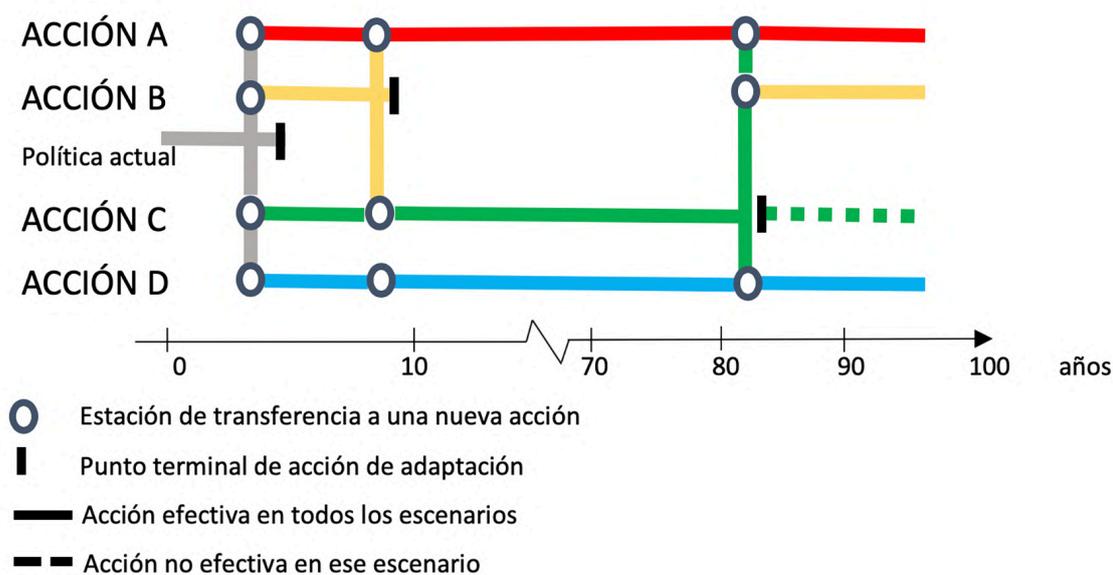
7.1.3 Planificación de la adaptación a largo plazo

Un aspecto que conviene destacar también en cuanto a las etapas de definición de medidas destinadas a la gestión de los riesgos climáticos es la importancia de su planificación a largo plazo y como un conjunto global de opciones. Como se viene indicando en todo el documento, el principal mensaje de esta guía es que no es adecuado planificar la infraestructura y su gestión desde un planteamiento estacionario del clima, ya que el mismo está evolucionando a un ritmo nunca registrado. En este sentido, es preciso tener presente que las medidas de adaptación son efectivas en ciertas circunstancias y pierden parte o toda su efectividad fuera de ciertos límites del sistema. El momento del punto de inflexión generalmente depende del escenario de cambio climático y es difícil de precisar su momento exacto, debido a las incertidumbres relacionadas con el clima futuro y las limitaciones de la modelización. En esta situación, llegado este punto de inflexión, el responsable de la toma de decisiones se enfrentará a un conjunto de opciones de adaptación alternativas.

De este modo, más que un calendario o programa fijo de actuaciones, es recomendable planificar las mismas como un abanico de opciones que es posible combinar en el tiempo para lograr el máximo nivel de reducción de riesgo, en el abanico más amplio de posibles evoluciones del clima y con una inversión lo más eficiente posible.

La imagen siguiente supone una representación gráfica de este planteamiento. En el mismo, cada acción o medida de adaptación puede ser empleada durante un determinado tiempo, lo que supondría, figuradamente, el avanzar por una línea de transporte público. Al llegar a ciertos momentos esa medida puede no ser suficientemente efectiva (algo que se representa con trazos discontinuos). Un ejemplo sería que, frente a la posible subida del nivel del mar, una medida directa sería un pequeño muro, pero en un momento dado, se vería superado por el oleaje perdiendo su eficacia. Llegado ese momento, sería conveniente emprender otra ruta o medida (por ejemplo, retirando ciertas actividades de las zonas expuestas).

➤ **Figura 58:** Representación gráfica del concepto de rutas de adaptación



➤ **Fuente:** Elaboración propia a partir de *"Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world"* ((130))

En este contexto, es sumamente interesante planear las medidas de manera adecuada en el tiempo para optimizar los recursos. En el presente documento se apuesta por contemplar, desde la concepción inicial de la infraestructura, medidas de adaptación, pero, igualmente, es cierto que fuertes inversiones en medidas no flexibles que pierdan efectividad con el paso del tiempo pueden condicionar la adaptación a largo plazo. De este modo, es interesante priorizar en los primeros años las medidas con beneficio en un amplio rango de situaciones (17) y la apuesta por diseños de infraestructura flexibles que permitan adaptar la misma a la evolución de las condiciones climáticas en el futuro.

Volviendo al ejemplo anterior, en el que nos enfrentamos a la definición de medidas de adaptación en un proyecto hidroeléctrico, imaginemos que como resultado del análisis de riesgos climáticos se obtuviera la conclusión de que el proyecto tiene la oportunidad de contar con mayor potencia de la inicialmente planteada, ya que en las próximas décadas es previsible un incremento en el recurso hídrico. El planteamiento de medidas de adaptación, en este caso concreto, podría ser incrementar la potencia de diseño desde un principio para aprovechar esta situación, pero eso tendría escasos beneficios en los primeros años y un incremento del costo global del proyecto. Por ello, tal vez sería una mejor opción plantear un diseño modular del proyecto para que el mismo se vea ampliado en el futuro si se confirma un incremento de los caudales sobre la situación inicialmente prevista.

7.1.4 Tareas de implementación de la adaptación y seguimiento

Tal y como se indica en la Figura 58, las etapas de análisis de las potenciales medidas de adaptación y planteamiento de una secuencia de actuaciones debe de ir continuada de una serie de acciones destinadas a su implementación y seguimiento.

En el primero de estos aspectos, será fundamental poder obtener los recursos financieros para poder implementar las medidas. Generalmente, en el caso de proyectos de infraestructura, que son el objetivo de esta guía, la financiación deberá formar parte del propio proyecto, pero se ha de tener presente que la adaptación al cambio climático cuenta actualmente con diversos mecanismos internacionales y nacionales sobre los que puede ser interesante informarse.

Una vez asegurados los recursos se procederá a la implementación de medidas, lógicamente empezando por las que no muestran posibilidad de arrepentimiento por sus beneficios directos e indirectos, capacidad de aportar beneficios en un amplio abanico de escenarios, etc.

Especialmente en el caso de plantear un programa de medidas de adaptación flexible y que suponga la combinación de varias opciones, será igualmente importante plantear un esquema de seguimiento y evaluación que ayude a tomar las decisiones relacionadas con la adaptación.

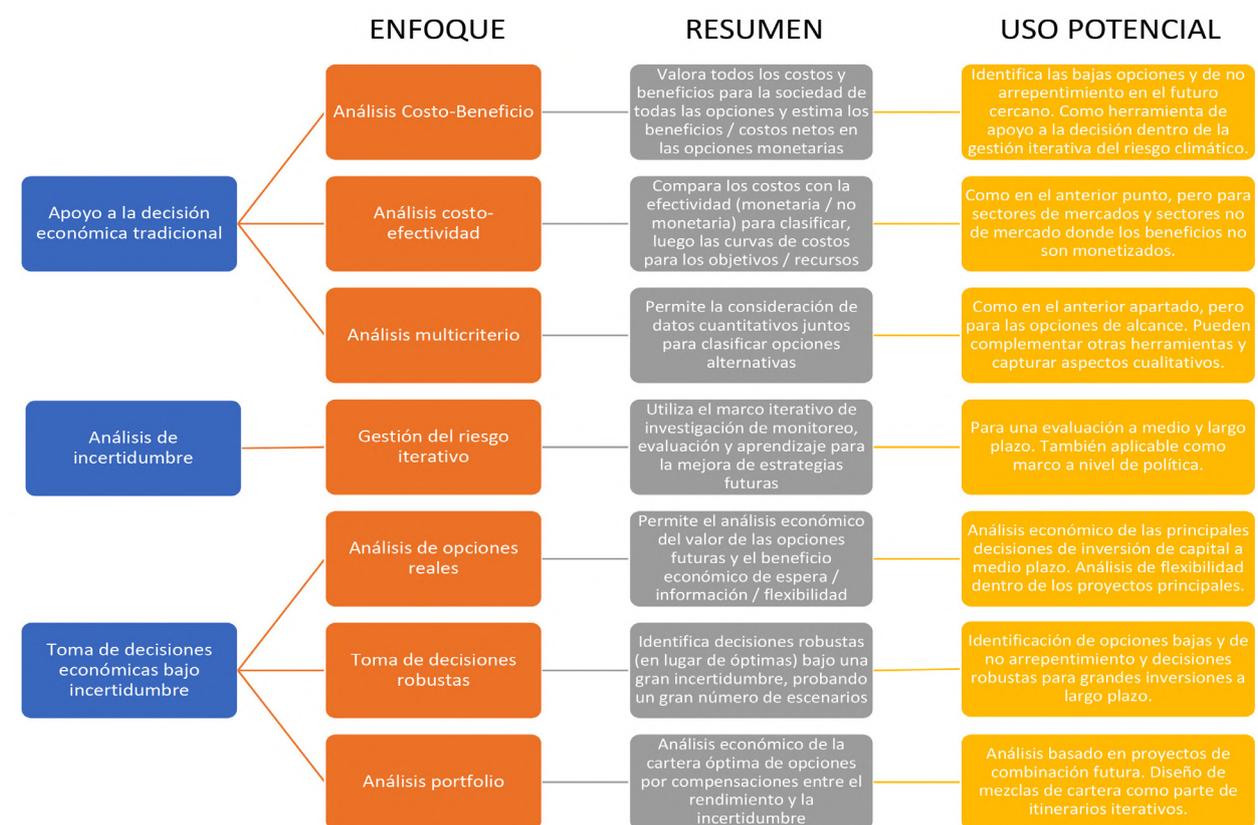
Con esta actuación se cierra el ciclo propuesto, que puede ser repetido al revisar los objetivos, reevaluar los riesgos, definir nuevas medidas, etc.

7.2 Técnicas de valoración de las medidas de adaptación

En el apartado anterior se ha descrito el proceso para planificar e implementar las medidas en el marco de un proceso de adaptación de la infraestructura al cambio climático. Este proceso comprende diversas etapas, pero una de las decisiones clave del mismo es la selección de las medidas más adecuadas. Para ello, existen diferentes técnicas, con ventajas e inconvenientes, y cuya aplicación requiere de diferentes niveles de información y recursos para su aplicación. Como en otros apartados de esta guía no es posible indicar una única técnica como la más adecuada a seguir por todos los proyectos a la hora de seleccionar las medidas y a continuación se exponen las principales opciones.

La siguiente tabla resume los principales grupos de herramientas económicas y su posible uso.

➤ **Figura 59:** Herramientas económicas y posibles usos



➤ Fuente: basado en *Econadapt Toolbox*.(127)

Dentro de estas opciones cabe destacar por su amplia aplicación las técnicas “tradicionales” como son el análisis costo-beneficio, costo efectividad y multicriterio. Para el análisis que se centra en la variabilidad climática actual (el déficit de adaptación) más que en el cambio climático, estas herramientas de apoyo a la toma de decisión han sido ampliamente aplicadas. El análisis costo-beneficio y el análisis costo efectividad valoran las medidas potenciales en términos económicos, lo que supone una gran ventaja de cara a las decisiones que implica su implementación. Sin embargo, como las medidas de adaptación a menudo se realizan en áreas que son difíciles de evaluar, y generalmente implican una falta de información cuantitativa, a menudo se utiliza el análisis multicriterio. Las dos primeras engranan muy bien con un análisis de riesgos climáticos cuantitativo, mientras que esta última presenta ventajas para ser acoplada a un análisis de tipo cualitativo.

No obstante, frente a estas técnicas, ampliamente aplicadas en todos los ámbitos, para el análisis de opciones de adaptación existen algunas herramientas de apoyo a la toma de decisiones relativamente novedosas y específicas que, si bien no son tan ampliamente aplicadas, presentan ciertas ventajas. Por ejemplo, la toma de decisiones robusta tiene una amplia aplicación para evaluar tanto en períodos de tiempo actuales como futuros; decisiones a corto plazo con largos tiempos de vida y desafíos a más largo plazo (como suele ser el caso de la selección de medidas de adaptación al cambio climático). Cuando las inversiones están a un plazo más próximo (especialmente las inversiones irreversibles de capital adelantado) y cuando existe un déficit de adaptación (p.ej. cuando el clima ya está afectando negativamente el sistema sobre el que nos planteamos intervenir con inundaciones, etc.), el Análisis de opciones reales es una herramienta potencialmente muy útil. En cambio, para aplicaciones a largo plazo en condiciones de déficit de adaptación, pero de menor gravedad, la Administración de riesgos iterativos puede ser más aplicable, al permitir ir “ensayando” el efecto de las medidas.

La siguiente tabla compara la fortaleza y debilidad de cada método, pero hay que tener en cuenta que no existen reglas rígidas sobre qué herramienta usar en cada momento y que es importante seleccionar cuidadosamente el enfoque más apropiado para cada proyecto individual.

Figura 60: Comparativa de fortalezas y debilidades de diferentes métodos de valoración de medidas

Métodos	Fortalezas	Retos	Incertidumbres
Análisis costo-beneficio	El más útil cuando las probabilidades de riesgo climático son conocidas y la sensibilidad es baja. También se utiliza cuando los valores de mercado son claros.	Valoración de sectores no de mercado / opciones no técnicas. La incertidumbre está limitada a riesgos probabilísticos / pruebas de sensibilidad	No lidia explícitamente con la incertidumbre, pero puede combinar con las pruebas de sensibilidad y modelos probabilísticos
Análisis costo-efectividad	Como en el anterior, pero para sectores no monetarios y donde los objetivos predefinidos tienen que ser alcanzados.	La métrica de título único es difícil de identificar y menos adecuada para riesgos complejos o intersectoriales. Baja consideración de la incertidumbre.	Como en el punto anterior
Análisis multicriterio	Cuando hay una mezcla de datos cuantitativos y cualitativos.	Se basa en el juicio de expertos o partes interesadas e incluye el análisis de la incertidumbre.	Puede integrar incertidumbre como criterio de medida, sin embargo normalmente se confía en la subjetividad del juicio experto o en la opinión de los accionistas
Gestión del riesgo iterativo	Útil en los desafíos a largo plazo e inciertos, especialmente cuando los umbrales de riesgo son elevados.	Complejo de aplicar cuando hay riesgos múltiples que actúan juntos y los umbrales no siempre son fáciles de identificar.	Lidia explícitamente con la incertidumbre promoviendo el análisis iterativo, monitorizado, evaluación y aprendizaje.
Análisis de opciones reales	Grandes decisiones irreversibles, donde la información está disponible sobre las probabilidades de riesgo climático.	Requiere valoración económica, probabilidades y puntos de decisiones claros	Lidia explícitamente con la incertidumbre analizando el rendimiento de adaptación para diferentes futuros potenciales
Toma de decisiones robustas	Cuando la incertidumbre es grande puede usar una combinación de información cuantitativa y cualitativa.	Análisis computacional alto y largo número de operaciones.	Como en el punto anterior
Análisis portfolio	Cuando el número de acciones de adaptación complementaria y buena información.	Requiere datos económicos y probabilidades. Son importantes las cuestiones de interdependencia.	Lidia explícitamente con la incertidumbre examinando las opciones complementarias a la adaptación para lidiar con el clima futuro

Fuente: basado en *Econdapt Toolbox* (127)

La adaptación es un proceso dinámico, el cual comienza con la consideración de la variabilidad climática actual y considera el futuro cambio climático a lo largo de un largo periodo del tiempo. El tratamiento efectivo de las incertidumbres asociadas en los múltiples horizontes temporales es un componente crítico en la toma de decisiones de adaptación. A continuación, se muestra un itinerario de decisiones donde se exponen los rangos de métodos que pueden utilizarse para tener en cuenta estas dimensiones y apoyar la toma de decisiones de adaptación.

► **Tabla 49:** Métodos de toma de decisiones de adaptación

Métodos	Muy adecuado para	Comúnmente utilizado en	Incertidumbre
Análisis costo- beneficio	<ul style="list-style-type: none"> •Opciones bajas y sin arrepentimiento en el futuro cercano. •Donde se pueden usar valores de mercado claros. 	<ul style="list-style-type: none"> •Agricultura. •Silvicultura. •Energía. •Agua y gestión costera. •Transporte. 	<ul style="list-style-type: none"> •No trata explícitamente con la incertidumbre. •Se puede combinar con pruebas de sensibilidad y modelos probabilísticos.
Análisis costo-efectividad	<ul style="list-style-type: none"> •Adaptación a corto plazo •Donde los beneficios deben ser examinados en términos no monetarios. •Donde se deben alcanzar objetivos predefinidos. 	<ul style="list-style-type: none"> •Salud. •Protección civil. •Protección de la biodiversidad. 	<ul style="list-style-type: none"> •No trata explícitamente con la incertidumbre. •Se puede combinar con pruebas de sensibilidad y modelos probabilísticos.
Análisis de opciones reales	<ul style="list-style-type: none"> •La evaluación de grandes inversiones de capital a mediano plazo. •Donde la información sobre las probabilidades de riesgo climático está disponible. •Cuando futuros cambios en la operación son posibles. 	<ul style="list-style-type: none"> •Construcción. •Planes regionales. •Energía. •Silvicultura. •Agricultura. 	<ul style="list-style-type: none"> •Trata explícitamente con la incertidumbre mediante el análisis del rendimiento de la adaptación para diferentes futuros potenciales.
Toma de decisiones robustas	<ul style="list-style-type: none"> •La evaluación de las inversiones a largo plazo. •Donde existen grandes incertidumbres. •Donde se debe considerar una combinación de información cuantitativa y cualitativa. 	<ul style="list-style-type: none"> •Gestión del agua. •Gestión costera. •Agricultura. •Energía. •Salud. •Construcción. •Protección civil. 	<ul style="list-style-type: none"> •Tratos explícitamente con incertidumbre. •Analiza el rendimiento de la adaptación para diferentes futuros potenciales.
Gestión del riesgo iterativo/ Gestión adaptativa	<ul style="list-style-type: none"> •Evaluación de políticas a mediano y largo plazo. •Cuando hay umbrales de riesgo claros. 	<ul style="list-style-type: none"> •Gestión del agua. •Gestión costera. •Agricultura. •Salud. •Silvicultura. 	<ul style="list-style-type: none"> •Tratos explícitamente con incertidumbre. •Promueve el análisis iterativo, monitoreo, evaluación y aprendizaje.
Análisis de cartera	<ul style="list-style-type: none"> •Cuando es posible una cantidad de acciones de adaptación complementarias. •Cuando existe una buena información económica y climática. 	<ul style="list-style-type: none"> •Gestión del agua. •Gestión costera. •Silvicultura. •Salud. •Pesca. •Agricultura. •Protección de la biodiversidad. 	<ul style="list-style-type: none"> •Tratos explícitamente con incertidumbre. •Examina la complementariedad de las opciones de adaptación para hacer frente a climas futuros.
Análisis multicriterio	<ul style="list-style-type: none"> •Opciones de alcance. •Donde se debe considerar una combinación de datos cuantitativos y cualitativos. 	<ul style="list-style-type: none"> •Gestión del agua. •Gestión costera. •Agricultura. •Protección de la biodiversidad. 	<ul style="list-style-type: none"> •Puede integrar la incertidumbre como un criterio de evaluación. •Se basa en el juicio experto subjetivo o la opinión de los interesados.

► **Fuente:** basado en *Econadapt Toolbox* (127) (131)

Tras describir comparativamente los diferentes métodos, a continuación, se expone brevemente algunos de los mismos y ciertas pautas para aplicar los mismos en el análisis de medidas.

7.2.1 Análisis costo-beneficio

El análisis de costo-beneficio determina la eficiencia económica de un proyecto o política comparando el valor actual neto de los costos de planificación, preparando e implementando la intervención de adaptación con sus beneficios. Los beneficios están relacionados con los costos de daños evitados donde los costos y los beneficios se expresan en términos económicos explícitos. Lo que da la oportunidad de promover medidas de adaptación racionales, pero siempre optimiza las opciones de adaptación contra el conjunto de impactos más probable. Si se va a utilizar el análisis de costo-beneficio es recomendable considerar:

- múltiples categorías de daños.
- la monetización de daños no monetarios necesita la aplicación de enfoques específicos.
- A menudo, la adaptación puede traer co-beneficios que no deben pasarse por alto.

7.2.2 Análisis costo-efectividad

El análisis de costo-efectividad permite que los beneficios se valoren por la cuantificación en términos físicos (no monetarios) y es útil para comparar diferentes medidas de adaptación y poder elegir la más rentable. A nivel de proyecto, mediante el uso de curvas de costos marginales de reducción, ayuda en la determinación del orden de las medidas para alcanzar la opción más rentable.

7.2.3 Análisis de opciones reales

Desde la perspectiva de la adaptación climática, se puede entender como una “opción real”, la posibilidad o derecho para realizar, ampliar o abandonar una inversión o actuación. De este modo, cada opción real puede corresponderse con una medida de adaptación. Este tipo de análisis se aborda desde un planteamiento de libertad de selección de las mismas, y busca establecer el valor futuro de cada opción.

El análisis de opciones reales se puede utilizar para obtener información sobre los riesgos asociados con la inversión en activos físicos (reales). Es útil para considerar cuándo invertir en una medida a lo largo del tiempo en respuesta a eventos cambiantes y proporciona un análisis económico del valor de la flexibilidad y el aprendizaje futuro, distinguiéndose de los enfoques de análisis económico más tradicionales y más deterministas.

En su aplicación pueden emplearse diferentes metodologías binomiales, de simulación, etc.

7.2.4 Toma de decisiones robustas

La toma de decisiones robustas se basa en la “robustez” para analizar la eficacia de una medida de adaptación(132). Es un método alternativo a los métodos de evaluación económica más tradicionales, ya que lo que pretende es minimizar el arrepentimiento, en lugar de maximizar la utilidad esperada.

La toma de decisiones robustas puede ayudar a integrar múltiples fuentes de incertidumbres, derivadas del clima futuro y condiciones socioeconómicas, en el análisis del rendimiento de las opciones de adaptación.

7.2.5 Gestión del riesgo iterativo/Gestión adaptativa

La gestión de riesgos iterativos se basa en la idea de que las decisiones actuales están esencialmente limitadas por el conocimiento imperfecto y el sesgo cognitivo y, por lo tanto, es necesario un proceso de monitoreo, investigación, evaluación y aprendizaje para mejorar las estrategias de gestión futuras.

7.2.6 Análisis de cartera

El análisis de cartera ayuda a valorar diferentes medidas de adaptación en lugar de basarse en una sola, analizando los riesgos y los beneficios de varias estrategias. En el contexto de la adaptación, el riesgo se relaciona con la incertidumbre de los escenarios climáticos futuros: es deseable seleccionar una estrategia que funcione bien en un rango de futuros plausibles e identificar un grupo de estrategias que coincidan con esa preferencia.

7.2.7 Análisis multicriterio

El análisis multicriterio proporciona un enfoque sistemático para clasificar las opciones de adaptación en función de un rango de criterios de decisión. Los criterios pueden ponderarse para reflejar la importancia relativa de cada uno de ellos, y la suma de las ponderaciones se usa para clasificar las opciones. A diferencia del análisis costo-beneficio, el análisis multicriterio permite la consideración de datos cuantitativos y cualitativos en el ranking de opciones, como pueden ser la viabilidad, equidad, la urgencia, los beneficios colaterales, etc.

7.3 Propuesta de medidas tipo

En este apartado, se expone una batería de medidas de aplicación sectorial destinada a controlar los riesgos climáticos con el objetivo de proporcionar al lector las herramientas para analizar qué opciones se pueden considerar para contrarrestar el riesgo climático esperado y garantizar el éxito de implementación del proyecto de infraestructura analizado, así como su sustentabilidad a mediano y largo plazo.

7.3.1 Energía solar

Como se expone en los apartados anteriores, la energía solar fotovoltaica se puede ver afectada por el aumento de las temperaturas medias, cambios en la radiación (p.ej. por aumento de la capa de nubes) y viento (que refrigera las celdas) e incremento de los eventos extremos. Un proyecto de energía fotovoltaica es un proyecto relativamente simple en comparación con el resto de los proyectos que se exponen en esta guía. Por ello las opciones de adaptación se encuentran limitadas a los límites del proyecto.

Lógicamente, la opción de adaptación más directa será emplear los paneles y resto de componentes con las máximas eficiencias y rendimientos posibles, y adecuados a las condiciones climáticas locales (teniendo en cuenta las tendencias anteriormente comentadas). Aparte de este planteamiento, existen algunas opciones que cabe comentar:

- El uso de un seguidor solar combinado con un microcontrolador aumenta el rendimiento de aprovechamiento del recurso y reduce la necesidad de aumentar el número de placas. Los seguidores solares pueden ser de dos ejes o de uno.
- Especificar y normativizar el cableado y los componentes a utilizar en condiciones de alta humedad e inundación.
- En las zonas secas en las que la acumulación de polvo y arena pueda llegar a ser un problema, es aconsejable, por un lado, seleccionar el ángulo de inclinación apropiado para evitar en lo posible su acumulación y ayudar a su limpieza por la lluvia y, por otro lado, considerar en su caso sistemas de limpieza adicionales.
- Si se espera un incremento en las nevadas, es importante usar estructuras que eviten la acumulación de nieve y asegurarse de dejar espacio libre entre paneles para que la nieve pueda deslizarse y acumularse fuera de los paneles.
- Si se espera que la radiación solar sea más difusa, se pueden utilizar paneles fotovoltaicos con células de superficie rugosa que permitan un ángulo de inclinación apropiado.
- Si se esperan cambios rápidos en la cobertura de nubes, para mejorar la estabilidad e incrementar la potencia de salida se pueden instalar micro-inversores en vez de un único inversor centralizado.
- Para hacer frente al aumento de eventos extremos, será necesario el diseño adecuado de la estructura, el refuerzo de anclajes y tener en cuenta que la instalación de sistemas de seguimiento solar puede no ser aconsejable por tratarse de sistemas más complejos, generalmente menos resistentes y más costosos de reparar.
- Ante previsiones de aumento importante de la temperatura, realizar un diseño que favorezca un mayor flujo de aire debajo de la estructura de montaje para enfriarse.

No siendo el foco de esta guía, cabe mencionar que, en el caso de las instalaciones de concentración solar, las opciones son totalmente diferentes. Existen desarrollos tecnológicos que pueden contribuir a la adaptación. Gracias al aumento de la temperatura en el colector, todavía hay margen para mejorar la eficiencia de conversión solar en electricidad. Se están desarrollando alternativas que permiten temperaturas de funcionamiento más elevadas para poder aumentar la eficiencia, mediante la utilización de fluidos de transferencia de calor o sales fundidas en vez de petróleo, ya que se esperan mejorar los valores de eficiencia en pico. Otra medida de adaptación al aumento de la temperatura puede ser requerir un mayor flujo de aire debajo de la estructura de montaje para enfriarse.

También para la energía solar térmica existen medidas específicas (por ejemplo, es conveniente optar por paneles de tubo de vacío en instalaciones de calefacción en zonas donde se espere un aumento de la temperatura ambiente, un incremento en la frecuencia de eventos extremos o una radiación solar más difusa).

7.3.2 Energía eólica

El sector eólico tiene retos adaptativos que tienen que ver tanto con el diseño de los propios parques y aerogeneradores como con la gestión de los parques para optimizar la generación en circunstancias cambiantes.

La consideración del cambio climático en el diseño y selección de ubicaciones de parques eólicos es aún incipiente, y lejos de convertirse en la práctica común en el sector, que sigue basando las decisiones en registros históricos y mediciones. No obstante, múltiples fuentes insisten en que los patrones de viento de los últimos años se están viendo alterados en amplias zonas (133) (134), por lo que se hace cada vez más necesario evaluar sus posibles efectos a la hora de seleccionar los emplazamientos.

El efecto del cambio climático sobre el recurso viento es sumamente variable, pero en muchas zonas es posible que se incrementen las fuertes rachas de viento, por lo que es recomendable optar por diseños capaces de hacer frente a mayores velocidades del viento (135). Es por tanto conveniente seguir apostando por la investigación para adaptar los diseños a las nuevas condiciones de viento, no solo a mayores velocidades, sino también a mayores frecuencias de ráfagas y más intensas y con cambios de dirección.

Antes situaciones de vientos más racheados, también el incremento del tamaño de las turbinas podría contribuir. Cuando más alta es la torre, las palas se ubican en un área de menor turbulencia y de mayor estabilidad en la velocidad de viento. Por lo tanto, las palas más largas aumentan el área de barrido y la energía generada. Debido a la menor resistencia aerodinámica y a la viscosidad del aire, se estima que el rendimiento de la turbina puede aumentar en un 30%.

Por otro lado, a mayor altura también se observan vientos más fuertes. Por ello, en aquellas ubicaciones en las que se espere una reducción de la intensidad del viento a lo largo de la vida útil de la instalación, es aconsejable analizar la posibilidad de instalar torres más altas para paliar en lo posible sus efectos.

Otra posibilidad sería la consideración de turbinas eólicas de eje vertical ya que pueden operar en un rango más amplio de velocidades de viento, ofrecen más producción por m² de área de terreno y son menos sensibles a los cambios rápidos en la dirección del viento.

En lo que respecta a la seguridad de la infraestructura, es aconsejable realizar una selección adecuada de turbinas y componentes y diseñar su operación teniendo en cuenta los eventos extremos que se proyecten durante la vida útil de la infraestructura: temperaturas extremas, vientos huracanados, grandes tormentas, etc.

Ante problemas de formación de hielo, se recomienda considerar la implementación de métodos de detección y sistemas que ayuden a reducir su formación (calentamiento de palas, pinturas especiales que evitan la formación de hielo, etc.).

7.3.3 Hidroenergía

Como se ha indicado en apartados anteriores, la generación hidroeléctrica se puede ver afectada, fundamentalmente, por los cambios en la precipitación, que se traducen en cambios del caudal, es decir, en el recurso que aprovecha esta fuente de energía.

Desde una concepción amplia, el sistema sobre el que se puede intervenir para mejorar la adaptación ante el cambio climático incluye tanto la infraestructura (embalse y conducciones, equipamiento electromecánico, etc.) como la cuenca aportante. A continuación, se describen las diferentes medidas de adaptación que se pueden realizar en cada uno de estos ámbitos.

Para evitar la llegada de sedimentos al embalse, se pueden realizar las siguientes medidas de adaptación en la **cuenca** de la central:

- Para evitar la erosión hidráulica y eólica de las laderas es necesaria la reforestación o restauración forestal de las laderas y de las riberas de los ríos.
- Hay que evitar la quema y tala de los árboles existentes.
- Crear nuevas áreas de protección es también una posibilidad.
- Es conveniente que se realicen técnicas de gestión sostenible de los suelos agro-ganaderos para que siempre se mantenga una cobertura vegetal que proteja el suelo.
- Estas técnicas implican tareas de concienciación, difusión, etc. La opción más adecuada para potenciarlas es la capacitación ambiental y/o especializada. Pero también existen muchas otras opciones como la creación de viveros, cesión de medios materiales y agronómicos, etc.
- La construcción de taludes, muros de retención en aquellos puntos del terreno que estén deforestadas ayudan a que los sedimentos se queden acumulados y no lleguen a la central.
- En general es necesario mejorar la gobernanza de cuenca para generar mecanismos que aúnen los esfuerzos de todos los agentes con responsabilidad e interés en la gestión sostenible de la cuenca.
- Un instrumento que puede ser muy valioso es la gestión y recuperación de áreas protegidas, en las que se puede plantear una intervención más directa y con mayor capacidad de acción.

Las medidas adaptativas que se pueden realizar **en la infraestructura** son:

- También, empleando las compuertas es posible tener un programa de vaciado del embalse para mantenerlo en las mejores condiciones frente a la acumulación de sedimentos.
- En las centrales hidroeléctricas con embalse es posible realizar operaciones de dragado del embalse, aunque generalmente son mucho más caras.
- Revisión del programa de control de avenidas y reservas para laminar fuertes caudales. Puede que el mismo esté sobredimensionado (reservando una capacidad de embalse excesiva ante previsible lluvias intensas) o, por el contrario, no sea suficiente en caso de que se incrementen las fuertes lluvias.
- Incremento de la potencia de diseño de la central (número y/o capacidad de las turbinas) en caso de que se plantee que en el futuro se incrementará el caudal medio (en amplias zonas, se espera un incremento de precipitaciones y caudales y el cambio climático puede ser una oportunidad más que una amenaza).
- Mejora de la operación de la central, incrementando la eficiencia de los diferentes equipos.
- Una mejora de la eficiencia de las turbinas/generadores se puede conseguir modificando la velocidad de giro de los grupos hidroeléctricos. Ya que así es posible adaptarse en mayor medida a las condiciones de operación de la central y mejorar el rendimiento de esta.
- Ampliación / modificación en los desrripadores/desarenadores.
- Rediseño, de los azudes y sistemas de captación.
- Alteraciones en el recubrimiento, estructura, etc. de las conducciones (tuberías a presión, canales, etc.), turbinas, etc. para hacer frente a un mayor desgaste por sedimentos.
- Replanteamiento de los embalses (crecimiento).
- Aumento del salto útil (generalmente una actuación muy compleja).
- Inclusión del cambio climático en los planes de monitorización y respuesta ante emergencias.
- Mejora del monitoreo hidrometeorológico de la cuenca aportante.
- Sistemas de alerta temprana: aviso de los vertimientos a las comunidades aguas abajo.
- Asociación de centrales (sistemas en cascada).
- Con carácter general, considerar el cambio climático en la ubicación y diseño de nuevas centrales.

7.3.4 Dotación de agua

Como se ha indicado en apartados anteriores, la dotación de agua se puede ver afectada por las altas temperaturas y los cambios en la precipitación. Y de la misma manera que pasaba en las centrales hidroeléctricas, en los sistemas de dotación de agua se puede intervenir tanto en la infraestructura (captaciones y conducciones) como en la cuenca aportante.

Las medidas de adaptación deben dirigirse a mantener tanto la cantidad como la calidad del recurso. A diferencia con los sistemas de generación eléctrica, en los sistemas de dotación de agua potable, también hay que tener en cuenta que debido a los cambios en la precipitación y en el flujo del agua, bajará la calidad del agua. El agua será más turbia, con niveles más altos de materia orgánica, de bacterias, virus y parásitos y niveles aumentados de pesticidas en lagos, ríos y arroyos.

En el apartado anterior ya se presentaban varias medidas que se pueden llevar a cabo en la cuenca aportante. Asimismo, para reducir la vulnerabilidad ante las sequías e inundaciones, una de las medidas de adaptación es mejorar y sostener los ecosistemas naturales, ya que los ecosistemas naturales bien conservados se recuperan más rápido después de un evento extremo que las zonas degradadas o altamente antropizadas.

El cambio en la precipitación o el tiempo de escorrentía, junto con el aumento de la temperatura y la desglaciación pueden disminuir la cantidad de agua disponible para consumo. Para hacerle frente, además del fomento de la eficiencia en el uso del agua, que ayudará a mantener el balance entre demanda y disponibilidad del agua, es necesaria la diversificación y habilitación de nuevas fuentes de cara a hacer frente a sequías prolongadas. Asimismo, es aconsejable realizar una correcta planificación desde la etapa de diseño, incluyendo reglas de operación de embalses que permitan optimizar la asignación del agua entre los diferentes usos del agua que compiten entre sí en momentos críticos de escasez. Otra medida de adaptación para combatir la sequía sería el aumento de la capacidad del almacenamiento del agua mediante:

- el aumento de la altura de la presa.
- la recuperación de acuíferos.
- la eliminación de los sedimentos acumulados en los embalses.

Por otro lado, la eficiencia en la distribución del agua a los usuarios finales es esencial. Es por ello importante

diseñar las redes de distribución de forma adecuada, limitando las pérdidas, teniendo en cuenta para ello tanto no solo las condiciones actuales sino también las condiciones futuras. Esto podrá condicionar el tendido de las redes, los materiales empleados, la planificación del mantenimiento, etc. Asimismo, en infraestructuras ya existentes, puede ser necesario realizar una rehabilitación de las redes e incrementar la frecuencia de las labores de mantenimiento.

Otra medida importante, es realizar la caracterización estocástica del agua de origen y asegurarse de que el agua almacenada no pierde calidad (por ejemplo, el aumento de la temperatura del agua podría causar la eutrofización y el crecimiento excesivo de las algas). Para ello es necesaria la monitorización y recogida de datos y, mediante su análisis, poder estudiar el impacto de los cambios del clima en el sistema hídrico. Asimismo, puede ser necesario desarrollar modelos para entender cambios en la calidad del agua que se podrían dar a futuro.

Otra forma de “contaminación” podría venir del mar. En las plantas que estén a la altura del nivel del mar, podría ser necesario implementar las barreras de intrusión de agua salada (como diques, rompeolas, arrecifes artificiales, humedales costeros, presas de baja altura a través de las rías, etc.) y recarga de acuíferos, para que el agua salada no se mezcle con el depósito de la planta de tratamiento. A la hora de construir nuevas infraestructuras (plantas de tratamiento, estaciones de bombeo, ...), priorizar para su ubicación zonas más elevadas para minimizar el riesgo de inundación y erosión costera.

En la misma línea, en zonas agrícolas, puede ser necesario proteger el agua de contaminantes procedentes de las tierras y actividades agrícolas. Para ello suelen emplearse franjas de vegetación (como árboles nativos, arbustos y arbustos nativos más pequeños) a lo largo de las orillas de los cursos de agua (lagos, ríos, arroyos, etc.).

En lo que respecta a los pozos, en caso de observarse riesgo alto de inundación (y la consiguiente contaminación del agua), se recomienda la introducción de medidas de protección, como son el sellado de pozos con una tapa protectora (como hormigón o arcilla) que se extiende varios metros por debajo de la superficie para proporcionar una barrera protectora para la parte superior del pozo.

Por otro lado, aunque su análisis detallado queda fuera del ámbito de este apartado, no conviene dejar sin mención la necesidad de gestionar adecuadamente la calidad del agua. Los sistemas actuales de tratamiento de agua podrían ser insuficientes y/o inadecuados si fuera necesario tratar mayores cantidades de agua y/o el agua procesada fuese de calidad menor a la esperada. Podrían requerirse en estos casos tecnologías y procedimientos más eficientes que traten mayores capacidades de agua con menos energía y mejorando, a su vez, su calidad:

- La optimización del sistema puede incluir sistemas automatizados conectados a sensores o la instalación de nuevos equipos (tuberías, tanques, bombas, filtros, etc.) para evitar fugas o tratamientos ineficientes.
- Los procesos de tratamiento convencionales podrían incluir tecnologías de tratamiento adicionales como la absorción por carbón activo granular (GAC).

7.3.5 Vial

A lo largo de la guía se ha hecho patente la fuerte relación existente entre la red de transporte terrestre y el clima, pudiendo darse en el futuro nuevos escenarios que afecten a este tipo de infraestructuras, siendo recomendable la implementación de medidas de adaptación para paliar sus efectos. En infraestructuras ya existentes, se podría optar por realizar una adaptación de una sola vez, que plantee una determinada actuación a largo plazo, o bien una gestión adaptativa que considere una adaptación incremental en sucesivas escalas de tiempo más o menos cortas (más flexible). En caso de nuevas infraestructuras, será necesario adaptar el diseño a unos potenciales escenarios climáticos futuros y, en función de su criticidad, construirlas ya adaptadas.

En cualquier caso, la larga vida útil de las infraestructuras y la incertidumbre asociada al clima futuro, recomiendan realizar análisis específicos para cada caso particular y considerar su costo beneficio a la hora de definir la estrategia de adaptación.

En función del tipo de amenaza y su impacto sobre la infraestructura, es posible enumerar una serie de medidas de adaptación, tal y como se recoge a continuación:

► **Tabla 50:** Medidas de adaptación al cambio climático en infraestructura vial

Amenaza		Tipo de infraestructura	Impacto	Medida de adaptación	
Temperatura	Incremento de temperatura y olas de calor.	Ferrocarriles	Pandeo de raíles.	Reducción de velocidad de circulación. Empleo de materiales menos sensibles. Cambio de normas de diseño.	
			Pandeo de la catenaria.	Mejora y modernización de equipos. Programación de paradas periódicas.	
			Calentamiento de estaciones y metros.	Incremento de sistemas de refrigeración.	
		Carreteras	Incremento de temperatura y olas de calor.	Deterioro del pavimento (grietas).	Cambios en la instrucción de pavimentos. Mezclas bituminosas más resistentes. Pavimentos rígidos, sobre todo de hormigón. Ligantes bituminosos transparentes. Incrementar la reflectancia (albedo). Mayor frecuencia de reposición. Cierre temporal de carreteras.
				Ablandamiento del asfalto y deformación.	Enfriamiento forzado con agua. Limitación temporal al tráfico pesado. Circulación de mercancías por la noche. Derivar tráfico pesado al tren o barco. Reducir la carga admisible por eje. Estudiar situación en países más cálidos.
				Deterioro de marcas viales (pintura).	Mayor frecuencia de pintado. Uso de pinturas más resistentes.
				Recalentamiento de motores	Modernización de la flota de vehículos. Programación de paradas periódicas.
				Fatiga de materiales.	Mayor frecuencia de reposición. Uso de materiales más resistentes.
				Deformación de puentes metálicos Expansión de juntas de puentes.	Adecuación de las normas de diseño. Modificación de puentes existentes. Limitaciones de paso o velocidad. Abandono de puentes.
	Daños por incendios forestales.			Incremento de medidas preventivas. Incremento de medios de extinción. Sustitución de zapatas en vagones.	
	Cambios de humedad y subsidencia.			Modificación plataforma (base/subbase). Desvíos de trazado.	
Mortandad en plantaciones.	Reposición de marras y resiembra. Sustitución de especies no adaptadas.				
Inviernos suaves	Carreteras		Menor frecuencia de hielo y nieve.	Menor uso de quitanieves. Maquinaria quitanieves multifuncional. Menor consumo de fundentes.	

Amenaza		Tipo de infraestructura	Impacto	Medida de adaptación
Tormentas	Tormentas eléctricas	Ferrocarriles	Sobretensión en subestaciones. Sobretensión en la catenaria.	Revisión de normas de diseño. Mejora de seguridad frente a incendios.
Viento	Vientos extremos	Ferrocarriles	Daños en la superestructura y catenaria.	Revisión de normas de diseño. Refuerzo de cimentaciones. Cambio de materiales en señalización. Mantenimiento de arbolado próximo.
		Carreteras	Daños en señalización y defensas.	
			Afección a la conducción.	Señalización de zonas de riesgo. Mayor señalización variable. Pantallas arbóreas.
		Ambas	Bloqueo por árboles.	Revisión periódica del arbolado y eliminación de pies y ramas muertas
			Sobreesfuerzo en pantallas acústicas.	Revisión de normas de diseño. Refuerzo de cimentaciones.
Precipitación	Precipitaciones extremas	Ferrocarriles	Fallos del equipamiento de vía.	Mayor frecuencia de mantenimiento. Cambio por equipos más resistentes
		Carreteras	Daños en pavimentos. Afección a la visibilidad.	Mayor frecuencia de reposición. Modificación de plataformas. Mayor señalización variable. Mayor empleo de pavimentos drenantes. Aumento del bombeo de la plataforma. Mejor conservación de marcas viales. Ampliación del drenaje transversal. Ampliación del drenaje longitudinal. Incremento de bombeo de la plataforma. Elevación de la rasante. Mayor limpieza de sistemas de drenaje.
		Ambas	Inundaciones.	
			Hundimientos.	Estabilización de terraplenes. Modificación plataforma (base/subbase). Muros de retención. Mejora de la vegetación en taludes. Cunetas de guarda en desmontes. Taludes más tendidos. Mallas en desmontes rocosos. Cambio de normas de obras de tierras.
			Desprendimientos y deslizamientos	
			Afección a la estabilidad de taludes.	

Amenaza		Tipo de infraestructura	Impacto	Medida de adaptación
			Descalce de puentes y viaductos.	Revisión de normas de diseño. Refuerzo de cimentaciones. Construcción de nuevos puentes. Abandono de puentes
			Colapso de puentes y viaductos.	
			Inundación de pasos inferiores.	Evitar pasos deprimidos sin desagüe. Pasos inferiores en pendiente. Diseño de bombeo y cunetas.
			Sobreesfuerzo en drenajes.	Sobredimensionamiento de drenajes. Mayor frecuencia de mantenimiento.
	Descenso en las precipitaciones	Ambas	Mortandad en plantaciones. Cambios de humedad y subsidencia.	Reposición de marras y resiembra. Sustitución de especies no adaptadas. Riego en zonas emblemáticas. Modificación plataforma (base/subbase). Desvíos de trazado.
Fenómenos costeros	Incremento del nivel del mar	Ambas	Inundación.	Elevación de la cota de la rasante. Reubicación de infraestructuras. Construcción de barreras contra oleaje. Construcción de drenajes adicionales.
	Marejadas ciclónicas	Ambas	Inundación.	
			Daños en infraestructuras y equipamiento	Mayor frecuencia de mantenimiento. Reubicación en zonas menos expuestas.
Erosión costera	Ambas	Desprendimientos y deslizamientos	Construcción de muros de defensa. Construcción de tramos en viaducto. Reubicación de infraestructuras.	

Nota: El detalle de las medidas presentadas puede consultarse en el documento “*Consideración del cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras lineales de transporte*” a través del enlace <http://e-spacio.uned.es/fez/view/tesisuned:ED-Pg-Ciencias-Aenriquez>.

Fuente: basado en “*Consideración del cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras lineales de transporte*”, de Álvaro Enríquez de Salamanca Sánchez-Cámara (136)

De manera general, la adaptación podría plantearse en tres situaciones diferentes: antes de que ocurra ningún impacto, concurrente con el fenómeno climático o después de un fenómeno adverso, como respuesta a él. Generalmente, la respuesta adaptativa suele producirse cuando se observa un incremento en la frecuencia de fenómenos adversos, dando lugar a un incremento del riesgo en la infraestructura y su vulnerabilidad. Además, cada tipo de medida requerirá de diferentes ámbitos temporales de implementación (corto, medio, largo plazo y medidas excepcionales⁸) y podrían localizarse en diferentes ámbitos espaciales, pudiendo realizarse en la infraestructura o su entorno próximo o abarcar niveles más amplios.

Es importante destacar que las medidas que se apliquen también podrían tener efectos sobre el medioambiente y agravar el cambio climático (la citada referencia (136) por emisión de gases de efecto invernadero (GEI describe estos efectos). Por ello, es necesario analizar sus posibles efectos y tenerlo en cuenta en la estrategia de adaptación.

⁸ Las medidas a corto plazo son las que deben adoptarse con frecuencia inferior a 5 años. Las de medio plazo son adoptadas con una frecuencia 5 a 15 años. Las medidas a largo plazo se adoptan con un plazo de 15 a 50 años. Las medidas excepcionales son adoptadas con un plazo mayor de 50 años, asociadas al desgaste o envejecimiento de materiales y a la proximidad del fin de su vida útil (136).

7.3.6 Áreas urbanas

Como se ha indicado en apartados anteriores, todas las ciudades harán frente a algún tipo de impacto climático. Las áreas urbanas pueden verse afectadas por el impacto del aumento de la temperatura global (tanto el aumento de días y noches más cálidas como las olas de calor o sequías), como por la subida del nivel del mar o el aumento de precipitaciones intensas y todos estos impactos repercutirán en la salud pública, la infraestructura o la gestión de recursos.

Las medidas de adaptación que se mencionan a continuación se han agrupado según el tipo de tecnología que se utiliza o la finalidad de la propia medida.

Dentro de las **soluciones basadas en la naturaleza**, hay medidas de muy diferente índole y la finalidad es actuar como regulador térmico o a través del proceso de evapotranspiración que refresca el aire. Para ello se pueden utilizar:

- cubiertas o tejados verdes (son tejados plantados con vegetación, tanto intensivos como extensivos).
- fachadas vegetales (vegetación en una fachada vertical de un edificio).
- parques periurbanos, jardines o huertos urbanos, anillos verdes (corredores verdes alrededor de las ciudades que mejoran la ventilación urbana).
- zonas verdes en torno de la infraestructura lineal de transporte.

Otra opción es aumentar los cuerpos de agua que pueden capturar el agua de tormentas y enfrían el microclima de los alrededores. En el caso de que no existan naturalmente en la ciudad es recomendable crearlos artificialmente. Algunos ejemplos son:

- los jardines de agua, lagos o estancos de retención.
- cubiertas o tejados azules.
- la restauración de humedales, ríos, arroyos o llanuras de inundación.

En relación a las **aguas grises** de la ciudad es necesario intentar aumentar el drenaje de la ciudad y poner medidas de protección en las zonas de posible inundación. Para ello se pueden utilizar:

- pavimentos de mayor permeabilidad.
- recoger las aguas pluviales mediante tanques de tormenta.
- la creación de balsas de laminación del agua, cuencas o zanjas de infiltración, canales de drenaje.
- proteger las zonas inundables con barreras de contención de inundaciones (incluye presas), tubos, container, barreras flexibles y rígidas temporales o barreras pasivas/automáticas preinstaladas.
- canales de aliviadero de crecidas fluviales.

En relación a la **eficiencia energética de los edificios**, las medidas de adaptación deben de mejorar el enfriamiento de los edificios mediante:

- el uso de tecnologías de enfriamiento pasivo.
- cubiertas o tejados fríos.
- fachadas frías, pavimentos fríos.
- elementos sombreadores o cubiertas de alto albedo (colores claros).

En las nuevas planificaciones urbanas para mejorar la ventilación de la ciudad se pueden crear zonas más sombrías y más ventiladas con:

- la altura de los edificios.
- la orientación de las calles ante la meteorología principal.
- la densidad de los edificios.

8 > Referencias



1. IPCC. WGII AR5 Technical Summary. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability [Internet]. Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5) [P. Aldunce, Omotto J.P., Raholijao N., Yasuhara K. (eds.)]; 2014. Disponible en: http://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5-TS_FGDall.pdf
2. International Organization for Standardization. ISO/Guide 73:2009(en) Risk management — Vocabulary [Internet]. 2009. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:guide:73:ed-1:en>
3. GIZ. The Vulnerability Sourcebook. Risk Supplement [Internet]. 2017 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: https://www.adaptationcommunity.net/?wpfb_dl=203
4. Rome, Erich, et al. IVAVIA. Guideline Impact and Vulnerability Analysis of Vital Infrastructures and built-up Areas [Internet]. 2018. Disponible en: http://www.resin-cities.eu/fileadmin/user_upload/IVAVIA_Guideline_v3_final_web.compressed.pdf
5. Senge PM. La Quinta Disciplina: El Arte y la Practica de la Organizacion Abierta al Aprendizaje [Internet]. Edición: 1. Argentina; México: Ediciones Granica, S.A.; 2012. 480 p. Disponible en: <https://www.univermedios.com/wp-content/uploads/2018/08/La-quinta-disciplina-Peter-Senge-.pdf>
6. GIZ, EURAC. Suplemento de Riesgo del Libro de la Vulnerabilidad. Guía sobre cómo aplicar el enfoque del Libro de la Vulnerabilidad con el nuevo concepto de riesgo climático del IE5 del IPCC. [Internet]. 2017. Disponible en: https://www.adaptationcommunity.net/wp-content/uploads/2019/02/GIZ_Risk-Supplement_Spanish.pdf
7. Gareth Harrison, Lucy Cradden, John P Chick. Preliminary Assessment of Climate Change Impacts on the UK Onshore Wind Energy Resource [Internet]. 2008 [citado 28 de marzo de 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/228662718_Preliminary_Assessment_of_Climate_Change_Impacts_on_the_UK_Onshore_Wind_Energy_Resource
8. Fundación Canal. Agua, energía y cambio climático. Tecnologías de generación eléctrica a partir de la disponibilidad de recursos hídricos en escenarios de cambio climático [Internet]. 2015. Disponible en: <http://www.fundacioncanal.com/libros-electronicos/agua-energia-cambio-climatico/index.html>
9. Rademaekers, Koen, Van der Laan, Jeroen. Investment needs for future adaptation measures in EU nuclear power plants and other electricity generation technologies due to effects of climate change [Internet]. 2011. Disponible en: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2011_03_eur24769-en.pdf
10. Carlos Tapia, Selma Guerreiro, Richard Dawson, Beñat Abajo, Chris Kilsby, Efen Feliu, et al. High level quantified assessment of key vulnerabilities and priority risks for urban areas in the EU [Internet]. 2015 oct [citado 28 de marzo de 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/293619546_High_level_quantified_assessment_of_key_vulnerabilities_and_priority_risks_for_urban_areas_in_the_EU/figures?lo=1
11. Hai-Min Lyu, et al. Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach. Sci Total Environ [Internet]. 2018;626:1012-25. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718301608?via%3Dihub>
12. Sanne Muisa, et al. Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: A probabilistic analysis using global data. Sci Total Environ [Internet]. 2015;538:445-57. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715305714>
13. Enríquez de Salamanca Sánchez-Cámara, Alvaro, Diaz-Sierra, Ruben, Martín-Aranda, Rosa M., Santos, Maria J. Environmental impacts of climate change adaptation. Environ Impact Assess Rev [Internet]. 2017;64:87-96. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/315443341_Environmental_impacts_of_climate_change_adaptation

14. European Financing Institutions Working Group on Adaptation to Climate Change. Integrating climate change information and adaptation in project development. Emerging Experience from Practitioners [Internet]. 2016 [citado 7 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://www.nib.int/filebank/a/1464860521/1aa02d50b0d-0a32744cc84e2a05b97a4/5497-2016_EUFI-WACC_experience_for_practitioners.pdf
15. Olsen R, Ayyub B, Walker D, Barros A, Medina M, S. Vinson T, et al. Adapting Infrastructure and Civil Engineering Practice to a Changing Climate. 2015.
16. European Commission. Guidelines for Project Managers: Making vulnerable investments climate resilient — Climate-ADAPT [Internet]. 2013 [citado 17 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/publications/guidelines-for-project-managers-making-vulnerable-investments-climate-resilient>
17. Wilby, Robert L., Dessai, Suraje. Robust adaptation to climate change. Weather [Internet]. 2010;65(7):180-5. Disponible en: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wea.543>
18. Dicovskiy Riobóo, Luis María. Estadística Básica [Internet]. 2008. Disponible en: http://frq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/2101/mod_resource/content/0/DEPOSITO_DE_MATERIALES/estadistica1_1_.pdf
19. Coles S, Pericchi LR, Sisson S. A fully probabilistic approach to extreme rainfall modeling. J Hydrol [Internet]. 1 de enero de 2003;273(1-4):35-50. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169402003530>
20. NOAA. Multivariate ENSO Index Version 2 [Internet]. 2019. Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>
21. NOAA. Historical El Niño / La Niña episodes (1950-present) [Internet]. Climate Prediction Centre: Cold & Warm Episodes by Season. [citado 27 de junio de 2019]. Disponible en: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
22. Detlef P. van Vuuren, Edmonds, J., Kainuma, M., et al. The representative concentration pathways: an overview. Clim Change [Internet]. 2011; Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0148-z>
23. IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014 p. 32. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
24. ENES. CMIP5 Models and Grid Resolution [Internet]. CMIP5 Models and Grid Resolution. 2016 [citado 30 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://portal.enes.org/data/enes-model-data/cmip5/resolution>
25. Giorgi, Filippo, Gutowski Jr., William J. Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. Annu Rev Environ Resour [Internet]. 2015;40(467-490). Disponible en: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-environ-102014-021217>
26. UCAR. Network Common Data Form (NetCDF) [Internet]. [citado 19 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>
27. World Meteorological Organization. Satellite Data Formats and Standards [Internet]. [citado 19 de agosto de 2019]. Disponible en: http://www.wmo.int/pages/prog/sat/formatsandstandards_en.php
28. Knutti R, Masson D, Gettelman A. Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there. Geophys Res Lett [Internet]. 2013 [citado 27 de junio de 2019];40(6):1194-9. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/grl.50256>
29. Maraun D, Wetterhall F, Ireson AM, Chandler RE, Kendon EJ, Widmann M, et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. Rev Geophys. 24 de septiembre de 2010;48(3):RG3003-34.

- 30.** Maraun D. Bias Correction, Quantile Mapping, and Downscaling: Revisiting the Inflation Issue. *J Clim.* marzo de 2013;26(6):2137-43.
- 31.** Maraun D, Widmann M, Gutiérrez JM, Kotlarski S, Chandler RE, Hertig E, et al. VALUE: A framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earths Future.* 1 de enero de 2015;3(1):1-14.
- 32.** Maraun D. Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review. *Curr Clim Change Rep.* 26 de octubre de 2016;1-10.
- 33.** Maraun D, Shepherd TG, Widmann M, Zappa G, Walton D, Gutiérrez JM, et al. Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nat Clim Change.* 2 de noviembre de 2017;7(11):664-773.
- 34.** Maraun D, Huth R, Gutiérrez JM, Martín DS, Dubrovsky M, Fischer A, et al. The VALUE perfect predictor experiment: evaluation of temporal variability. *Int J Climatol* [Internet]. 2017 [citado 10 de noviembre de 2018];0(0). Disponible en: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5222>
- 35.** Charron, I., et al. Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions [Internet]. 2016 [citado 10 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/Guidebook-2016.pdf>
- 36.** Yuan-Fong Su, et al. Bias Correction of MRI-WRF Dynamic Downscaling Datasets. *Terr Atmos Ocean Sci.* octubre de 2016;27(5):649-57.
- 37.** Akaike, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans Autom Control* [Internet]. diciembre de 1974;19(6):716-23. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-1694-0_16
- 38.** National Oceanic and Atmospheric Administration. National Oceanic and Atmospheric Administration [Internet]. [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://www.noaa.gov/>
- 39.** Jenner L. GPM - Global Precipitation Measurement [Internet]. NASA. 2015 [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: http://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/main/index.html
- 40.** Saha S, Moorthi S, Pan H-L, Wu X, Wang J, Nadiga S, et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull Am Meteorol Soc.* 23 de abril de 2010;91(8):1015-58.
- 41.** National Aeronautics and Space Administration. MERRA-2 [Internet]. [citado 27 de junio de 2019]. Disponible en: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>
- 42.** Guillory A. ERA5 [Internet]. ECMWF. 2017 [citado 27 de junio de 2019]. Disponible en: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>
- 43.** National Center for Atmospheric Research(Eds). Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) [Internet]. Climate Data. 2017 [citado 27 de junio de 2019]. Disponible en: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>
- 44.** ESRL. NCEP/NCAR Reanalysis 1: Summary [Internet]. NCEP/NCAR Reanalysis 1: Summary. [citado 9 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>
- 45.** Laboratorio Nacional Lawrence Livermore. CMIP5 - Overview [Internet]. [citado 30 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://cmip.llnl.gov/cmip5/>
- 46.** IPCC. IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,: Cambridge University Press,; 2014 p. 1-32.
- 47.** Earth System Grid Federation. ESGF Home Page [Internet]. [citado 30 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://esgf.llnl.gov/>
- 48.** World Climate Research Programme. CMIP Phase 6 [Internet]. CMIP Phase 6 (CMIP6). Disponible en: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>
- 49.** Varios autores. Cordex – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment [Internet]. [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: <http://www.cordex.org/>

- 50.** National Aeronautics and Space Administration. Advancing Research and Applications with NASA Climate Model Data [Internet]. NASA Climate Data Services. [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://www.nas.nasa.gov/SC14/demos/demo30.html>
- 51.** Copernicus Climate Change Service. The Climate Data Store [Internet]. [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: <https://climate.copernicus.eu/climate-data-store>
- 52.** IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Final Draft IPCC WGII AR5 [Internet]. 2014 p. 2593. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- 53.** IDEAM. 3ra Comunicación Cambio Climático - IDEAM [Internet]. 2017 [citado 23 de noviembre de 2018]. Disponible en: <http://www.cambioclimatico.gov.co/3ra-comunicacion-cambio-climatico>
- 54.** Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. Tercera Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático - Capítulo 3: Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones [Internet]. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación; 2016. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/sustentabilidad/cambioclimatico/comunicacionnacional/tercera/modelos>
- 55.** IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería Colombia. Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones– Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. [Internet]. 2015. Disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022964/documento_nacional_departamental.pdf
- 56.** IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería de Colombia. Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones - Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. [Internet]. 2015. Disponible en: <http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/escenarios-de-cambio-climatico-2015.pdf>
- 57.** Ministerio del Ambiente (Perú). El Perú y el Cambio Climático - Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático [Internet]. 2016. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/natc/pernc3.pdf>
- 58.** Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Fondo Mundial para el Medio Ambiente. Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela [Internet]. 2005. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/natc/vennc01.pdf>
- 59.** Ray, Patrick A., et al. Multidimensional stress test for hydropower investments facing climate, geophysical and financial uncertainty. *Glob Environ Change* [Internet]. 2017;48:168-81. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.013>
- 60.** Jorge Paz, Manuel del Jesus, Rafael Kelman, Salvador Navas, Lucas Okamura, Efrén Feliu. Vulnerabilidad al cambio climático y medidas de adaptación de los sistemas hidroeléctricos en los países andinos [Internet]. Banco Interamericano de Desarrollo; 2019. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/vulnerabilidad-al-cambio-climatico-y-medidas-de-adaptacion-de-los-sistemas-hidroelectricos-en-los>
- 61.** Shankar N. Chandramowli. Impact of Climate Change on Electricity Systems and Markets - A Review of Models and Forecasts. *Sustain Energy Technol Assess* [Internet]. 2014 [citado 3 de abril de 2019];5. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138813000805>
- 62.** Hdidouan D, Staffell I. The impact of climate change on the levelised cost of wind energy. *Renew Energy* [Internet]. 2017 [citado 9 de octubre de 2018];101:575-92. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116307856>
- 63.** Riahi, Keywan. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob Environ Change* [Internet]. 2017;42(January):153-68. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016300681?via%3Dihub>

- 64.** O'Neill, Brian C., et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. 2015; Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378015000060?via%3Dihub>
- 65.** IIASA Energy Program. SSP Database (Shared Socioeconomic Pathways) - Version 1.1 [Internet]. Disponible en: <https://tntcat.iiasa.ac.at/>
- 66.** Schwartz MW. Using niche models with climate projections to inform conservation management decisions. *Biol Conserv* [Internet]. 2012 [citado 26 de noviembre de 2018];155:149-56. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320712002807>
- 67.** Garcia RA, Cabeza M, Rahbek C, Araújo MB. Multiple Dimensions of Climate Change and Their Implications for Biodiversity. *Science* [Internet]. 2014 [citado 26 de noviembre de 2018];344(6183):1247579. Disponible en: <http://science.sciencemag.org/content/344/6183/1247579>
- 68.** Hughes L, Cawsey EM, Westoby M. Climatic Range Sizes of Eucalyptus Species in Relation to Future Climate Change. *Glob Ecol Biogeogr Lett* [Internet]. 1996 [citado 26 de noviembre de 2018];5(1):23-9. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/2997467>
- 69.** Ramirez-Villegas J, Salazar M, Jarvis A, Navarro-Racines CE. A way forward on adaptation to climate change in Colombian agriculture: perspectives towards 2050. *Clim Change* [Internet]. 1 de diciembre de 2012 [citado 26 de noviembre de 2018];115(3):611-28. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0500-y>
- 70.** Solano-Peralt, Mauricio. Estado actual de la energía solar fotovoltaica en Latinoamérica y el Caribe [Internet]. 2015. Disponible en: <http://expertosenred.olade.org/wp-content/uploads/sites/7/2015/04/ESTADO-ACTUAL-ENERGIA-SOLAR-LAC-ER.pdf>
- 71.** Roshen Tariq Ahmed Hamdi. Humidity impact on photovoltaic cells performance: A review. *Int J Recent Eng Res Dev IJRERD* [Internet]. 2018 [citado 20 de agosto de 2019];03(11):27-37. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/329425029_Humidity_impact_on_photovoltaic_cells_performance_A_review
- 72.** Julia A. Crook. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *ResearchGate* [Internet]. 2011 [citado 9 de octubre de 2018]; Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/255752213_Climate_change_impacts_on_future_photovoltaic_and_concentrated_solar_power_energy_output
- 73.** Seth B. Darling, Fengqi You, Fengqi You, Thomas Veselka. Assumptions and the levelized cost of energy for photovoltaics. *Energy Environ Sci* [Internet]. [citado 2 de abril de 2019]; Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/255748938_Assumptions_and_the_levelized_cost_of_energy_for_photovoltaics
- 74.** Jerez S, Tobin I, Vautard R, Montávez JP, López-Romero JM, Thais F, et al. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nat Commun* [Internet]. 2015 [citado 9 de octubre de 2018];6(1). Disponible en: <http://www.nature.com/articles/ncomms10014>
- 75.** Panagea IS, Tsanis IK, Koutroulis AG, Grilakis MG. Climate Change Impact on Photovoltaic Energy Output: The Case of Greece [Internet]. *Advances in Meteorology*. 2014 [citado 2 de abril de 2019]. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/amete/2014/264506/>
- 76.** K.Brunker, et al. A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. noviembre de 2011 [citado 2 de abril de 2019];15(9):4470-82. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/304090739_A_Review_of_Solar_Photo-voltaic_Levelized_Cost_of_Electricity
- 77.** The European Wind Energy Association. Wind Energy. The facts [Internet]. Disponible en: <https://www.wind-energy-the-facts.org/best-practice-for-accurate-wind-speed-measurements.html>
- 78.** Danish Wind Industry Association. Conceptos de energía eólica [Internet]. 2003 [citado 3 de diciembre de 2019]. Disponible en: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/unitsw.htm#roughness>

- 79.** Suad Hassan Danook. The impact of humidity on performance of wind turbine. 2019;14. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X19300589>
- 80.** Paredes, J. Energías renovables variables y su contribución a la seguridad energética: Complementariedad en Colombia [Internet]. 2017. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/publicacion/17221/energias-renovables-variables-y-su-contribucion-la-seguridad-energetica>
- 81.** Olauson, Jon. ERA5: The new champion of wind power modelling? *Renew Energy* [Internet]. 2018;126. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/320084119_ERA5_The_new_champion_of_wind_power_modelling
- 82.** Stadler S, Dryden JM, Greene JS. Climate Change Impacts on Oklahoma Wind Resources: Potential Energy Output Changes. *Resources* [Internet]. junio de 2015 [citado 2 de abril de 2019];4(2):203-26. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-9276/4/2/203>
- 83.** Tobin I, Vautard R, Balog I, Bréon F-M, Jerez S, Ruti P, et al. Assessing climate change impacts on European wind energy from ENSEMBLES high-resolution climate projections. *Clim Change* [Internet]. 2015;128(1-2):99-122. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/269468084_Assessing_climate_change_impacts_on_European_wind_energy_from_ENSEMBLES_high-resolution_climate_projections
- 84.** MacLeod D, Torralba V, Davis M, Doblas-Reyes F. Transforming climate model output to forecasts of wind power production: how much resolution is enough?: Transforming climate model output to wind power forecasts. *Meteorol Appl* [Internet]. 2018 [citado 2 de abril de 2019];25(1):1-10. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1002/met.1660>
- 85.** Alvarez Marivela, Nieves. Proyecto de diseño, construcción y explotación de un parque eólico [Internet]. 2009. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/190932972/PFC-Nieves-Alvarez-Marivela>
- 86.** Sara C Pryor, et al. Analyses of possible changes in intense and extreme wind speeds over Northern Europe under climate change scenarios. *Clim Dyn* [Internet]. 2012 [citado 26 de noviembre de 2018];38:189-208. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/227303071_Analyses_of_possible_changes_in_intense_and_extreme_wind_speeds_over_Northern_Europe_under_climate_change_scenarios
- 87.** Pryor SC, Barthelmie RJ. Climate change impacts on wind energy: A review. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 1 de enero de 2010 [citado 9 de octubre de 2018];14(1):430-7. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001713>
- 88.** Mölter T, Schindler D, Albrecht AT, Kohne U. Review on the Projections of Future Storminess over the North Atlantic European Region. *Atmosphere* [Internet]. abril de 2016 [citado 2 de abril de 2019];7(4):60. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4433/7/4/60>
- 89.** Holbein T. IEA Wind TCP Recommended Practice 13 2nd Edition: Wind Energy in Cold Climates. :49. Disponible en: <https://community.ieawind.org/publications/rp>
- 90.** Mohamed Abbes, Jamel Belhadj. Development of a methodology for wind energy estimation and wind park design. *J Renew Sustain Energy* [Internet]. 2014 [citado 2 de abril de 2019];6(053103). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/265685968_Development_of_a_methodology_for_wind_energy_estimation_and_wind_park_design
- 91.** Agencia Andaluza de la Energía. Guía técnica: Energía Minieólica [Internet]. 2011 [citado 2 de abril de 2019]. Disponible en: https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/guia_tecnica_energia_minieolica.pdf
- 92.** Nachtergaele FO, et al. Harmonized World Soil Database [Internet]. Harmonized World Soil Database. 2009 [citado 21 de agosto de 2019]. Disponible en: <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/8958/>
- 93.** International Food Policy Research Institute. Global high-resolution soil profile database for crop modeling applications [Internet]. [citado 27 de junio de 2019]. Disponible en: <http://www.ifpri.org/publication/global-high-resolution-soil-profile-database-crop-modeling-applications>

- 94.** Gayathri K.Devia, et al. A Review on Hydrological Models. *Aquat Procedia* [Internet]. 2015;4. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214241X15001273>
- 95.** Biswas, Asit K. Some thoughts on estimating spillway design flood. *Hydrol Sci J* [Internet]. 1971;16(4):63-72. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02626667109493786>
- 96.** Leslie, Jacques. In an Era of Extreme Weather, Concerns Grow Over Dam Safety [Internet]. 2019 [citado 8 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://e360.yale.edu/features/in-an-era-of-extreme-weather-concerns-grow-over-dam-safety>
- 97.** Le Page, Michael. The world's ageing dams are not built for ever more extreme weather [Internet]. 2019 [citado 8 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.newscientist.com/article/2212427-the-worlds-ageing-dams-are-not-built-for-ever-more-extreme-weather/>
- 98.** Hari Prasad Neopane. Sediment erosion in Hydro Turbines [Internet]. Norwegian University of Science and Technology (NTNU).; 2010. Disponible en: http://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/233519/326677_FULLTEXT01.pdf?sequence=1
- 99.** Biraj SinghThapa, BholaThapa, Ole G.Dahlhaug. Empirical modelling of sediment erosion in Francis turbines. *Energy* [Internet]. 2012;41(1):386-91. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212001806>
- 100.** Bajracharya, T.R., Acharya, B., Joshi, C.B., Saini, R.P., Dahlhaug, O.G. Sand erosion of Pelton turbine nozzles and buckets: A case study of Chilime Hydropower Plant. *Wear* [Internet]. 2008;264(3-4):177-84. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164807004279>
- 101.** Rai AKr, Kumar A. Analyzing hydro abrasive erosion in Kaplan turbine: A case study from India. *J Hydrodyn Ser B* [Internet]. 1 de octubre de 2016 [citado 8 de mayo de 2019];28(5):863-72. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100160581660687X>
- 102.** Lentini, Emilio. El futuro de los servicios de agua y saneamiento en América Latina. Desafíos de los operadores de áreas urbanas de más de 300.000 habitantes. [Internet]. Banco Interamericano de Desarrollo; 2015 [citado 22 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/publicacion/15452/el-futuro-de-los-servicios-de-agua-y-saneamiento-en-america-latina-desafios-de>
- 103.** McKee, T.B, et al. Eighth Conference on Applied Climatology. En Anaheim, California.; 1993. Disponible en: ccc.atmos.colostate.edu/relationshipofdroughtfrequency.pdf.
- 104.** Lloyd-Hughes, Benjamin, Saunders, Mark A. A drought climatology for Europe. *Int J Climatol* [Internet]. 17 de junio de 2002;22(13):1571-92. Disponible en: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/joc.846>
- 105.** Alexander, L.V, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Clim Dyn* [Internet]. 2006;111(D5). Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JD006290>
- 106.** Aiguo Dai. Drought Under Global Warming: A Review. *WIREs Clim Change* [Internet]. 2010;2(1):45-65. Disponible en: http://www.cgd.ucar.edu/cas/adai/papers/Dai-drought_WIRES2010.pdf
- 107.** Burke, Eleanor, Brown, Simon J. Evaluating Uncertainties in the Projection of Future Drought. *J Hydrometeorol* [Internet]. 2008;9(2):292-9. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/2007JHM929.1>
- 108.** Guerreiro, Selma, et al. Future heatwaves, droughts and floods in 571 European cities. *Environ Res Lett* [Internet]. 2018;13(3). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/323296484_Future_heat-waves_droughts_and_floods_in_571_European_cities
- 109.** Angelos N. Findikakis, Kamal El kadi Abderrezzak. Reservoir sedimentation: challenges and management strategies. *hydrolink* [Internet]. 2018;3/2018:66. Disponible en: <https://iahr.org/PDF/Journals/Hydrolink/2018%20issue3%20free%20access/Editorial.pdf>

- 110.** Ahmed Moustafa A. Moussa. Solving the problem of sedimentation at water intake of Rowd El-Farag pump station using 2D model. *Ain Shams Eng J* [Internet]. 2010;1(2):103-14. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447911000037>
- 111.** Peréa Serrano, Rodrigo Otávio, et al. Case study: Effects of sediment concentration on the wear of fluvial water pump impellers on Brazil's Acre River. *Wear* [Internet]. agosto de 2018;408–409(15):131-7. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164817317131?viewFullText=true>
- 112.** Zhengjing Shen, et al. Sediment erosion in the impeller of a double-suction centrifugal pump—A case study of the Jingtai Yellow River Irrigation Project, China. *Wear* [Internet]. 2019;269-79. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164818311657>
- 113.** Comisión Nacional del Agua (México). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos Para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado [Internet]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Desconocida [citado 22 de agosto de 2019]. Disponible en: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>
- 114.** Magalhaes, Antonio. Towards national drought policies in Latin America and the Caribbean Region. White paper. [Internet]. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD); 2018 [citado 23 de agosto de 2019]. Disponible en: https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2018-04/LAC_drought_white_paper_0.pdf
- 115.** Meza, Laura, Corso, Sandrine, Soza, Sebastián. Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile. Estudio Piloto sobre la Vulnerabilidad y la Gestión Local del Riesgo [Internet]. FAO; 2010. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-as447s.pdf>
- 116.** Reed, B., Shaw, R., Chatterton, K. Technical notes on drinking-water, sanitation and hygiene in emergencies. [Internet]. World Health Organization (WHO), Water, Engineering and Development Centre (WEDC); 2013 [citado 28 de agosto de 2019]. Disponible en: <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/1825>
- 117.** Torres-Navarro, Carlos Alonso, Malta-Callegari, Nelson, Arriagada-Vergara, Rocío, Rocio Arriagada-Vergara. Metodología para cuantificar costos de distribución de agua potable en zonas rurales. *Ing Ind* [Internet]. 2019 [citado 28 de agosto de 2019];40(1):88-96. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rii/v40n1/1815-5936-rii-40-01-88.pdf>
- 118.** European Environment Agency. Adaptation of transport to climate change in Europe [Internet]. 2014. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/adaptation-of-transport-to-climate>
- 119.** C40 Knowledge Hub. Reducing climate change impacts on mass transit [Internet]. 2019 [citado 11 de diciembre de 2019]. Disponible en: https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Reducing-climate-change-impacts-on-mass-transit?language=en_US
- 120.** RESIN-H2020 [Internet]. 2018. Disponible en: <http://www.resin-cities.eu>
- 121.** Agnew M., Goodess, C. RL11.2 Common Tools and Central Datasets: Developing a conceptual framework [Internet]. CIRCE project, <http://www.circeproject.eu/>; 2016 [citado 30 de noviembre de 2016]. Disponible en: https://cru-data.uea.ac.uk/projects/circe/concept_framework_2ndDRAFT.doc
- 122.** Gariano, Stefano Luigi. Landslides in a changing climate. *Earth-Sci Rev* [Internet]. 2016;162(Noviembre 2016):227-52. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825216302458?viewFullText=true>
- 123.** Escobar Potes, et al. Geotecnia para el trópico andino [Internet]. Universidad Nacional de Colombia; 2016. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/53560/>
- 124.** Crozier, M.J. Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. *Geomorphology* [Internet]. diciembre de 2010;124(3-4):260-7. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X10001881?via%3Dihub>

- 125.** Ouyang M. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliab Eng Syst Saf* [Internet]. enero de 2014 [citado 12 de noviembre de 2015];121:43-60. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832013002056>
- 126.** Michelle Davis. Power Failure. How Climate Change Puts Our Electricity at Risk and What We Can Do [Internet]. 2014 [citado 12 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://www.ucsusa.org/resources/power-failure>
- 127.** University of Bath et al. The ECONADAPT Toolbox - Economics for adaptation and decision-making [Internet]. [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://econadapt-toolbox.eu/>
- 128.** David N. Bresch, Lea Mueller. Climada: The open-source Economics of Climate Adaptation (ECA) tool | PreventionWeb.net [Internet]. [citado 9 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://github.com/davidnbresch/climada/wiki>
- 129.** The European Climate Adaptation Platform (Climate-ADAPT). The Urban Adaptation Support Tool [Internet]. 2019. Disponible en: <http://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/urban-ast/step-0-0>
- 130.** Marjolijn Haasnoot, et al. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Glob Environ Change* [Internet]. 2013;23(2):485-98. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095937801200146X>
- 131.** The ECONADAPT consortium. ECONADAPT Toolbox: Methods [Internet]. [citado 11 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://econadapt-toolbox.eu/methods>
- 132.** Kwakkel JH, Haasnoot M, Walker WE. Comparing Robust Decision-Making and Dynamic Adaptive Policy Pathways for model-based decision support under deep uncertainty. *Environ Model Softw* [Internet]. 1 de diciembre de 2016 [citado 18 de septiembre de 2018];86:168-83. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815216307186>
- 133.** Sherman, Peter, Chen, Xinyu, McElroy, Michael B. Wind-generated Electricity in China: Decreasing Potential, Inter-annual Variability and Association with Changing Climate *Scientific Reports* volume 7, Article number: 16294 (2017) | Download Citation. *Sci Rep* [Internet]. 2017;7. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-16073-2>
- 134.** Karnauskas, Kristopher B., et al. Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions. *Nat Geosci* [Internet]. 2017;11(2017):38-43. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41561-017-0029-9>
- 135.** International Energy Agency. Making the energy sector more resilient to climate change [Internet]. 2015. Disponible en: www.iea.org
- 136.** Enríquez de Salamanca Sánchez-Cámara Á. Consideración del cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras lineales de transporte. 2017 [citado 29 de agosto de 2019]; Disponible en: <http://e-spacio.uned.es/fez/view/tesisuned:ED-Pg-Ciencias-Aenriquez>
- 137.** IPCC. Annex II: Glossary In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. [Internet]. Geneva, Switzerland: IPCC; 2014 [citado 19 de julio de 2018]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_Glossary.pdf
- 138.** Feliu, E., García, G., Gutierrez, L., Abajo, B., Mendizabal, M., Tapia, C., et al. Guía para la elaboración de Planes Locales de Adaptación al Cambio Climático. Volumen II: Bloque 3. Herramientas y metodologías [Internet]. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid; 2015 [citado 26 de octubre de 2016]. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/guia_local_para_adaptacion_cambio_climatico_en_municipios_espanoles_vol_2_tcm7-430401.pdf

- 139.** IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014. 688 p.
- 140.** IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Internet]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014 [citado 28 de enero de 2016]. Disponible en: https://ipcc-wg2.gov/AR5/images/uploads/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf
- 141.** Naden, Clare. Building standards for the future we want [Internet]. 2018. Disponible en: <https://www.iso.org/news/ref2289.html>
- 142.** Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Connecting Biodiversity and Climate Change Mitigation and Adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change. [Internet]. Montreal; 2009 [citado 19 de julio de 2018] p. No. 41, 126 pages. (Technical Series). Disponible en: <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-41-en.pdf>
- 143.** International Organization for Standardization (ISO). Draft International Standard - ISO/DIS 14090. Adaptation to climate change. Principles, requirements and guidelines. 2018.
- 144.** GIZ. The Vulnerability Sourcebook. Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments [Internet]. 2014 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: https://www.adaptationcommunity.net/?wpfb_dl=203
- 145.** Lemos MC, Agrawal A, Eakin HC, Nelson, D.R., Engle NL, Johns O. Building Adaptive Capacity to Climate Change in Less Developed Countries [Internet]. In: G. R. Asrar and J. W. Hurrell (eds.). Climate Science for Serving Society: Research, Modeling and Prediction Priorities. Springer Netherlands. 2013 [citado 17 de julio de 2017]. pp. 437-457. Disponible en: https://library.wmo.int/pmb_ged/wcrp_2011-lemos.pdf
- 146.** IPCC. Informe Especial del IPCC sobre Uso de la Tierra, Cambio de Uso y Silvicultura [Internet]. 2000 [citado 20 de julio de 2018]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/srl-sp.pdf>
- 147.** IPCC, Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug T, Kruger, D., et al. Definitions and Methodological Options to Inventory Emissions from Direct Human-Induced Degradation of Forests and Devegetation of Other Vegetation Types. [Internet]. 2013 [citado 20 de julio de 2018]. Disponible en: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/Task2/Degradation_cover.pdf
- 148.** World Commission on Environment and Development. World Commission on Environment and Development, 1987 [Internet]. World Commission on Environment and Development; [citado 19 de julio de 2018]. Report No.: Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 1987. Disponible en: [http://www.exteriores.gob.es/Portal/es/PoliticaExteriorCooperacion/Desarrollosostenible/Documents/Informe%20Brundtland%20\(En%20ingl%C3%A9s\).pdf](http://www.exteriores.gob.es/Portal/es/PoliticaExteriorCooperacion/Desarrollosostenible/Documents/Informe%20Brundtland%20(En%20ingl%C3%A9s).pdf)
- 149.** Walter V. Reid, et al. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being [Internet]. Island Press (Washington, DC); 2005. Disponible en: <https://www.millenniumassessment.org/en/index.html>
- 150.** IPCC. Informe Especial del IPCC. Escenarios de Emisiones. Resumen para responsables de políticas. Informe especial del Grupo de trabajo III del IPCC [Internet]. 2000. Disponible en: <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>
- 151.** ISO. ISO DIS 14090 [Internet]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/68507.html>
- 152.** Anónimo. Período de retorno. En: Wikipedia, la enciclopedia libre [Internet]. 2018 [citado 20 de julio de 2018]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Per%C3%ADodo_de_retorno&oldid=107147166
- 153.** Annika E. Nilsson, Arctic Council. Arctic Resilience Interim Report 2013. [Internet]. Stockholm: Stockholm Environment Institute and Stockholm Resilience Centre; 2013 [citado 19 de julio de 2018]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/146098796/ArcticResilienceInterimReport2013-LowRes>

- 154.** Richard Moss, Mustafa Babiker, Sander Brinkman, Eduardo Calvo, Tim Carter, Jae Edmonds, Ismail Elgizouli, Seita Emori, Lin Erda, Kathy Hibbard, Roger Jones, Mikiko Kainuma, Jessica Kelleher, Jean Francois Lamarque, Martin Manning, Ben Matthews, Jerry Meehl, Leo Meyer, John Mitchell, Nebojsa Nakicenovic, Brian O'Neill, Ramon Pichs, Keywan Riahi, Steven Rose, Paul Runci, Ron Stouffer, Detlef van Vuuren, John Weyant, Tom Wilbanks, Jean Pascal van Ypersele, and Monika Zurek, 2008. Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies . Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 25 pp [Internet]. [citado 19 de julio de 2018]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-ts-scenarios.pdf>
- 155.** Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* [Internet]. 11 de febrero de 2010;463:747. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/nature08823>
- 156.** IPCC. Annex I: Glossary. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. [Internet]. IPCC; 2018. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_AnnexI_Glossary.pdf
- 157.** Swiss Re. Economics of Climate Adaptation | Swiss Re - Leading Global Reinsurer [Internet]. 2015 [citado 9 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://www.swissre.com/eca/>
- 158.** Hinkel, Jochen, Bharwani, Sukaina, Bisaró, Alexander, Carter, Timothy, Tracy Cull, Davis, Marion, et al. PROVIA Guidance on Assessing Vulnerability, Impacts and Adaptation to Climate Change | UNDP's Climate Change Adaptation Portal [Internet]. 2013 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: </resources/training-tools/provia-guidance-assessing-vulnerability-impacts-and-adaptation-climate>
- 159.** Universidad de Los Andes (Colombia). CAPRA. Probabilistic Risk Assessment Platform [Internet]. 2018 [citado 8 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://ecapra.org/>
- 160.** Partnership for Resilience and Preparedness (PREP). Visualizing data to build climate resilience [Internet]. 2016 [citado 8 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www.prepdata.org/>
- 161.** Agus Wibowo, Charlotte Morgan, Vivien Deparday, Tim Sutton. InaSAFE [Internet]. 2018 [citado 8 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://inasafe.org/>
- 162.** Hamden, Rohan, Mallon, Karl, Lamb, Jackie. XDI - Home [Internet]. [citado 8 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://xdi.systems/>
- 163.** UNFCCC. Cancun Adaptation Framework | United Nations System Chief Executives Board for Coordination [Internet]. [citado 10 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.unsystem.org/content/unfccc-cancun-adaptation-framework>
- 164.** Forzieri, Giovanni, Bianchi, Alessandra, Marín Herrera, Mario Alberto, Batista e Silva, Filipe, Feyen, Luc, Lavalle, Carlo. Resilience of large investments and critical infrastructures in Europe to climate change - EU Science Hub - European Commission [Internet]. EU Science Hub. 2015 [citado 5 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/resilience-large-investments-and-critical-infrastructures-europe-climate-change>
- 165.** Acclimatise, Four Twenty Seven, Climate Finance Advisors. Lenders guide for considering climate risk in infrastructure investments [Internet]. 2018 [citado 7 de septiembre de 2018]. Disponible en: http://www.adaptationlearning.net/sites/default/files/resource-files/Investment%20Guide_1.8%20single%20hi-q_17012018.pdf
- 166.** Luskova, Maria, Leitner, Bohus, Sventekova, Eva, Dvorak, Zdenek. Research of Extreme Weather Impact on Critical Infrastructure. 2018 [citado 7 de septiembre de 2018]; Disponible en: <http://bk.bgk.uni-obuda.hu/index.php/BK/article/view/19/16>

- 167.** European Commission. Climate Change and Major Projects. Outline of the climate change related requirements and guidance for major projects in the 2014-2020 programming period [Internet]. 2016 [citado 10 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/major_projects_en.pdf
- 168.** Mazzacurati et al. Four Twenty Seven y Acclimatise para el European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). Advancing TCFD Guidance on Physical climate Risks and opportunities [Internet]. 2018 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: http://427mt.com/wp-content/uploads/2018/05/EBRD-GCECA_final_report.pdf
- 169.** European Commission. Adapting infrastructure to climate change — Climate-ADAPT [Internet]. 2013 [citado 11 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/publications/adapting-infrastructure-to-climate-change>
- 170.** United Nations Development Programme. Paving the Way for Climate-Resilient Infrastructure: Guidance for Practitioners and Planners [Internet]. 2011 [citado 12 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://www.unclearn.org/sites/default/files/inventory/undp_paving_the_way.pdf
- 171.** Wilbanks TJ, Fernandez S, editores. Climate Change and Infrastructure, Urban Systems, and Vulnerabilities [Internet]. Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics; 2014 [citado 13 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://link.springer.com/10.5822/978-1-61091-556-4>
- 172.** USAID. Climate Risk Management for USAID Projects and Activities - A Mandatory Reference for ADS Chapter 201. 2017;25. Disponible en: <https://www.usaid.gov/ads/policy/200/201mal>
- 173.** Asian Development Bank. Climate Proofing: A Risk-based Approach to Adaptation. 2005;219. Disponible en: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/28796/climate-proofing.pdf>
- 174.** JASPERS Climate Change team. The Basics of Climate Change Adaptation, Vulnerability and Risk Assessment [Internet]. 2017 [citado 17 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.jaspersnetwork.org/plugins/servlet/documentRepository/displayDocumentDetails?documentId=381>
- 175.** UNFCCC. Assessing the Costs and Benefits of Adaptation Options. An Overview of Approaches. 2011.
- 176.** Grafakos, Stelios, Olivotto, Veronica. Choosing the right Adaptation Assessment Method. En 2012 [citado 18 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://docplayer.net/36742746-Choosing-the-right-adaptation-assessment-method.html>
- 177.** USAID. From Assessment to Implementation: Approaches for Adaptation Options Analysis [Internet]. 2013 [citado 18 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.climatelinks.org/resources/assessment-implementation-approaches-adaptation-options-analysis>
- 178.** Banco Interamericano de Desarrollo. Resumen ejecutivo de la Metodología de Evaluación del Riesgo de Desastres y Cambio Climático [Internet]. 2019. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/resumen-ejecutivo-de-la-metodologia-de-evaluacion-del-riesgo-de-desastres-y-cambio-climatico>
- 179.** CLIMsystems. Climate impact and adaptation software and services [Internet]. [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://www.climsystems.com/>
- 180.** Consorcio del proyecto RASOR. RASOR Platform [Internet]. [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://www.rasor.eu/rasor/>
- 181.** Cima Foundation, Athena Global, Acrotec, Sertit, Deltares, EUCentre, et al. RASOR Project [Internet]. [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://www.rasor-project.eu/>

- 182.** Ebinger J, Vergara W. Climate impacts on energy systems : key issues for energy sector adaptation [Internet]. The World Bank; 2011 [citado 10 de octubre de 2018] p. 1-224. Report No.: 60051. Disponible en: <http://documents.worldbank.org/curated/en/580481468331850839/Climate-impacts-on-energy-systems-key-issues-for-energy-sector-adaptation>
- 183.** Copernicus Climate Change Service. European Climatic Energy Mixes (ECEM) [Internet]. Disponible en: <http://ecem.wemcouncil.org/>
- 184.** Copernicus Climate Change Service. CLIM4ENERGY [Internet]. Disponible en: <http://c4e-visu.ipsl.upmc.fr/>
- 185.** European Climate Foundation (ECF), World Energy Council (Consejo Mundial de la Energía, WEC), Universidad de Cambridge. Cambio Climático: Implicaciones para el Sector Energético [Internet]. Disponible en: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/06/Publicacion-Cambio-Climatico-implicaciones-para-el-sector-energetico-IPCCC-AR5.pdf>
- 186.** IPIECA. Addressing adaptation in the oil and gas industry [Internet]. 2016. Disponible en: <http://www.ipieca.org/news/addressing-adaptation-in-the-oil-and-gas-industry/>
- 187.** Unidad de Planeación Minero Energética. Estudio para determinar la vulnerabilidad y las opciones de adaptación del sector energético colombiano frente al cambio climático. [Internet]. 2013 [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Documents/vulnerabilidad_opciones_adaptacion_sector_energetico_colombiano_frente_cambio_climatico.pdf
- 188.** IFC. Hydroelectric Power: A Guide for Developers and Investors [Internet]. 2015 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/Topics_Ext_Content/IFC_External_Corporate_Site/Sustainability-At-IFC/Publications/Hydroelectric_Power_A_Guide_for_Developers_and_Investors
- 189.** IFC-WBG. Environmental, Health, and Safety approaches for Hydropower projects. IFC-WBG. [Internet]. 2018 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/cefc36ec-9916-4ec4-b5ac-1d99602a3ef3/GPN_EHSHydropower.pdf?MOD=AJPERES
- 190.** Brown C, King J, Hughes J. Good Practice Handbook on Environmental Flows for Hydropower Projects. 2018.
- 190.** Jha AK, Bloch R, Lamond J. Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century. Washington, D.C: World Bank; 2012. 631 p.
- 190.** National Disaster Management Authority Government of India. National Disaster Management Guidelines. Management of floods [Internet]. 2008 [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://ndma.gov.in/images/guidelines/flood.pdf>
- 193.** Herron H, Roy S, Bohn B, Courtney C, Hoagland-Grey H. Addressing Climate Change within Disaster Risk Management: A Practical Guide for IDB Project Preparation [Internet]. Inter-American Development Bank; 2015 abr [citado 11 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://publications.iadb.org/handle/11319/6910>
- 194.** Defra / Environment Agency. Flood and Coastal Defence R&D Programme. R&D OUTPUTS: FLOOD RISKS TO PEOPLE. FD2321/TR2 Guidance Document [Internet]. 2006. Disponible en: http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=FD2321_3437_TRP.pdf
- 195.** IPCC. Scenario process for AR5 [Internet]. 2019 [citado 21 de agosto de 2018]. Disponible en: http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html
- 196.** Mauri S. Pelto. North Cascade Glacier Climate Project [Internet]. NORTH CASCADE GLACIER CLIMATE PROJECT. [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://glaciers.nichols.edu>
- 197.** Wild M, Folini D, Henschel F, Fischer N, Müller B. Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. Sol Energy [Internet]. 2015 [citado 9 de octubre de 2018];116:12-24. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X15001668>

- 198.** Müller B, Wild M, Driesse A, Behrens K. Rethinking solar resource assessments in the context of global dimming and brightening. *Sol Energy* [Internet]. 2014 [citado 9 de octubre de 2018];99:272-82. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13004933>
- 199.** Gaetani, Marco, Vignati, Elisabetta, Monforti, Fabio, Huld, Thomas, Dosio, Alessandro, Raes, Frank. Climate modelling and renewable energy resource assessment [Internet]. JRC; 2015 [citado 9 de octubre de 2018]. Disponible en: https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/reqno_jrc95440_reqno_jrc95440_renew_gaetani_report_2015_final.pdf
- 200.** Fant C, Adam Schlosser C, Strzepek K. The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa. *Appl Energy* [Internet]. 2016 [citado 9 de octubre de 2018];161:556-64. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915003268>
- 201.** Dierauf T, Growitz A, Kurtz S, Cruz JLB, Riley E, Hansen C. Weather-Corrected Performance Ratio [Internet]. 2013 [citado 9 de octubre de 2018]. Report No.: NREL/TP-5200-57991, 1078057. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/1078057/>
- 202.** Sailor DJ, Smith M, Hart M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. *Renew Energy* [Internet]. 1 de noviembre de 2008 [citado 9 de octubre de 2018];33(11):2393-406. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148108000141>
- 203.** Pereira de Lucena AF, Szklo AS, Schaeffer R, Dutra RM. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. *Renew Energy* [Internet]. 2010 [citado 9 de octubre de 2018];35(5):904-12. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109004480>
- 204.** World Bank. Hydropower Sector Climate Resilience Guidelines [Internet]. 2017 [citado 11 de septiembre de 2018]. Disponible en: https://www.hydropower.org/sites/default/files/hydropower_sector_climate_resilience_guidelines_-_beta_version.pdf
- 205.** Molly Hellmuth, et al. Addressing Climate Vulnerability for Power System Resilience and Energy Security: A Focus on Hydropower Resources [Internet]. USAID; 2017 [citado 25 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.climatelinks.org/resources/addressing-climate-vulnerability-power-system-resilience-and-energy-security-focus>
- 206.** Miralles F. Adaptación al Cambio Climático y Gestión de Riesgos [Internet]. CAF; 2015 [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/781>
- 207.** European Bank for Reconstruction and Development. Qairokkum Hydropower: Planning ahead for a changing climate [Internet]. 2014 [citado 10 de octubre de 2018]. Disponible en: https://www.climateinvestmentfunds.org/sites/cif_enc/files/knowledge-documents/cs_qairokkum_web_0.pdf
- 208.** Solaun K, Cerdá E, Solaun K, Cerdá E. The Impact of Climate Change on the Generation of Hydroelectric Power—A Case Study in Southern Spain. *Energies* [Internet]. 2017 [citado 10 de octubre de 2018];10(9):1343. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/9/1343>
- 209.** Ray, Patrick A. Confronting Climate Uncertainty in Water Resources Planning and Project Design: The Decision Tree Framework. [Internet]. World Bank; 2015. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22544>
- 210.** Kelly, C. Climate Risk Assessment Guide – Central Asia [Internet]. CAMO Alaroo; 2014 [citado 26 de marzo de 2019]. Disponible en: <https://cdkn.org/project/developing-integrated-climate-risk-assessment-for-cdd-planning-in-central-asia/>
- 211.** Abeyasinghe, A., et al. National adaptation plans; Understanding mandates and sharing experiences [Internet]. IIED; 2017 [citado 26 de marzo de 2019]. Disponible en: <http://pubs.iied.org/10180IIED/>
- 212.** Rene D. Garreaud, et al. Present-day South American Climate. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* [Internet]. octubre de 2009 [citado 12 de diciembre de 2019];281:3-4. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/266843458_Present-day_South_American_Climate

- 213.** Giesecke J, Mosonyi E. *Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb* [Internet]. 4.^a ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2005 [citado 13 de diciembre de 2018]. Disponible en: [//www.springer.com/de/book/9783540285618](https://www.springer.com/de/book/9783540285618)
- 214.** Zhang Z. *Pelton Turbines* [Internet]. Springer; 2016. 313 p. Disponible en: <https://www.springer.com/gp/book/9783319319087>
- 215.** Chiyembekezo S, Kaunda, et al. Potential of Small-Scale Hydropower for Electricity Generation in Sub-Saharan Africa. *Int Sch Res Netw Renew Energy* [Internet]. octubre de 2012;2012. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/258403445_Potential_of_Small-Scale_Hydropower_for_Electricity_Generation_in_Sub-Saharan_Africa
- 216.** United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology. Chapter 4: Storm rainfall depth and distribution. [Internet]. 2015. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/manage/hydrology/?cid=STEL-PRDB1043063>
- 217.** Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., Duffy, P. B. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrol Earth Syst Sci* [Internet]. 2012;16(9):3309-14. Disponible en: <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/3309/2012/>
- 218.** Taylor, K. E., R. J. Stouffer, G. A. Meehl. A summary of the CMIP5 experiment design. *Bull Am Meteorol Soc* [Internet]. 2007;93:485-498. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/253306617_A_Summary_of_the_CMIP5_experiment_design
- 219.** Gleckler, P.J., Taylor, K.E., Doutriaux, C. Performance metrics for climate models. *J Geophys Res Atmospheres* [Internet]. 2008;113(6). Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007JD008972>
- 220.** Coles, S., et al. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values* [Internet]. Springer-Verlag London; 2001. Disponible en: <https://www.springer.com/gp/book/9781852334598>
- 221.** Hannah Nissan, et al. On the use and misuse of climate change projections in international development. *WIREs Clim Change* [Internet]. 14 de marzo de 2019; Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wcc.579>
- 222.** Alejandro Di Luca. Challenges in the Quest for Added Value of Regional Climate Dynamical Downscaling. *Curr Clim Change Rep* [Internet]. 12 de febrero de 2015;1:10-21. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40641-015-0003-9>
- 223.** Reto Knutti. Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *J Clim* [Internet]. marzo de 2010; Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2009JCLI3361.1>
- 224.** Comisión Económica para América Latina y el Caribe. *La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe: una visión gráfica* [Internet]. CEPAL; 2009. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2974/1/S2010992_es.pdf
- 225.** Thrasher B, Maurer EP, McKellar C, Duffy PB. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrol Earth Syst Sci*. 2012;16(9):3309-14.
- 226.** US Army Corps of Engineers. HEC-HMS [Internet]. HEC-HMS. [citado 12 de diciembre de 2019]. Disponible en: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- 227.** Schneider PJ, Schauer BA. HAZUS-its development and its future. *Nat Hazards Rev*. 2006;7(2):40-4.
- 228.** ERN-LA. Vulnerabilidad de edificaciones e infraestructura. *Inf Téc ERN-CAPRA T1-5*. 2009;48.
- 229.** Jonkman SN, Vrijling JK, Vrouwenvelder ACWM. Methods for the estimation of loss of life due to floods: A literature review and a proposal for a new method. *Nat Hazards*. 2008;46(3):353-89.

230. Banco Interamericano de Desarrollo. Guía Metodológica Programa de Ciudades Emergentes y Sostenibles: Tercera edición [Internet]. 2016. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/guia-metodologica-programa-de-ciudades-emergentes-y-sostenibles-tercera-edicion>
231. Carta, J.A., et al. A review of measure-correlate-predict (MCP) methods used to estimate long-term wind characteristics at a target site. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2013;27(Noviembre 2013):362-400. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113004498>
232. CELEC EP – CORPORACIÓN ELÉCTRICA DEL ECUADOR. Project design document form for CDM project activities: Villonaco Windpower. [Internet]. 2014 [citado 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/T6QNGI9J10MVYU-CR87LDB2F54XWEOA>
233. Chang, T.P. Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. *Appl Energy* [Internet]. 88(1):272-82. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910002321>
234. Costa-Rocha, P.A., de Sousa, R.C., de Andrade, C.F., & da Silva, M.E.V. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. *Appl Energy* [Internet]. 2012;89(1):395-400. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.003>
235. Elliot, D.L. Adjustment and analysis of data for regional wind energy assessments. En: *Adjustment and analysis of data for regional wind energy assessments* [Internet]. Asheville, Nort Carolina, EEUU; 1979. Disponible en: No localizado en Internet
236. Goldwind-Australia. 1.5 MW PMDD Wind Turbine specifications. [Internet]. Sin fecha. Disponible en: http://www.goldwindaustralia.com/wp-content/uploads/Goldwind-Australia-1.5MW-Brochure-2017_opt.pdf
237. Gonçalves-Ageitos, M., Barrera-Escoda, A., Baldasano, J.M., Cunillera, J. Modelling wind resources in climate change scenarios in complex terrains. *Renew Energy* [Internet]. 2015;76:670-8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.066>

