



INFORME TÉCNICO

Informe de Adaptación al Cambio Climático del Sector Energético Español

Análisis de la influencia del cambio climático en la oferta y la
demanda de energía

D. Giuiliano Girardi, D. José Carlos Romero y Dr. Pedro Linares

Preparado por el IIT para la Oficina Española de Cambio
Climático/Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Noviembre de 2015

Versión: 1.0

Titularidad y responsabilidad

El derecho de autor corresponde a los miembros del equipo investigador, los cuales deberán ser citados en cualquier uso que se haga del resultado de su trabajo.

Conforme a los usos de la comunidad científica, las conclusiones y puntos de vista reflejados en los informes y resultados son los de sus autores y no comprometen ni obligan en modo alguno a la Universidad Pontificia Comillas ni a ninguno de sus Centros e Institutos o al resto de sus profesores e investigadores.

Por tanto, cualquier cita o referencia que se haga de este documento deberá siempre mencionar explícitamente el nombre de los autores, y en ningún caso mencionará exclusivamente a la Universidad.

Contenido

0. Resumen Ejecutivo.....	1
0.1. Introducción	1
0.2. Marco conceptual	3
0.3. Impactos en los sistemas energéticos.....	5
0.3.1. Impactos físicos.....	5
0.3.1.1. Cambios en la temperatura.....	5
0.3.1.2. Cambios en las precipitaciones	7
0.3.1.3. Eventos extremos.....	10
0.3.2. Impactos en el sistema energético.....	13
0.3.2.1. Impactos en la oferta	14
0.3.2.2. Impactos en la demanda	15
0.4. Caso español	16
0.4.1. Impactos en la oferta energética	17
0.4.1.1. Impactos vinculados a los usos del agua.....	17
0.4.1.2. Impactos en la producción fotovoltaica.....	19
0.4.1.3. Impactos en el potencial eólico.....	20
0.4.2. Impactos en la demanda de energía	21
0.5. Propuestas de adaptación.....	22
0.5.1. Medidas propuestas a nivel internacional	22
0.5.2. Medidas propuestas por los expertos para España	24
1. Introducción.....	28
2. Adaptación al cambio climático	31
2.1. Fuentes de información	31
2.1. Escenarios de cambio climático	36
2.2. El contexto energético español.....	39
3. Marco conceptual de la adaptación al cambio climático en el sector energético.....	49
3.1. El cambio climático y los impactos físicos.....	50
3.1.1. Los cambios de temperatura.....	51
3.1.2. Cambios en las precipitaciones	51
3.1.3. Eventos extremos.....	52

4. Proyecciones Futuras de impactos del cambio climático en los sistemas energéticos....53

4.1.	Impacto esperado en el agua	54
4.1.1.	Impactos en la criosfera	54
4.1.2.	Impactos en el nivel medio global del mar	61
4.1.3.	Impactos en los recursos hídricos	65
4.1.4.	Impactos en la evaporación	68
4.2.	Impacto esperado en los recursos energéticos.....	70
4.2.1.	Viento	71
4.2.2.	Bioenergía	74
4.2.3.	Olas y mareas	76
4.2.4.	Combustibles fósiles.....	77
4.2.5.	Recursos hidroeléctricos	77
4.3.	Impactos esperados en la demanda energética	82
4.3.1.	Impactos de los cambios de temperatura en la demanda de energía.....	83
4.3.1.1.	Demanda de calefacción y refrigeración en los edificios	83
4.3.1.1.1.	Calefacción	86
4.3.1.1.2.	Refrigeración	90
4.3.1.2.	Demanda de la industria	91
4.3.1.3.	Demanda Agricultura	92
4.3.2.	Impactos de los cambios de agua sobre la demanda de energía	92
4.4.	Impactos esperados en la oferta energética.....	94
4.4.1.	Impactos de los cambios de temperatura en la generación de energía	95
4.4.1.1.	Fotovoltaica	95
4.4.1.2.	Centrales térmicas.....	96
4.4.2.	Impactos de los cambios de temperatura en la transmisión y distribución de energía	97
4.4.3.	Impactos de los cambios de agua en el suministro de energía.....	97
4.4.4.	Impactos de los eventos extremos en el suministro de energía.....	97
4.4.4.1.	Centrales hidroeléctricas.....	98
4.4.4.2.	Energía eólica	98
4.4.4.3.	Centrales térmicas y nucleares	98
4.4.4.4.	Impactos en la red eléctrica	99

4.4.5.	Impactos de los cambios en los recursos energéticos sobre el suministro de energía	99
4.4.5.1.	Generación hidroeléctrica.....	99
4.4.5.2.	Generación eólica.....	100
4.4.5.3.	Generación de biocombustibles.....	101
4.4.5.4.	Generación fotovoltaica.....	101
4.4.6.	Interacciones entre políticas de mitigación y de adaptación.....	102
5.	Vulnerabilidades del sector energético al cambio climático	104
5.1.	Definición de vulnerabilidad	104
5.1.1.	Definición de vulnerabilidad para el IPCC	104
5.2.	La evaluación de vulnerabilidades	106
5.2.1.	Hidráulica	107
5.2.2.	Energía eólica	108
5.2.3.	Energía solar	109
5.2.4.	Biomasa y biocombustibles.....	109
5.2.5.	Olas y energía de las mareas	110
5.2.6.	Las centrales termoeléctricas.....	110
5.2.7.	Extracción, producción y refinado de combustibles fósiles	113
5.2.8.	Transmisión y distribución de energía	113
6.	Propuestas de adaptación del sector energético al cambio climático	115
6.1.	Capacidad de adaptación	115
6.2.	Diversificación en las medidas de adaptación	117
6.3.	Necesidades y opciones de adaptación	119
6.4.	Acciones de adaptación	120
6.4.1.	Adaptación de la oferta energética.....	120
6.4.1.1.	Hidráulica.....	120
6.4.1.2.	Energía eólica	122
6.4.1.3.	Energía solar	123
6.4.1.4.	Biomasa y biocombustibles.....	124
6.4.1.5.	Olas y energía de las mareas	125
6.4.1.6.	Plantas termoeléctricas (eficiencia de ciclo térmico, sistema de refrigeración, infraestructuras).....	126

6.4.1.7.	Extracción, producción y refinado de combustibles fósiles	128
6.4.1.8.	Transmisión, distribución y transferencia de energía	128
6.4.2.	Adaptación de la demanda energética	129
7.	Caso de estudio: Impacto del cambio climático sobre el sistema energético en España	131
7.1.	Los impactos físicos del cambio climático en España	133
7.1.1.	Escenarios de cambio climático regionalizados	133
7.1.2.	Impactos en temperaturas y precipitaciones.....	134
7.1.3.	Impactos en la escorrentía	138
7.1.4.	Impactos en las velocidades de viento.....	141
7.2.	Impactos en la oferta energética	143
7.2.1.	Impactos vinculados a los usos del agua.....	144
7.2.1.1.	Demanda de agua por tecnologías.....	144
7.2.1.2.	Disponibilidad de agua y capacidad de generación por demarcaciones hidrográficas.....	148
7.2.1.3.	Impacto en los usos y consumos de agua por los sistemas energéticos ..	150
7.2.2.	Impactos en la producción renovable.....	153
7.2.2.1.	Impactos en la producción fotovoltaica.....	153
7.2.2.2.	Impactos en el potencial eólico.....	155
7.3.	Impactos en la demanda de energía	156
8.	Propuestas de adaptación para el sector energético español	157
	Bibliografía.....	161
	ANEXO I. Cambio climático esperado, sus principales consecuencias y los impactos físicos	167
I.1	Cambios esperados en la temperatura	167
I.2.	Cambios esperados en las precipitaciones	173
I.3.	Cambios esperados en los eventos extremos	175
	ANEXO II. El concepto de vulnerabilidad e indicadores propuestos.	180
II.1	El marco conceptual de la vulnerabilidad	180
II.2.	Aproximaciones a la vulnerabilidad	182
II.3.	Vulnerabilidad al cambio climático y el debate acerca de la definición del IPCC	183
II.4.	Diferentes visiones sobre la vulnerabilidad	184
II.5.	La necesidad de una métrica para la vulnerabilidad.....	186

II.6. Indicadores de vulnerabilidad para el sector energético.....	186
II.6.1. Indicadores HELIO de vulnerabilidad	187
ANEXO III. Diagramas Sankey del sistema energético español	190
ANEXO IV. Distribución de la capacidad eléctrica instalada por demarcación hidrográfica y tecnologías.....	192
ANEXO V. Tablas resumen de impactos, vulnerabilidades y adaptación del sector energético al cambio climático	194

Índice de Tablas

Tabla 1: Variación interpolada de la esorrentía en escenarios de cambio climático (% media 2041-2070)	10
Tabla 2: Impactos de la temperatura sobre la oferta	14
Tabla 3: Impactos del agua sobre la oferta	14
Tabla 4: Impactos de los eventos extremos sobre la oferta	15
Tabla 5: Impactos de los recursos energéticos sobre la oferta.....	15
Tabla 6: Impactos de la temperatura sobre la demanda	16
Tabla 7: Usos y consumos de agua (en hm ³).....	18
Tabla 8: Demandas y consumos energéticos (en EJ).....	18
Tabla 9: Propuestas de adaptación al cambio climático en el sector energético español	27
Tabla 10: Evolución potencia eléctrica instalada en España (MW). Fuente: REE	48
Tabla 11: Impactos esperados en el agua (recurso energético) por el cambio climático.....	55
Tabla 12: Impactos esperados sobre el nivel del mar	61
Tabla 13: Impactos de las precipitaciones en el agua	65
Tabla 14: Impactos esperados en la evaporación	68
Tabla 15: Impactos en los recursos energéticos	71
Tabla 16: Impactos del agua sobre los recursos energéticos.....	77
Tabla 17: Impactos de la temperatura sobre la demanda	83
Tabla 18: Impactos de la temperatura sobre la oferta	95
Tabla 19: Impactos del agua sobre la oferta	97
Tabla 20: Impactos de los eventos extremos sobre la oferta	97
Tabla 21: Impactos de los recursos energéticos sobre la oferta.....	99
Tabla 22: Categorización de medidas de adaptación basada en el AR5 del IPCC.....	120
Tabla 23: Uso de aguas por tecnologías (procesos de energía primaria)	145
Tabla 24: Uno de agua y eficiencias de conversión por tecnologías de conversión energética.....	148
Tabla 25: Recursos hídricos disponibles por demarcación hidrográfica, en hm ³ (Ministerio de Medio Ambiente, 2005)	150
Tabla 26: Usos y consumos de agua (en hm ³).....	151
Tabla 27: Demandas y consumos energéticos (en EJ).....	152

Tabla 28: Propuestas de medidas de adaptación al cambio climático del sector energético español	160
Tabla 29: Influencia del cambio climático en la temperatura.....	167
Tabla 30: Impacto del cambio climático en las precipitaciones.....	173
Tabla 31: Impacto del cambio climático en los eventos extremos	175
Tabla 32: Indicadores HELIO de vulnerabilidad por países	188
Tabla 33: Indicadores HELIO de vulnerabilidad y resiliencia.....	189
Tabla 34: Cuadro resumen de los cambios climáticos y sus impactos en el sistema energético (ámbito global).....	194
Tabla 35: Medidas de adaptación para la oferta y demanda energética ante el cambio climático (ámbito global).....	198
Tabla 36: Tabla resumen del cambio climático y sus impactos en el sistema energético español	201

Índice de Figuras

Figura 1: Hitos de la adaptación al cambio climático en la UE y en España entre 2005 y 2013 ...	2
Figura 2: Marco general de adaptación al cambio climático en el sector energético	4
Figura 3: Marco general. Impactos físicos.....	5
Figura 4: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura media anual según el RCP4.5 en el periodo 2081-2100.....	6
Figura 5: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura media anual según el RCP8.5 en el periodo 2081-2100.....	7
Figura 6: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP4.5 en el periodo 2046-2065	8
Figura 7: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP8.5 en el periodo 2081-2100	9
Figura 8: Impactos de eventos extremos proyectados por el proyecto PESETA	11
Figura 9: Aumento proyectado del número de noches tropicales (>20°C) en el Mediterráneo, en el periodo 2021-2050 en relación a la media de 1961-1990. Escenario A1B	12
Figura 10: Aumento esperado en la duración máxima de sequías (<1mm) en el Mediterráneo, en el periodo 2021-2050 en relación a la medida de 1961-1990. Escenario A1B.	12
Figura 11: Marco general. Impacto sobre los sistemas energéticos.....	13
Figura 12: Impactos del cambio climático en el sistema energético español.....	17
Figura 13: Cambio en la generación fotovoltaica en España (2000-2100). Escenario A1B.....	19
Figura 14: Cambios esperados en el potencial fotovoltaico en el periodo 2006-2049 en relación a la media del periodo 2006-2015. RCP8.5	20
Figura 15: Cambios esperados en el potencial eólico de la Península Ibérica (MWh/día) en el periodo 2041-2070. Escenario A1B.....	20
Figura 16: Evolución de los HDD y CDD en España en el periodo 1970-2002.....	21
Figura 17: Aumento de los grados día de refrigeración (CDD/década) en España según diferentes modelos. Escenario A1B.	22

Figura 18: Impacto esperado en infraestructuras energéticas según la Estrategia Europea de Adaptación	32
Figura 19: Hitos de la adaptación al cambio climático en la UE y en España entre 2005 y 2013	33
Figura 20: Modelos de evaluación del IPCC	37
Figura 21: Consumo de energía primaria per cápita. España 2000-2013	40
Figura 22: Consumo de Energía Primaria en España. España 2000-2013	41
Figura 23: Energías renovables en energía primaria. España 2013	42
Figura 24: Evolución de la demanda de productos petrolíferos	43
Figura 25: Evolución de la demanda de gas	43
Figura 26: Centrales de generación eléctrica en España. Diciembre de 2014	44
Figura 27: Potencia eléctrica instalada en España por tecnologías. 2014	45
Figura 28: Evolución de la producción hidroeléctrica en España. 2010-2014	45
Figura 29: Distribución de la potencia hidroeléctrica instalada en las diferentes cuencas y sus reservas. Diciembre 2014.....	46
Figura 30: Evolución de la demanda eléctrica (b.c.) en España	47
Figura 31: Cobertura de la demanda de energía en España por tecnologías. 2014	47
Figura 32: Marco general de adaptación al cambio climático en el sector energético	49
Figura 33: Marco general. Impactos físicos.....	50
Figura 34: Marco general. Impacto sobre los sistemas energéticos.....	53
Figura 35: Evolución hielo en los océanos	56
Figura 36: Proyecciones a largo plazo de la reducción de hielo en los océanos.....	58
Figura 37: % de cambio en la cobertura de nieve estimada para el hemisferio norte	59
Figura 38: Evolución estimada del área de permafrost cerca de la superficie	60
Figura 39: Desagregado de factores que influyen en el aumento medio del nivel del mar (GMSL).....	62
Figura 40: Tasa de evolución del GMSL.....	63
Figura 41: Evolución del GMSL.....	64
Figura 42: Impacto esperado de las sequías en la producción hidroeléctrica en California (I) ..	66
Figura 43: Impacto esperado de las sequías en la producción hidroeléctrica en California (II) ..	67
Figura 44: Salinidad media estimada en los océanos en el periodo 2080-2100	68
Figura 45: Cambio medio estimado en la evaporación (largo plazo).....	69
Figura 46: Porcentaje de cambio estimado en la evaporación. Periodo 2016-2035. Modelos CIMP5. Escenario RCP4.5	70
Figura 47: Velocidades de viento estimadas en Brasil. Escenario A2.	73
Figura 48: Velocidades de viento estimadas en Brasil. Escenario B2.....	73
Figura 49: Predicción de la modificación de la escorrentía	78
Figura 50: Cambio anual medio en la escorrentía (2081-2100).....	79
Figura 51: Cambios esperados en la escorrentía media	80
Figura 52: Evolución prevista de la escorrentía a 2050 (Milly et al., 2010)	81
Figura 53: Cambios en la escorrentía a 2050 (Hamadudu et al., 2012)	81
Figura 54: Estudio del caudal y el potencial hidroeléctrica en la cuenca del río Columbia	82

Figura 55: Patrón de dependencia de la demanda para calefacción y refrigeración con la temperatura exterior	84
Figura 56: Evolución de la demanda de calefacción y refrigeración residencial	85
Figura 57: Evolución esperada de la demanda de calefacción	87
Figura 58: Cambio en el consumo de electricidad. Estado de Maryland	88
Figura 59: Cambio en el consumo de gas natural. Estado de Maryland	88
Figura 60: Cambio en el consumo de diésel para calefacción. Estado de Maryland	89
Figura 61: Cambio en el consumo de electricidad (empleado). Estado de Maryland	89
Figura 62: Cambio en el consumo de gas natural (empleado). Estado de Maryland	90
Figura 63: Evolución esperada de la demanda de refrigeración.....	91
Figura 64: Diagrama Sankey de recursos de agua a escala global (2014).....	93
Figura 65: Diagrama Sankey de recursos de agua a escala global (2100).....	94
Figura 66: Marco de análisis. Oferta y demanda	95
Figura 67: Definición gráfica de vulnerabilidad.....	105
Figura 68: Conexiones hidráulicas en Brasil, 2011	121
Figura 69: Impactos del cambio climático en el sistema energético español.....	132
Figura 70: Nivel de conocimiento sobre los diferentes impactos del cambio climático en el sector energético	133
Figura 71: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura según el RCP8.5 en el periodo 2046-2065	134
Figura 72: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura según el RCP8.5 en el periodo 2081-2100	135
Figura 73: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura según el RCP4.5 en el periodo 2046-2080	135
Figura 74: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura según el RCP4.5 en el periodo 2081-2100	136
Figura 75: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP8.5 en el periodo 2046-2065.....	136
Figura 76: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP8.5 en el periodo 2081-2100.....	137
Figura 77: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP4.5 en el periodo 2046-2065.....	137
Figura 78: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP4.5 en el periodo 2081-2100.....	138
Figura 79: Variación de la escorrentía (%) 2041-2070	139
Figura 80: Variación del recurso disponible (%) 2041-2070	140
Figura 81: Cambio medio mensual de velocidad (%) proyectado para el período 2071-2100 respecto al clima actual. Escenario A2. (AEMET).....	142
Figura 82: Cambios en el valor medio anual en España de: (a) componente U10 (m s ⁻¹); (b) componente V10 (m s ⁻¹); (c) velocidad W10 (m s ⁻¹); (d) racha máxima R10 (m s ⁻¹). Escenario A2. (AEMET)	143
Figura 83: Cuencas hidrográficas en España	149

Figura 84: Distribución mensual de la esorrentía (medias de 1940-2008), expresada como % de la esorrentía total	150
Figura 85: Impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua para energía por cuencas	152
Figura 86: Cambio en la generación fotovoltaica en España (2000-2100). Escenario A1B.....	154
Figura 87: Cambios esperados en el potencial fotovoltaico en el periodo 2006-2049 en relación a la media del periodo 2006-2015. RCP8.5	155
Figura 88: Cambios esperados en el potencial eólico de la Península Ibérica (MWh/día) en el periodo 2041-2070. Santos et al. (2014). Escenario A1B.....	155
Figura 89: Evolución de los HDD y CDD en España en el periodo 1970-2002. Ministerio de Medio Ambiente (2005)	156
Figura 90: Aumento de los grados día de refrigeración (CDD/década) en España según diferentes modelos. Escenario A1B.	157
Figura 91: Evolución de la temperatura media global del aire en superficie en el corto plazo	169
Figura 92: Evolución de la temperatura media global del aire en superficie en el largo plazo	170
Figura 93: Evolución de las temperaturas en el corto y largo plazo por regiones	171
Figura 94: Evolución de la temperatura de la superficie marina en el corto plazo	172
Figura 95: Variación regional de la temperatura de la superficie marina.....	172
Figura 96: Evolución por latitudes del cambio en las precipitaciones en el corto plazo	173
Figura 97: Precipitación media estimada en el periodo 2081-2100	174
Figura 98: Cambio en la frecuencia de días cálidos y fríos.....	176
Figura 99: Periodos de 5 días consecutivos de alta humedad	177
Figura 100: Diagrama Sankey del sistema energético español. 2014.....	190
Figura 101: Diagrama Sankey de emisiones de CO2 vinculadas al sector energético en España. 2014.....	191

0. Resumen Ejecutivo

0.1. Introducción

Desde finales del siglo XX, después de la creación del IPCC en 1988, la celebración de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1992 y la ratificación del Protocolo de Kioto en la COP-3 (Tercera Conferencia de la Partes) en 1997, la comunidad científica se ha volcado en el problema del cambio climático.

De entre las diversas maneras de afrontar el problema, aunque la mitigación (reducción de emisiones) copaba la gran mayoría de los esfuerzos, la estrategia de adaptación emergió como una forma importante y necesaria de gestionar el cambio climático. Poco a poco, gracias a la conciencia de que no podemos evitar sus consecuencias en su totalidad, la comunidad internacional ha comenzado a asumir la adaptación como una parte central de la estrategia global contra el cambio climático. Gracias a esto, en la actualidad disponemos de una amplia literatura científica sobre adaptación, aunque hay que seguir trabajando en la estimación de los impactos, sobre todo a nivel regional-nacional.

El Grupo de Trabajo II (WGII) es el grupo de trabajo del IPCC que evalúa la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático, sus consecuencias y las opciones para adaptarse a él. Esta evaluación es general, no se centra solo en los sistemas de energía sino que cubre todos los sectores que podrían verse afectados por el cambio climático, como los recursos hídricos, los ecosistemas, la agricultura y los bosques, los sistemas costeros, la industria y la salud humana, entre otros. Todos estos análisis son abordados en el 5º Informe de Evaluación (AR5) del IPCC, el informe más completo hasta la fecha acerca de esta problemática, y donde se da cuenta de las diferentes soluciones existentes y las posibilidades de adaptación sectoriales existentes. No obstante, aunque sí es el más importante, el IPCC no es el único grupo de expertos dedicado a adaptación. Muchos otros investigadores también se dedican a esta cuestión, y algunos se han centrado específicamente en las implicaciones sobre el sector energético. Son estos los que han servido de base al presente informe.

La referencia indirecta a la importancia del sector energético en el informe AR5 es permanente. Pero también hay algunas referencias directas. Según este informe (evidencia robusta, grado alto de acuerdo), el cambio climático tendrá los siguientes efectos en la *demanda energética*:

- Se reducirá la demanda en calefacción de los hogares
- Se incrementará la demanda en refrigeración de los hogares

También hace hincapié el informe en que el efecto sobre las *fuentes energéticas* y las *tecnologías* afectará de manera diferente según los recursos primarios, los procesos tecnológicos y las ubicaciones.

En su análisis regional para Europa, el informe también destaca el problema de las restricciones de agua en zonas del sur de Europa, lo que conllevará, entre otros, problemas energéticos derivados de la disminución de la capacidad de generación hidráulica.

Por otro lado, dentro del apartado C del informe, dedicado al manejo de los riesgos futuros y el incremento de la resiliencia, de nuevo se hace referencia al sector energético, concretamente a las importantes sinergias existentes entre este sector y otros como el agua, el suelo y la biodiversidad. Se destaca que las interacciones complejas entre todos ellos son importantes, aunque las herramientas para comprenderlas aún no están lo suficientemente desarrolladas. A modo de ejemplo, destaca acciones que suponen co-beneficios como (1) la mejora en la eficiencia energética y la apuesta por fuentes de energía más limpias, lo que redundaría en disminución de las emisiones y en reducción de efectos dañinos sobre la salud de las mismas, o (2) la reducción en el consumo energético y de agua en zonas urbanas mediante la “transformación verde” de las ciudades y el reciclado de aguas.

A nivel español, el hito principal en cuestión de adaptación al cambio climático ha sido la elaboración del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) cuyo primer programa de trabajo se aprobó en 2006. Se trata de un programa que vino a su vez precedido por los trabajos del ECCE (Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático). La génesis completa del PNACC se recoge en la Figura 1.

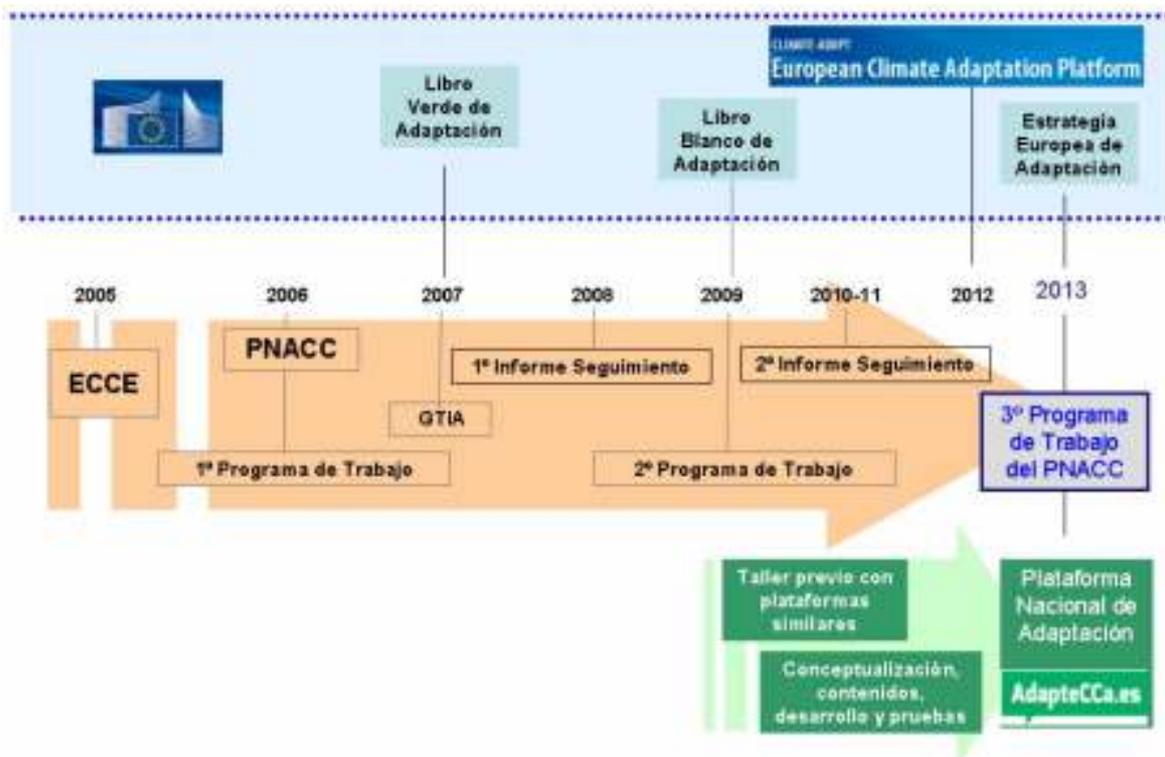


Figura 1: Hitos de la adaptación al cambio climático en la UE y en España entre 2005 y 2013

Según reza el PNACC: “el objetivo del plan es lograr la integración de medidas de adaptación al cambio climático basadas en el mejor conocimiento disponible en todas las políticas sectoriales

y de gestión de los recursos naturales que sean vulnerables al cambio climático, para contribuir al desarrollo sostenible a lo largo del siglo XXI".

Para ello, establece cuatro ejes de actuación, siendo el primero la pieza clave sobre la que pivotan todos los demás: la evaluación de los impactos, la adaptación y la vulnerabilidad al cambio climático para cada sector. De entre todos estos sectores, uno de los más importantes desde el punto de vista de las sinergias que presenta con el resto, es el sector energético.

Queda de manifiesto por tanto la importancia que el PNACC otorga al sector energético, principalmente por el alto grado de interrelaciones con otros sectores claves, algo que además hace particularmente complejo su análisis. Si bien algunos aspectos ya han sido considerados por otros estudios, como por ejemplo la influencia del cambio climático a través de la disponibilidad de agua, o estimaciones de la demanda de energía, faltan por analizar aún algunos elementos en detalle, y además hacerlo desde un marco integrado y coherente para España.

El presente informe, realizado por el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (Comillas ICA I) de la Universidad Pontificia Comillas para la Oficina Española de Cambio Climático, busca analizar, con carácter exploratorio y preliminar, las consecuencias del cambio climático sobre el sector energético español, y más concretamente los efectos del mismo sobre la oferta y la demanda de energía en nuestro país. El estudio pretende identificar los análisis ya realizados y recopilar el conocimiento existente sobre esta cuestión a nivel internacional en general y su aplicación a España en particular.

Este resumen ejecutivo se organiza de la siguiente manera: la sección 2 presenta el marco conceptual de adaptación al cambio climático en el sector energético que guía todo el trabajo. A continuación, la sección 3 desgrana este marco describiendo someramente los impactos directos e indirectos del cambio climático sobre los sistemas energéticos. El capítulo 4 se centra en describir el caso español y, finalmente, el capítulo 5 incluye algunas de las propuestas concretas de adaptación presentes en la literatura.

0.2. Marco conceptual

Como se ha comentado en la introducción, ante el creciente reconocimiento de que el cambio climático está en marcha y plantea graves riesgos para las sociedades humanas y los sistemas naturales, es necesario adoptar medidas que contemplen las estrategias nacionales de adaptación al cambio climático en aquellos sectores estratégicos más vulnerables. Ese es uno de los objetivos del PNACC desarrollado por la OECC, el cual, de entre todos los sectores, destaca al energético como uno de los prioritarios.

Para poder avanzar de forma ordenada en este análisis, el primer paso que se consideró fue crear un marco conceptual para el estudio de la adaptación al cambio climático en el sector energético.

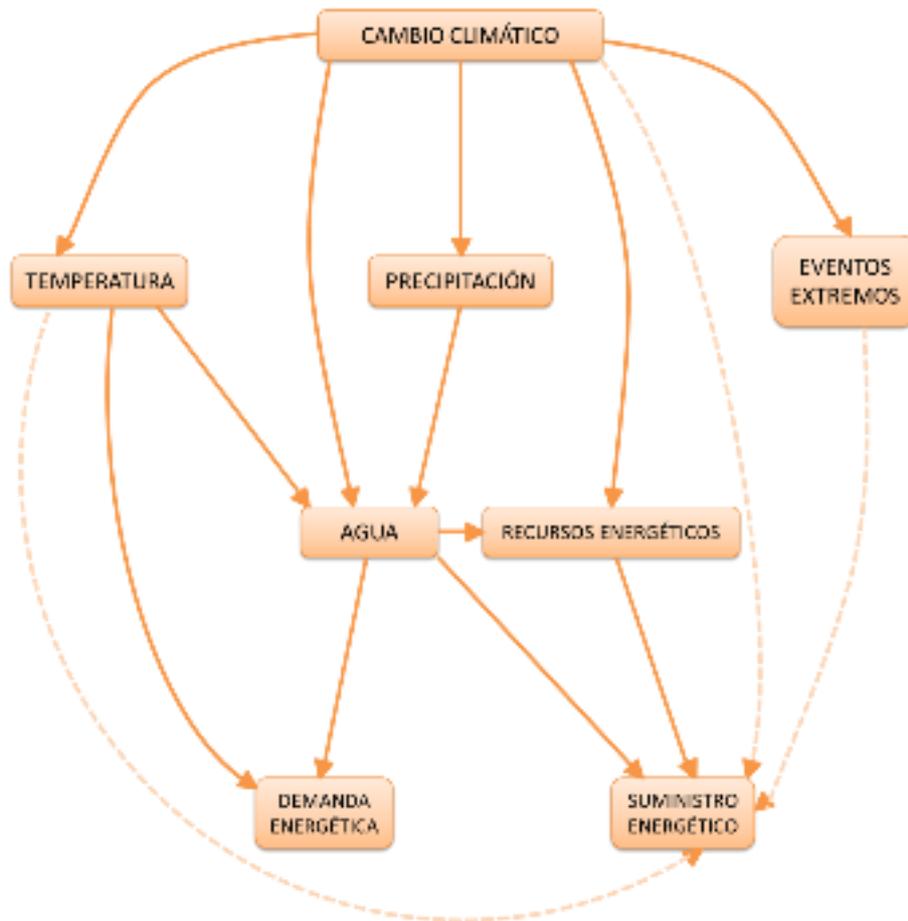


Figura 2: Marco general de adaptación al cambio climático en el sector energético

La Figura 2 presenta este marco, en el cual pueden verse las diferentes relaciones que existen entre el cambio climático y el sistema energético.

Como se puede apreciar, el marco se divide en dos partes. Por un lado, la parte superior se centra en los sistemas físicos: se tienen en cuenta las principales tendencias climáticas que constituyen el cambio climático, a saber, los cambios en la temperatura, las precipitaciones y los fenómenos extremos. Por otro lado, la parte inferior se refiere a los impactos que el cambio climático y sus consecuencias producen en todos los sectores que constituyen un sistema de energía. Esta será la sección principal de este informe, que se abordará a continuación. Es importante notar que en esta parte se considera el agua como input relevante del sistema de energía. Se hace así por tratarse ésta de un recurso fundamental tanto para la demanda de energía como para la oferta. Agua y energía están vinculados a través de numerosas vías. Muchas fuentes de energía requieren cantidades significativas de agua y producen una gran cantidad de aguas residuales que requieren energía para su tratamiento. Por todo ello, los sistemas de energía deben ser gestionados teniendo en cuenta a su vez el agua y su gestión.

0.3. Impactos en los sistemas energéticos

0.3.1. Impactos físicos

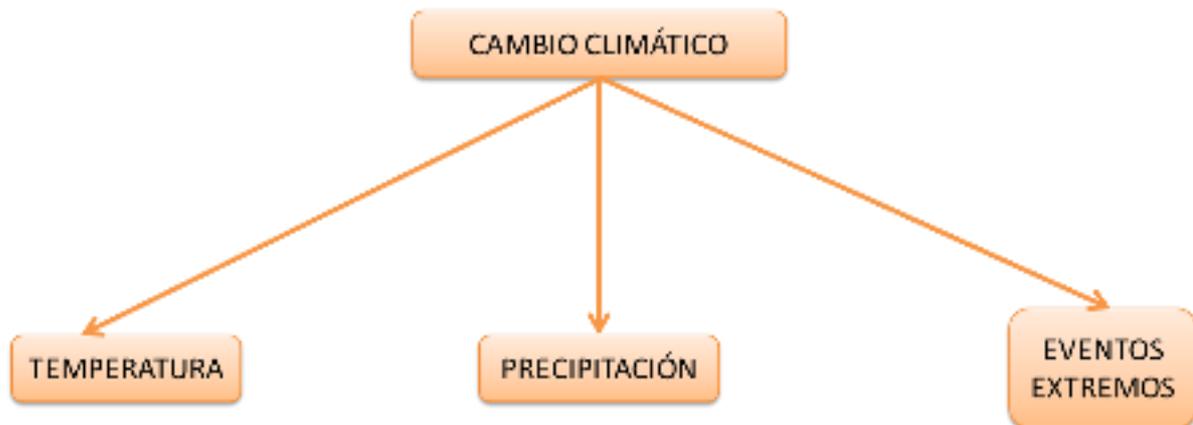


Figura 3: Marco general. Impactos físicos.

El punto de partida de toda evaluación de los impactos del cambio climático sobre el sistema de energía es la evaluación de los impactos físicos en los sistemas naturales.

Hay un elevado acuerdo y una evidencia robusta de que el cambio climático se está produciendo y que está afectando a los sistemas naturales, físicos y humanos. Las observaciones de los cambios en el sistema climático y su magnitud, son especialmente importantes para el tema de adaptación, debido a que los grandes cambios del sistema físico son a su vez los motores de cambio sobre el sistema energético. Estas fuerzas motoras pueden ser agrupadas en tres grandes efectos climáticos: (1) el cambio de temperaturas, (2) el cambio de patrón de las precipitaciones y (3) el cambio de la frecuencia e intensidad de eventos extremos. Es importante analizarlas con algo de detalle pues serán éstas las fuerzas motrices de los impactos sobre todo el sistema energético.

0.3.1.1. Cambios en la temperatura

Cada una de las tres últimas décadas ha sido, sucesivamente, más caliente en la superficie de la Tierra que cualquier década anterior desde 1850. El efecto más claro del cambio climático tiene que ver con ello, es decir, con un aumento de la temperatura media en la casi totalidad del mundo. Este aumento de temperatura se puede observar en varios elementos que constituyen el sistema natural, como la atmósfera, la tierra, el océano, los ríos, los lagos y los glaciares.

Para apreciar la intensidad media de este calentamiento, los investigadores sopesan algunos parámetros, como la temperatura media global de la superficie, la temperatura atmosférica libre, la temperatura de la troposfera y la temperatura del océano. A excepción de algunos casos particulares, todas las proyecciones ponen de manifiesto con evidencia robusta el calentamiento global.

El promedio global de la temperatura de la superficie de la tierra y el océano combinados ha aumentado 0,85 °C durante el período de 1880 a 2012. Respecto a los océanos, el calentamiento es más grande cerca de la superficie: los primeros 700 m de columna de agua en los océanos se han calentado a un ritmo de 0,11 °C por década durante el período 1971-2010, lo que supone más de un 60% del aumento neto de energía en el sistema climático.

Para los próximos años, en España tenemos las proyecciones regionalizadas desarrolladas por la AEMET, todas ellas disponibles de forma abierta en su página web. A modo de ejemplo se incluye la Figura 4, que presenta el incremento proyectado en la temperatura en el escenario el RCP4.5 en el periodo 2046-2065 y la Figura 5, que presenta el incremento proyectado en la temperatura en el escenario el RCP8.5 en el periodo 2081-2100.

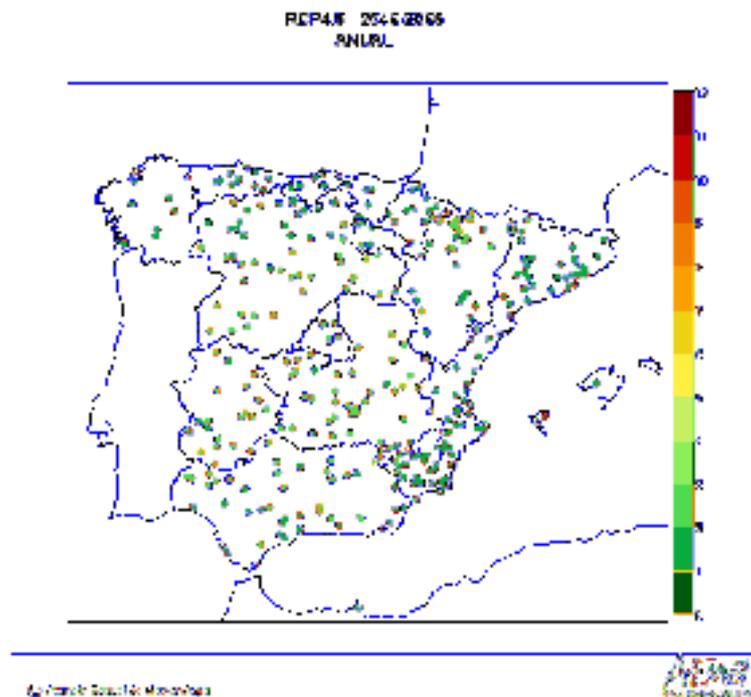


Figura 4: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura media anual según el RCP4.5 en el periodo 2046-2065

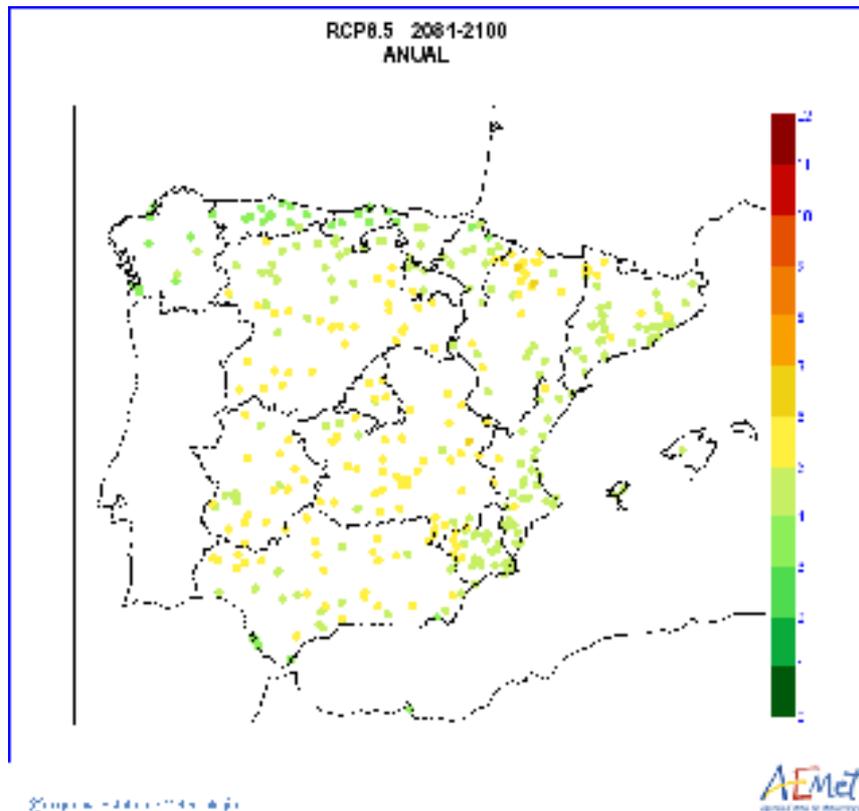


Figura 5: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura media anual según el RCP8.5 en el periodo 2081-2100

Se observa que, en el escenario RCP8.5, el más extremo, el aumento puede alcanzar los 5 o 6 grados en zonas del interior de la meseta y el norte de Aragón.

0.3.1.2. Cambios en las precipitaciones

El patrón de precipitaciones ha cambiado significativamente en el siglo XX. Se estima que en las latitudes medias del hemisferio norte la precipitación ha aumentado desde 1901, y especialmente después de 1951. Sin embargo, un análisis detallado de la influencia humana en los cambios en los patrones de precipitaciones es difícil de hacer con los registros existentes. En la actualidad existe confianza media¹ en que ha habido una influencia humana significativa en los cambios a escala global en los patrones de precipitación, especialmente en el hemisferio norte (latitudes medias y altas).

De cara al futuro, las proyecciones sí muestran un aumento claro de la precipitación más marcado en función de la latitud. En términos generales, las precipitaciones medias anuales aumentarán en las latitudes altas y disminuirán en las medias, ámbito en el que se encuentra nuestro país.

¹ Una de las métricas en las que se basa el AR5 es la confianza (“confidence”) en la validez de un hallazgo, basada a su vez en el tipo, la cantidad, la calidad y consistencia de la evidencia.

Con respecto a las concreciones para España, de nuevo la referencia son los estudios de regionalización llevados a cabo por la AEMET.

Aunque todas las proyecciones sobre cambios esperados en las precipitaciones están accesibles en la web de la AEMET, incluimos a modo de ejemplo, como hicimos con la temperatura, por un lado la Figura 6, que presenta los resultados para el escenario RCP4.5 en el periodo 2046-2065 y, por otro lado, la Figura 7, que presenta los resultados para el escenario RCP8.5 en el periodo 2081-2100, el más extremo, el cual, como se puede observar, incluye descensos superiores al 15% en el suroeste de la península.

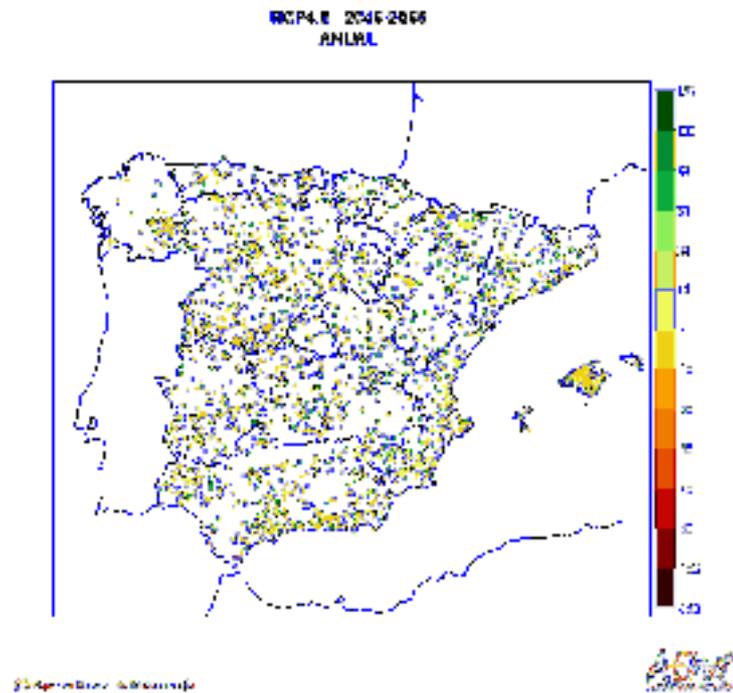


Figura 6: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP4.5 en el periodo 2046-2065

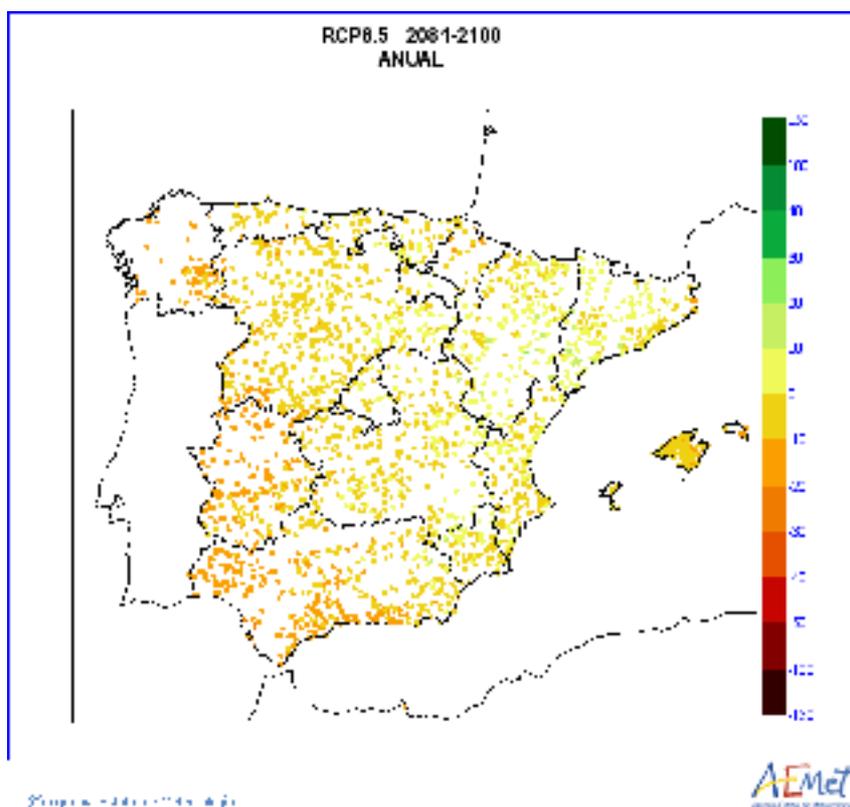


Figura 7: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP8.5 en el periodo 2081-2100

Estos datos de precipitaciones se complementan con los estudios del CEDEX (2010 y 2012) sobre la escorrentía. La Tabla 1 muestra las proyecciones de los cambios porcentuales en la misma en 2050, tomando la media del periodo 2041-2070. Estos estudios de CEDEX trabajan a su vez sobre escenarios de cambio climático del AR4².

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA	VARIACIÓN DE LA ESCORRENTÍA (%) (2041-2070)		VARIACIÓN DEL RECURSO DISPONIBLE (%) (2041-2070)	
	1	2	1	2
Galicia Costa	-4	-31	-14	-37
Miño-Sil	-6	-34	-11	-28
Cantábrico Occidental	-4	-27	-20	-38
Cantábrico Oriental	-2	-24	-11	-34

² El escenario 1 de cambio climático corresponde al escenario A2i, CGCM2-FIC del estudio del CEDEX, mientras que el escenario 2 corresponde al escenario A2ii, ECHAM4-FIC. El primer término (A2i o A2ii) se refiere al escenario original de cambio climático procedente del IPCC, y el segundo (CGCM2-FIC o ECHAM4-FIC) en función del modelo de circulación general de la atmósfera empleado para generar los. Así, el escenario 1 es un escenario de cambio climático medio, y el escenario 2 es un escenario severo.

DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA	VARIACIÓN DE LA ESCORRENTÍA (%) (2041-2070)		VARIACIÓN DEL RECURSO DISPONIBLE (%) (2041-2070)	
	1	2	1	2
Duero	-13	-41	-10	-37
Tajo	-16	-48	-13	-50
Guadiana	-23	-58	-19	-58
Tinto, Odiel Y Piedras	-23	-58	-8	-65
Guadalquivir	-18	-55	-7	-55
Guadalete Y Barbate	-18	-55	-12	-56
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	-15	-50	-13	-41
Segura	-10	-39	-11	-44
Júcar	-11	-28	-11	-32
Ebro	-6	-26	-14	-27
Distrito Fluvial de Cataluña	-2	-5	-5	-11

Tabla 1: Variación interpolada de la escorrentía en escenarios de cambio climático (% , media 2041-2070)

Vemos que, en el escenario más desfavorable (2), la reducción de la escorrentía en algunas demarcaciones hidrográficas del suroeste peninsular alcanza el 58 %.

0.3.1.3. Eventos extremos

Desde 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos³. Estos episodios graves aparecen en diferentes formas, y afectan a la temperatura, a las precipitaciones y a la circulación atmosférica.

Los días y las noches fríos ha disminuido, y los días y las noches cálidos se han incrementado a escala global. La frecuencia de las olas de calor también ha aumentado en Europa, Asia y Australia. En general, la mayoría de estudios pronostican que en el futuro habrá más eventos extremos de alta temperatura y menos de baja temperatura en la mayoría de las zonas terrestres. En esa línea, las olas de calor se producirán con mayor frecuencia y duración, mientras que los inviernos de frío extremo, aunque menos numerosos, podrán seguir teniendo lugar.

La frecuencia y la intensidad de precipitaciones torrenciales han variado: en América del Norte y Europa se han incrementado, mientras que en otros continentes no hay tanta evidencia. Las proyecciones globales a corto y largo plazo confirman una tendencia clara de aumento en las precipitaciones medias a nivel mundial, pero hay variaciones significativas entre regiones. Por

³ Un **evento extremo meteorológico** es un evento inusual para un lugar en particular y una época del año concreta. Puede considerarse evento extremo meteorológico cuando se encuentra por encima o por debajo del percentil 90 o 10 de la función de probabilidad observada. Por otra parte, para que se pueda hablar de **evento extremo climático** se precisa que el patrón meteorológico extremo se extienda en el tiempo hasta afectar de forma significativa a los parámetros climáticos medios de una estación.

ejemplo, las precipitaciones extremas se harán más intensas y más frecuentes en la mayor parte de las latitudes medias y las regiones tropicales húmedas.

También ha habido una modificación en la actividad de huracanes o ciclones en el siglo XX. El informe AR4 del IPCC concluyó que existe una tendencia creciente de ciclones tropicales desde 1970 en algunas regiones. No obstante, la literatura más reciente indica que es difícil sacar conclusiones firmes con respecto a los niveles de confianza asociados con las tendencias observadas antes de la era de los satélites. Sin embargo, las proyecciones futuras de la actividad de los ciclones tropicales prevén que habrá una disminución o en todo caso un estancamiento a nivel agregado durante el siglo XXI. A nivel mundial, el área abarcada por sistemas monzónicos aumentará durante este siglo mientras que los vientos del monzón se debilitarán y las precipitaciones se intensificarán debido al aumento de la humedad atmosférica.

A nivel Europeo, los dos proyectos PESETA (*Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis*) desarrollaron unos modelos bottom-up de impactos climáticos esperados. La Figura 8 recoge uno de estos impactos a modo de ejemplo: el número de noches tropicales consecutivas.

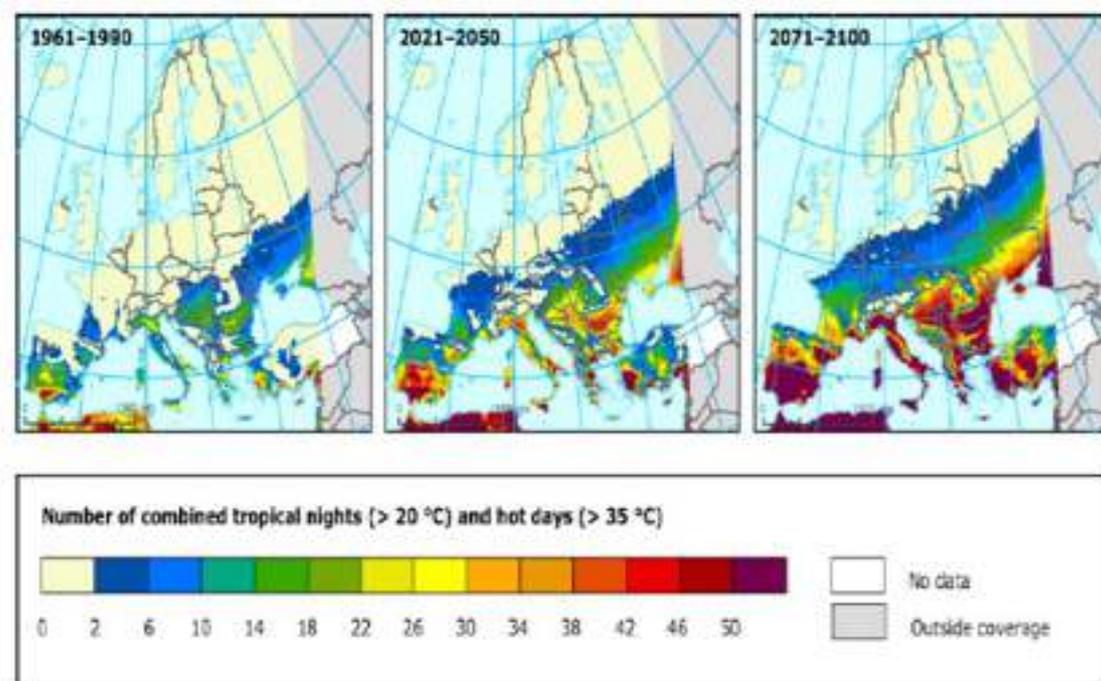


Figura 8: Impactos de eventos extremos proyectados por el proyecto PESETA

De nuevo, En España, es la AEMET quien ha realizado estudios que analizan la evolución de los eventos extremos. Para ello han desarrollado proyectos que estudian las tendencias de una serie de índices de extremos, tales como el aumento en el número de días y noches cálidas, la frecuencia de olas de calor, los días de precipitación o el número de días secos consecutivos. Los principales resultados en estos ámbitos provienen del proyecto ENSEMBLES. A modo de ejemplo se incluyen dos figuras. La Figura 9 presenta una proyección de las noches tropicales

(aquellas en las que la temperatura no baja de los 20 °C) y la Figura 10 muestra el aumento proyectado en la duración máxima de los periodos de sequía (con precipitaciones por debajo de 1mm).

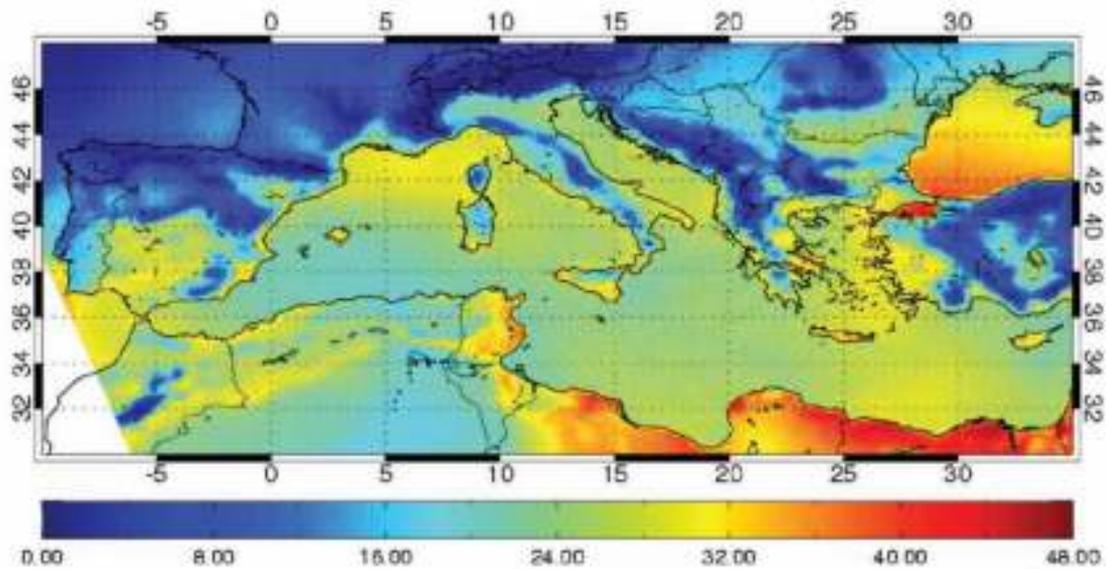


Figura 9: Aumento proyectado del número de noches tropicales (>20°C) en el Mediterráneo, en el periodo 2021-2050 en relación a la media de 1961-1990. Escenario A1B

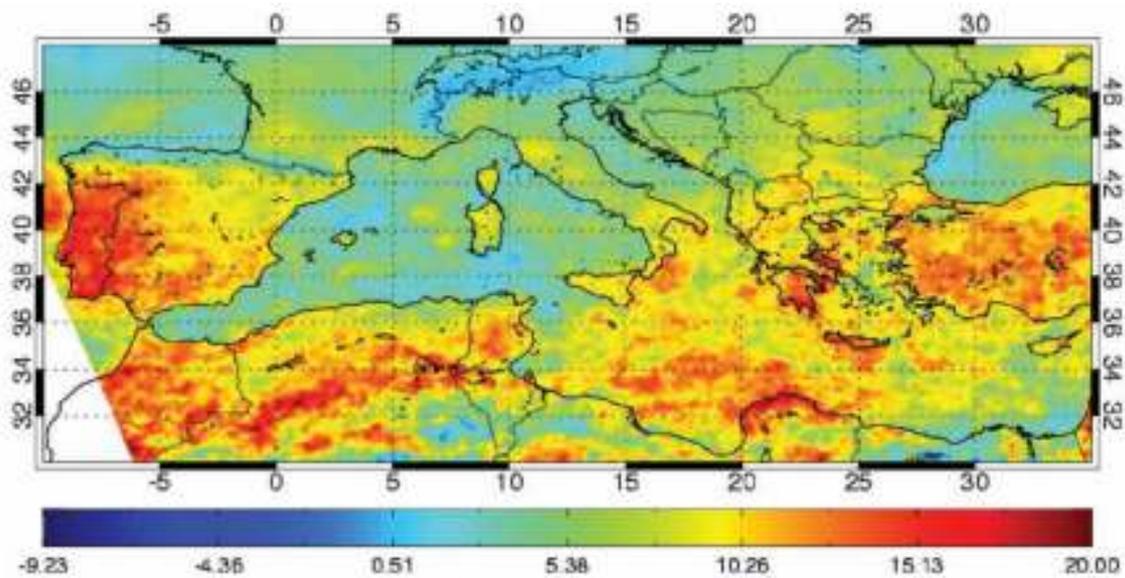


Figura 10: Aumento esperado en la duración máxima de sequías (<1mm) en el Mediterráneo, en el periodo 2021-2050 en relación a la medida de 1961-1990. Escenario A1B.

Las zonas más expuestas a estos eventos extremos son las zonas de costa. En España, el estudio de referencia sobre impactos de cambio climático en costa es el C3E, desarrollado por la Universidad de Cantabria para la OECC. Dentro de la zona costera, el proyecto se centra sobre

los riesgos de inundación y erosión y la incidencia sobre las infraestructuras; centrándose en los impactos y adaptación en grandes ciudades costeras y en el sector turístico.

0.3.2. Impactos en el sistema energético

Mientras que en la sección precedente se describieron cualitativamente los impactos del cambio climático sobre los sistemas físicos (temperatura, precipitaciones y eventos extremos), en esta sección se presenta una cuantificación de los impactos esperados del cambio climático sobre el sistema energético basándose en el AR5 del IPCC y en una revisión amplia de la literatura relacionada.

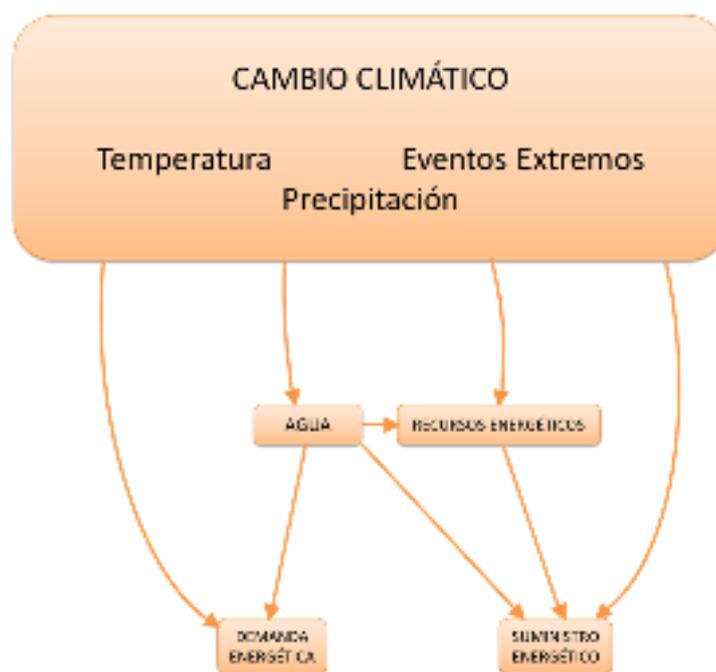


Figura 11: Marco general. Impacto sobre los sistemas energéticos

En este punto, el sistema energético se considera subdividido en tres ámbitos principales, como se puede observar en la Figura 11: Marco general. Impacto sobre los sistemas energéticos : fuentes de energía (agua y otros recursos), demanda de energía y suministro de energía. Como se mencionó anteriormente, el agua se considera aparte de los recursos energéticos, ya que tiene una mayor importancia que otras fuentes de energía, y porque afecta fuertemente a muchas partes de la estructura.

Los recursos energéticos se refieren a la cantidad de energía primaria disponible; la demanda de energía se refiere al uso final de la energía; y el suministro de energía se centra en las tecnologías que convierten la energía primaria en una forma que pueda ser utilizada por los consumidores.

Con respecto al suministro, dado que parte importante del sistema energético actual (e incluso las instalaciones de energía en construcción o en proyecto que se llevarán a cabo en los próximos años) probablemente seguirá estando operativa en las nuevas condiciones climáticas dada la

larga vida útil de la infraestructura energética, se hace especialmente necesario realizar un análisis preciso de la oferta actual.

En esta sección se tratará por tanto de cubrir una amplia variedad de impactos que el cambio climático puede tener sobre los sistemas de energía, y se hará siempre con la guía del marco conceptual de la Figura 11.

En el informe completo se analizan con todo detalle cada una de las interacciones entre cambio climático y oferta y demanda energéticas. En este resumen ejecutivo presentamos tan solo las tablas que resumen algunos de los hallazgos a nivel mundial presentes en la literatura. La concreción para el caso español se incluye en la siguiente sección.

0.3.2.1. Impactos en la oferta

La Tabla 2 recoge los impactos de los cambios de temperatura en la generación de energía:

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Eficiencia		
<ul style="list-style-type: none"> Fotovoltaica 	El aumento de las temperaturas puede modificar la eficiencia de las células fotovoltaicas (la energía producida depende de la temperatura de la célula) y reducir la generación eléctrica PV.	Crook et al., 2011
<ul style="list-style-type: none"> Centrales térmicas 	Para un aumento de temperatura de 1 ° C, hay una reducción en la generación en las centrales nucleares del 0,8%, y en centrales de gas y carbón de un 0,6%, debido a la pérdida de eficiencia térmica. Un aumento del 1 ° C en la temperatura ambiente reduce la generación en plantas térmicas aproximadamente un 0,45%.	Linnerud et al., 2009
<ul style="list-style-type: none"> Transmisión y distribución 	Podría haber un aumento en las pérdidas en la transmisión debido a una mayor temperatura. Las altas temperaturas también puede reducir la eficiencia de los transformadores	Eskeland et al., 2008

Tabla 2: Impactos de la temperatura sobre la oferta

La Tabla 3 presenta los impactos de los cambios de agua en el suministro de energía:

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Refrigeración (plantas térmicas)	Necesidad de agua dulce para la generación termoeléctrica en 2035: + 20% extracción de agua dulce en comparación con 2010 + 85% consumo de agua dulce en comparación con 2010	Durmayaz y Sogut, 2006

Tabla 3: Impactos del agua sobre la oferta

La Tabla 4 resume los impactos de los eventos extremos en el suministro de energía:

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
----------	------------	------------

Reducción/interrupción del suministro	El aumento esperado en los eventos extremos (como los huracanes) tendrá un impacto significativo en el sector energético. Los huracanes (vientos fuertes y olas altas) pueden tener un impacto debilitante en el suministro de energía. Los eventos extremos afectan a las centrales térmicas y nucleares, la infraestructura, plantas hidroeléctricas, parques eólicos, tuberías de petróleo y gas y la red eléctrica. Todos estos impactos pueden causar interrupciones de suministro.	Kopitko y Perkins, 2011
---------------------------------------	---	-------------------------

Tabla 4: Impactos de los eventos extremos sobre la oferta

Por último, la Tabla 5 presenta los impactos de los cambios en los recursos energéticos sobre el suministro de energía:

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Hidroelectricidad	La producción de energía hidroeléctrica con base en el río Colorado podría disminuir hasta en un 40% a mediados de este siglo. La energía hidroeléctrica en Central Valley podría disminuir entre un 10% y un 12%. Europa del Norte: las afluencias a los ríos se incrementaría en un 11% entre 2001 y 2040. Esto aumentaría el suministro de energía en un 1,8% con respecto a 2001. Cambios en la generación de energía hidroeléctrica en 2050: 2931TWh generación +2.46TWh, cambio de +0,08% del total	Mideksa y Kallbekken, 2010
Viento	-10 a -15% de la velocidad media del viento en los EE.UU. continental, que se correspondería con una reducción en la generación de energía eólica en el orden de 30 a 40%	Breslow y Sailor, 2002
Fotovoltaica	-6% de producción eléctrica en las células solares debido a -2% de la radiación solar (Norte de Europa)	Fidje y Martinsen, 2006

Tabla 5: Impactos de los recursos energéticos sobre la oferta

0.3.2.2. Impactos en la demanda

Esta sección se centra sobre todo en el impacto debido al aumento de temperatura. En el informe completo se analizan con más detalle otras interacciones.

La Tabla 6 recoge los principales resultados encontrados.

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Demanda de calefacción	Incremento del 0.8% por año entre 2000 y 2030. Lento decrecimiento desde 2030. -34% en 2100 (Maryland, EE.UU)	Ruth y Lin, 2006

Demanda de refrigeración	7% incremento entre 2020 y 2030 +70% incremento para 2100, sobre la demanda estimada sin cambio climático, esto supone una demanda 40 veces superior en 2100 a la del 2000	Wilbanks et al., 2008
Industria	Consumo en EE.UU. por unidad de producción industrial: +0.0127% para un incremento de 1 HDD (Fahrenheit) +0.0032% para un incremento de 1 CDD (Fahrenheit) 1,098 billones m ³ de agua para 2100 (0,763 billones de m ³ en 2010: +45%)	MIT Outlook 2014
Agricultura	Carga riego en julio en Estados Unidos (Noroeste del Pacífico): + 9,8% sin cambios en la superficie de cultivo de regadío (evaluación anterior: + 8,7%) Agua en agricultura: 1,389 billones de m ³ en 2100 (1,551 billones de m ³ en 2010: -10%)	Scot et al., 2007 p. 27 MIT Outlook 2014

Tabla 6: Impactos de la temperatura sobre la demanda

0.4. Caso español

En 2005, en el marco del proyecto ECCE (Efectos del Cambio Climático en España) promovido por la Oficina Española de Cambio Climático a través de un convenio de colaboración con la Universidad de Castilla La Mancha, un amplio panel de expertos nacionales en energía, desarrollaron un informe sobre impactos en el sector debidos al cambio climático. Aunque propiamente no era un informe de adaptación, sus propuestas pueden ser entendidas en esta clave. Se trata pues de un trabajo de referencia que en este último capítulo del presente informe se trata de complementar con los avances que hasta la fecha se han ido dando en materia de adaptación al cambio climático en el sector energético.

Como punto de partida, se incorpora una tabla resumen, procedente de este informe de 2005, que muestra la escala de impactos que cada uno de los efectos asociados al cambio climático podría tener en las tecnologías y subsectores energéticos de nuestro país (Figura 12).

		Precipitaciones		Temperatura		Viento		Otros
		Incremento	Dominación	Incremento	Dominación	Incremento	Dominación	
Energía eléctrica	Generación	Positivo (abundancia)	Negativo	Negativo*	Positivo*	Positivo en ráfagas	Neutro en calma	Solar: insolación positiva
	Transporte y Distribución	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo si es muy elevado	Neutro	
	Comercialización/Demanda	Neutro	Neutro	Negativo**	Negativo**	Neutro	Neutro	Combinación: Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento: incremento conjunto provoca efecto negativo
Gas natural	Aprovechamiento	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	Negativo (calor)	Neutro	
	Repasificación	Neutro	Neutro	Positivo	Negativo	Neutro	Neutro	
	Transporte y distribución	Negativo	Positivo	Positivo (gasoductos o decubiertos)	Negativo (gasoductos decubiertos)	Neutro	Neutro	
	Almacenamiento	Neutro	Neutro	Negativo (almacenamiento decubiertos)	Neutro	Neutro	Neutro	
	Comercialización/Demanda	Neutro	Neutro	Negativo**	Negativo**	Neutro	Neutro	Combinación: Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento: incremento conjunto provoca efecto negativo
Petróleo	Refino	Neutro	Neutro	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	
	Transporte y distribución	Negativo	Positivo	Negativo	Negativo	Neutro	Neutro	
	Demanda	Neutro	Neutro	Negativo**	Negativo**	Neutro	Neutro	
Carbón	Extracción	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	
	Almacenamiento	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo	Neutro	
	Demanda	Negativo	Positivo	Negativo**	Negativo**	Neutro	Neutro	
Renovables uso no eléctrico	Producción	Positivo en biomasa	Negativo en biomasa	Negativo en forestal	Negativo en biomasa	Neutro	Neutro	Solar de baja intensidad: insolación positiva

Figura 12: Impactos del cambio climático en el sistema energético español

* Afecta al rendimiento de las centrales termeléctricas, nucleares, cogeneración, biomasa, solar térmica, etc. Asimismo, la solar fotovoltaica disipa el calor con mayor dificultad.

** Se considera negativo al suponer una mayor demanda del recurso.

0.4.1. Impactos en la oferta energética

Nos centraremos en este apartado en analizar tres ámbitos principales de impacto del cambio climático sobre la oferta energética en España, a saber, (1) los sistemas agua-energía, (2) la generación fotovoltaica y (3) la generación eólica.

0.4.1.1. Impactos vinculados a los usos del agua

El estudio de referencia en este ámbito es el desarrollado por el Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Comillas para la Fundación Canal. Este estudio trabaja principalmente con dos escenarios de cambio climático a 2050:

- **WC1na:** escenario medio de cambio climático, sin adaptación.
- **WC2na:** escenario severo de cambio climático, sin adaptación.

Los principales resultados del estudio se exponen a continuación. En primer lugar, la Tabla 7 presenta los cambios en los usos del agua.

	REF	WC-2012	WC1na	WC2na
Total de recurso natural disponible	110.116	110.116	99.934	70.985
Total de recurso natural disponible para energía	Ilimitada	19.699	17.247	12.651
Consumo de agua para Energía Primaria	1.413	1.383	1.413	1.413
Uso de agua para Energía Primaria	1.186	1.147	1.178	1.188
Consumo de agua para Conversión Energética	920	744	708	651
Uso de agua para Conversión Energética	39.379	38.569	37.123	33.788
Consumo de agua total para energía	2.332	2.284	2.279	2.199
Uso de agua total para energía	40.565	39.716	38.301	34.975

Tabla 7: Usos y consumos de agua (en hm³)

La Tabla 8 recoge las principales tendencias relacionadas con los impactos en los consumos energéticos debidos a los cambios en la disponibilidad y usos del agua.

	REF	WC-2012	WC1na	WC2na
Electricidad generada	1,49	1,46	1,45	1,43
Electricidad renovable	0,77	0,74	0,73	0,71
Energía final total	5,63	5,64	5,64	5,62
Energía domestica	1,89	1,83	1,83	1,78
Dependencia energética (%)	74,84	75,43	75,39	75,89
Pérdidas en generación	1,71	1,65	1,65	1,63
Pérdidas en transporte	0,15	0,15	0,14	0,14

Tabla 8: Demandas y consumos energéticos (en EJ)

Se puede observar cómo en el escenario de cambio climático drástico sin adaptación se reduce el total de energía del sistema. Esto se debe, como se explica en el informe, a que el modelo Nexus utilizado prefiere ahorrar energía antes que aumentar los costes debidos a la falta de adaptación del sistema.

En este estudio no se han tenido en cuenta algunas interrelaciones del sistema, como son los posibles cambios en el coeficiente de aprovechamiento en función de los usos alternativos, por ejemplo en los cambios en los caudales ecológicos. Tampoco se ha tenido en cuenta el posible cambio en el aterramiento de los embalses debido a un aumento de las precipitaciones extremas, lo que tendría a su vez un reflejo en la disponibilidad del recurso agua.

Es importante dejar claro que estos interesantes resultados provenientes del informe de la Fundación Canal se centran solo en analizar los impactos del cambio climático en los sectores energéticos debidos a los cambios en la disponibilidad y los usos del agua. Para obtener una imagen completa del impacto total del cambio climático en el sistema energético español sería necesario emplear un modelo que recogiera todas las posibles influencias, no solo la debida al agua. Hasta la fecha, ese trabajo no ha sido realizado.

0.4.1.2. Impactos en la producción fotovoltaica

Uno de los estudios de referencia en este campo fue el desarrollado por Crook et al., basados en el escenario A1B del AR4. Se trata de un estudio internacional pero que tuvo una particularización para nuestro país. La Figura 13 presenta la variación proyectada en la potencia fotovoltaica en España según dos modelos de trabajo (HadGEM1 y HadCM3).

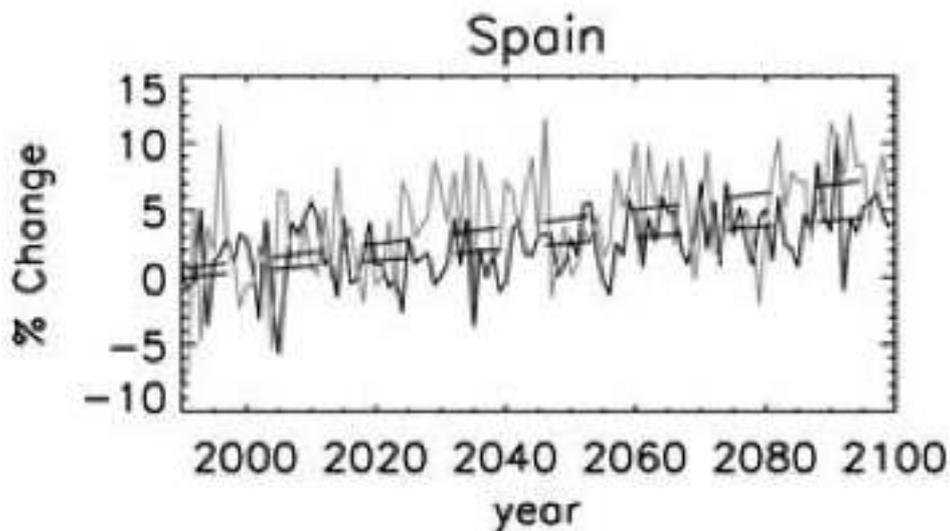


Figura 13: Cambio en la generación fotovoltaica en España (2000-2100). Escenario A1B.

Si observamos las rectas de regresión que marcan las tendencias de ambos modelos de trabajo, el impacto es bajo, apenas supera el 5% en los albores de final de siglo. Estos resultados se explican por la evolución de dos factores: temperatura e irradiancia. Mientras que un aumento de la temperatura disminuye la eficiencia de los paneles, una mejora de la irradiancia (debido principalmente a la reducción media de la cubierta de nubes) la aumenta.

Estos datos se han visto complementados por el trabajo más reciente de Wild et al., basado en el escenario RCP8.5 cuyas estimaciones se presentan en la Figura 14.

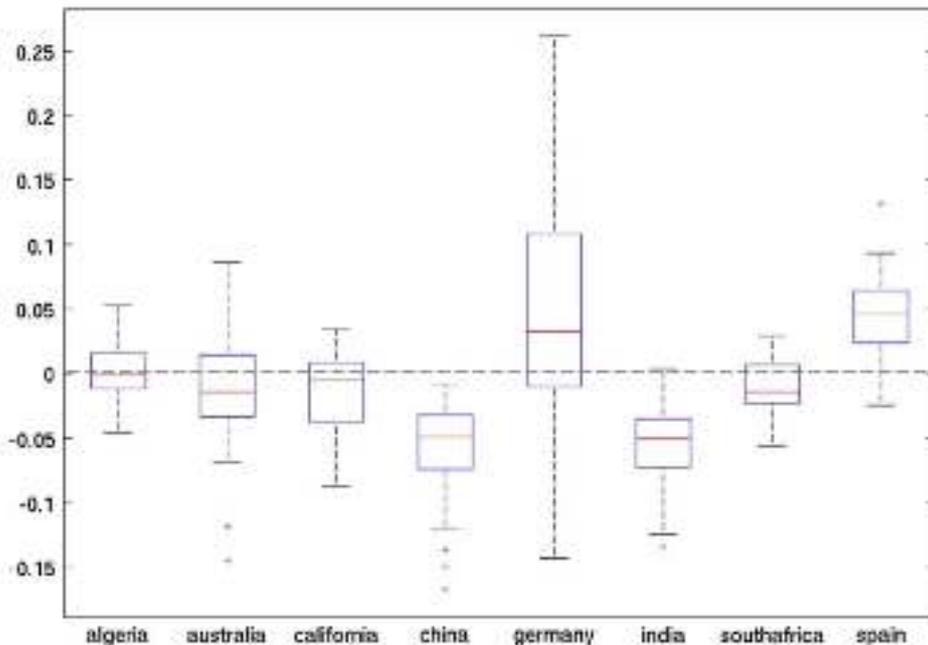


Figura 14: Cambios esperados en el potencial fotovoltaico en el periodo 2006-2049 en relación a la media del periodo 2006-2015. RCP8.5

En el margen derecho de la imagen encontramos a España, que presenta un escueto potencial de incremento en la generación fotovoltaica centrado en el 5% para el periodo de estudio.

0.4.1.3. Impactos en el potencial eólico

El trabajo más relevante en este aspecto es el de Santos et al., basado en el escenario A1B, para la Península Ibérica. La Figura 15 muestra los resultados más destacados.

	DJF	MAM	JJA	SON
1. Northern Galicia	-0.31 (-0.54)	-1.29 (-1.16)	0.41 (0.41)	-1.00 (-0.61)
2. Burgos	-0.02 (-0.97)	-1.19 (-1.32)	0.21 (0.19)	-0.55 (-0.63)
3. Ebro valley	-0.13 (-0.49)	0.79 (0.72)	1.47 (1.34)	0.56 (0.34)
4. Northern Portugal	-0.76 (-0.96)	-0.81 (-1.28)	-0.61 (-0.32)	-0.88 (-0.82)
5. Southern Cataluña	-1.46 (-1.42)	0.76 (0.06)	-0.11 (-0.34)	-0.94 (-1.31)
6. Oeste	-0.51 (-1.02)	-0.90 (-0.60)	0.26 (0.00)	-0.66 (-0.58)
7. Albacete	-0.56 (-1.16)	-1.02 (-0.83)	0.47 (0.63)	-0.51 (-0.61)
8. Southern Andalucía	3.05 (2.14)	1.38 (1.07)	1.78 (1.14)	3.60 (3.06)

Figura 15: Cambios esperados en el potencial eólico de la Península Ibérica (MWh/día) en el periodo 2041-2070. Escenario A1B.

Las proyecciones del cambio climático presentan una disminución significativa en la mayor parte de la Península Ibérica (<2 MWh / día); aunque lo más destacable quizás sea el fuerte aumento de los potenciales en otoño en el sur de Andalucía (> 2 MWh / día). Esto se traduciría en una

reducción media del potencial eólico en la Península en el periodo considerado del 15%, llegando incluso a un 40% en invierno.

Es importante incidir en este punto sobre la necesidad de tomar estos resultados con prudencia, pues pueden cambiar mucho si el análisis se realiza teniendo en cuenta las distribuciones de viento en lugar de las velocidades medias. Este ejercicio es uno de los temas pendientes a abordar en el futuro.

0.4.2. Impactos en la demanda de energía

Nos centramos en el efecto principal del cambio climático sobre la demanda energética, a saber, los cambios en las necesidades de calefacción y refrigeración debidos al esperado aumento de temperatura.

Ya el informe “Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” elaborado para el Ministerio de Medio Ambiente en 2005 con el que abrimos esta sección, se atendía a este tema. Suya es la autoría de la Figura 16.

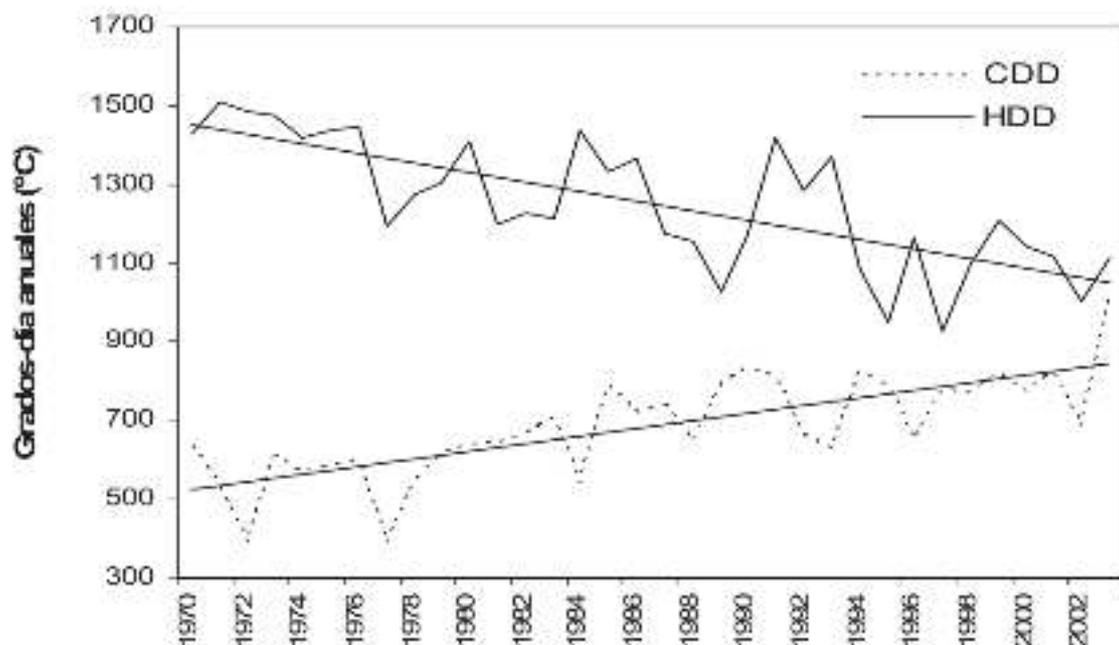


Figura 16: Evolución de los HDD y CDD en España en el periodo 1970-2002

La figura presenta una clara tendencia decreciente de los grados día de calefacción anuales y asimismo una clara tendencia creciente de los grados día de refrigeración, ambas son consecuencia de una elevación progresiva de la temperatura media en las tres décadas del estudio.

Estos datos se vieron confirmados por OrtizBeviá et al. En este trabajo se investigó la evolución de las necesidades de calefacción y refrigeración (HDD y CDD) en el caso de España en el periodo

1958-2005, y se plantearon proyecciones al medio plazo. La variabilidad observada se obtuvo de los registros de temperatura en 31 estaciones de toda España y de los datos de los censos disponibles. Respecto a la evolución futura de los grados-día, estos se estimaron con cuatro simulaciones realizadas sobre el escenario A1B del AR4, para el período 2001-2050. Las tendencias encontradas para las necesidades de calefacción (grados-día) en invierno no fueron muy significativas. Sin embargo, las tendencias observadas para las necesidades de refrigeración en verano sí lo fueron.

Model	(1950–1989)	(2010–2049)
INGV	(5.49% ± 3.2%)	(10.61% ± 4.9%)
IPSL	(1.07% ± 8.1%)	(27.68% ± 6.4%)
MPIM	(7.25% ± 7.2%)	(12.07% ± 4.0%)
MeteoFrance	(9.42% ± 7.2%)	(16.47% ± 6.7%)
Observed	(4.92% ± 2.9%)	

Figura 17: Aumento de los grados día de refrigeración (CDD/década) en España según diferentes modelos. Escenario A1B.

En la Figura 17 se presentan los resultados del estudio en lo que a aumento de CDD en España se refiere. Las proyecciones medias de aumento de los CDD/década se sitúan en 14% +/- 5,3%, un aumento muy considerable que habría que trasladar a demanda efectiva de servicios finales de refrigeración para estimar el impacto real.

0.5. Propuestas de adaptación

Tal y como señala el Banco Mundial, hasta la fecha, los responsables público-privados del sector energético se han centrado en la maximización de los suministros de energía para satisfacer la demanda, mientras que la gestión de los riesgos ha quedado en un segundo plano. Toda la evidencia disponible sugiere que la gestión de los riesgos planteados por el clima actual y futuro no es algo opcional sino algo absolutamente necesario, y además es probable que se convierta cada vez en más importante a medida que las consecuencias del cambio climático se materialicen.

0.5.1. Medidas propuestas a nivel internacional

La adaptación en su totalidad es un área extensa que abarca muchos sectores y estructuras socio-económicas, tal y como ha declarado la Convención sobre el Cambio Climático. Aunque la adaptación a estos impactos requerirá grandes inversiones y decisiones estratégicas, algunas acciones que podrían empezar a implementarse serían las siguientes:

- Aumentar la concienciación y el intercambio de conocimientos: Hay una necesidad de difundir y aumentar el conocimiento de los efectos del clima en el sector de la energía. Para poder tomar decisiones correctas es imprescindible: (a) mejorar el conocimiento

de estos temas por parte de la ciudadanía, y (b) proveer de acceso abierto a los datos climáticos para facilitar la investigación.

- Llevar a cabo una evaluación concreta de las necesidades vinculadas a los impactos del cambio climático en el sector: Este análisis del impacto climático es el primer paso hacia el desarrollo de estrategias de adaptación. Es necesario también incluir una evaluación de los costes asociados a los impactos, y de las consecuencias que se generarían si no se aplicara una correcta gestión del riesgo climático.
- Desarrollar herramientas de evaluación: Desarrollo de plantillas para proyectos que incorporen la vulnerabilidad y los riesgos del clima, ya sea retrospectivamente o durante la planificación y ejecución de los proyectos. Esto debería exigirse particularmente a los proyectos de gran envergadura. Es necesario desarrollar un catálogo de reglas sencillas de decisión para la integración del riesgo climático en la toma de decisiones (por ejemplo, cómo elegir ubicaciones para nuevas plantas de energía, teniendo en cuenta el clima). Los modelos de simulación podrían apoyar al desarrollo de estas medidas mediante análisis *what-if*.
- Desarrollar normas de adaptación para el sector de la energía: Estas normas deberían cubrir aspectos de ingeniería y requisitos de información. Podría ser acometido a través del sector de la energía en sí, o a través de organizaciones internacionales como la Agencia Internacional de Energía (AIE), la Asociación Internacional de Energías Renovables (IRENA), y las universidades o instituciones de investigación.
- Revisar los plazos de planificación y el uso de datos históricos y proyecciones para futuras inversiones: Los enfoques de planificación tradicionales que utilizan datos históricos pueden necesitar ser revisados y ajustados para reflejar las tendencias climáticas previstas como base para futuras inversiones en energía.
- Establecer planes de adaptación para las infraestructuras existentes. Algunas metodologías disponibles, como las auditorías ambientales, pueden ayudar a identificar los cambios necesarios en los protocolos de operación y mantenimiento, o incluso los estructurales que exijan hasta la reubicación de plantas existentes.
- Implementar medidas de adaptación específicas por tecnologías. En el informe completo se detallan una serie de propuestas particulares. A modo de resumen se presentan algunas:
 - Explorar la interacción entre la demanda de agua y su uso.
 - Comprender mejor los impactos del cambio climático sobre el potencial de recursos renovables.
 - Explorar las sinergias entre mitigación del cambio climático y la adaptación.
 - Identificar las opciones (tecnológicas y de comportamiento) para mejorar el ahorro y la eficiencia en generación y reducir la demanda pico eléctrica.
- Identificar los instrumentos de política necesarios para hacer frente a los impactos del cambio climático. Por ejemplo, instrumentos de política que apoyan la internalización de la adaptación en operaciones de energía; o los incentivos para permitir la planificación con plazos más largos.
- Fortalecer las estructuras de soporte: Aumentar la capacitación de los actores claves, incluyendo los responsables del sector de políticas energéticas, los reguladores y los operadores.

0.5.2. Medidas propuestas por los expertos para España

En la consulta con expertos, uno de los puntos en el que se vio necesario profundizar fue el relacionado con la investigación. Se consideró de vital importancia profundizar en el conocimiento de las dinámicas de cambio climático que permitieran mejorar la planificación por parte de los agentes del sistema energético. Algunos de los puntos que se percibieron como claves en las que profundizar se han organizado siguiendo la propuesta de marco de opciones de adaptación propuesta por el IPCC en el AR5.

Categorías de adaptación		Medidas para el sector energético español
Estructurales	Información	<ol style="list-style-type: none"> 1) Afinar las estadísticas de viento proporcionando los cambios esperados no solo en las velocidades medias a una determinada elevación sino también las distribuciones, para de esta manera poder estimar mejor los cambios en los potenciales eólicos. Sería ideal particularizarlo, en la medida de lo posible, también por cuencas. 2) De la misma manera que con el viento, sería muy provechoso estudiar los otros parámetros climáticos básicos: temperatura y régimen de lluvias, no solo en términos agregados sino en términos de distribución temporal y regional. Esto permitiría a su vez afinar en el estudio del impacto directo sobre la oferta y demanda energética. Tanto en este punto como el anterior, existen algunos trabajos ya realizados por parte de diferentes empresas energéticas (Endesa, Iberdrola, Gas Natural, Repsol, entre otras), que pueden servir de base para futuros trabajos. 3) Elaborar un histórico detallado de fenómenos extremos que permita proyectar, con una correcta base estadística, implicaciones a futuro. Sería positivo disponer de una base de datos, con criterios comunes, que incluya un histórico lo más amplio posible. Del análisis de esta información deberían alimentarse tanto en la Planificación Energética como las Especificaciones o Normas Técnicas constructivas del sector.
	Tecnología	<ol style="list-style-type: none"> 4) Desarrollar un análisis basado en modelos computacionales del impacto del cambio sobre el sistema energético nacional en su conjunto. En la actualidad existen algunos resultados para el nexo agua-energía que podrían servir de base para un estudio que integrara el resto de subsectores energéticos. 5) Hacer estimaciones por escenarios (tendenciales y disruptivos) para la demanda de calefacción y de refrigeración, mediante estudios <i>what-if</i>. 6) Realizar un análisis de los HDD y los CDD ponderados por población, incorporando además factores como la humedad que influyen de una manera muy relevante en la sensación térmica. Recoger también en estos análisis el impacto en la demanda de calefacción y refrigeración en la industria y en el tercer sector.

Categorías de adaptación		Medidas para el sector energético español
	Basadas en ecosistemas	7) Prestar una especial atención a los impactos derivados de la subida del nivel del mar sobre todas las infraestructuras energéticas operativas en la costa española. Del mismo modo, incorporar estas consideraciones en el estudio de viabilidad de nuevas infraestructuras a construir en dichas zonas. En este punto, serán de mucha ayuda los resultados del proyecto C3E que elaboró la Universidad de Cantabria para la OECC en 2012.
Estructurales - físicas	Nexos	8) Profundizar en el análisis de las interrelaciones entre los sistemas energético y agropecuario, con especial atención a los biocombustibles y sus necesidades de agua.
Sociales	Información	9) Diseñar una política de comunicación y difusión de estos resultados que consiga trasladar eficazmente al conjunto de la sociedad la importancia y urgencia de abordar esta problemática de manera integrada.
	Comportamiento	10) Fomentar una cultura empresarial nueva que prime el largo plazo frente al corto plazo en su planificación estratégica.
	Economía	11) Sería conveniente realizar estudios económicos más precisos en relación a las necesidades de financiación futuras vinculadas a las políticas de adaptación, tanto desde el sector público como privado. La pregunta a responder en este punto sería cuáles son los costes reales de la adaptación.
Institucionales	Leyes y regulaciones	12) Facilitar una planificación estratégica conjunta, tanto a nivel público como privado, de los ámbitos energético y climático. 13) Incorporar los riesgos regulatorios y de precios de CO2 en la planificación de la adaptación de cambio climático en el sector.
	Políticas y programas gubernamentales	14) Estudiar en profundidad las sinergias entre mitigación y adaptación: Para ello se propuso plantear el trabajo basado en escenarios base (2012) y futuros (2050 y 2100). Se consideró

Categorías de adaptación		Medidas para el sector energético español
		<p>importante valorar en términos económicos el ahorro que en las políticas de adaptación pueden tener determinadas políticas de mitigación.</p> <p>15) Continuar con el trabajo de integración de las conclusiones obtenidas en los diferentes estudios de Adaptación en Cambio Climático que identifique las sinergias existentes entre ellos. Este punto fue identificado como uno de los más importantes por parte de los expertos consultados. Quedó patente la conveniencia de plantear un trabajo intersectorial sobre adaptación al cambio climático que integre los resultados parciales que ya se han obtenido y que ayude con ello a adecuar la Planificación Energética pública y privada a los requerimientos detectados.</p>

Tabla 9: Propuestas de adaptación al cambio climático en el sector energético español

1. Introducción

“El calentamiento global es un hecho inequívoco. Desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no tienen precedentes. La atmósfera y el océano se han calentado, las cantidades de nieve y de hielo han disminuido, el nivel del mar ha crecido, y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado (...)”. (IPCC, 2013, p.4)

El Grupo de Trabajo I (WGI) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)⁴ en el Quinto Informe de Evaluación (AR5) plantea la magnitud del problema que nuestro planeta está sufriendo. El clima está cambiando; se ha modificado especialmente durante los últimos sesenta años, pero este cambio empezó antes, las desviaciones se vienen observando desde el principio del siglo XX.

La causa principal de todo esto es el uso masivo de recursos energéticos, principalmente de origen fósil, para satisfacer la creciente demanda de energía. Sus efectos en el próximo medio siglo son en gran medida inevitables y las consecuencias, si no hacemos nada para aliviarlo, serán irreparables para el mundo entero.

En las últimas décadas la cuestión del cambio climático se ha convertido en uno de los principales focos de interés internacional, lo que ha dado lugar a una gran actividad investigadora. A este respecto, la comunidad científica internacional liderada por el IPCC concluyó que existen dos enfoques principales para abordar el cambio climático: mitigación y adaptación.

Mitigación y adaptación han sido a menudo considerados como opciones alternativas en la lucha contra los efectos del cambio climático. La mitigación busca limitar el proceso de cambio climático futuro de dos maneras: mediante la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en sus fuentes o mediante el desarrollo de sumideros que pueden capturar los Gases de Efecto Invernadero (GEI) y mantenerlos separados de la atmósfera. Adaptación, en cambio, hace referencia al proceso de ajuste a los cambios esperados en el clima, con el fin de disminuir o evitar el daño, o incluso explotar las oportunidades beneficiosas si las hubiera (IPCC, 2014).

Lo cierto es que ambas aproximaciones: mitigación y adaptación, son necesarias. Los GEI tienen una larga vida en la atmósfera y una cierta inercia, por lo que los efectos de las emisiones se extienden en el tiempo. Incluso si dejamos de emitir GEI de inmediato, los ya emitidos propiciarán cambios climáticos de forma inevitable. A medida que nos damos cuenta de las dificultades de definición y obtención de los objetivos de mitigación, la adaptación se convierte en fundamental para gestionar y prevenir lo inevitable.

⁴ El IPCC se organiza en tres grupos de trabajo. El primero (WGI) estudia las bases físicas del cambio climático; el segundo (WGII) se dedica a analizar los impactos, la adaptación y la vulnerabilidad de los sistemas; por último, el tercer grupo de trabajo (WGIII) se centra en el análisis de las medidas de mitigación.

La mayor parte de la atención hasta ahora se ha centrado en el aspecto de mitigación, pero en los últimos tiempos, sobre todo debido a la toma de conciencia de que el cambio climático ya es en parte inevitable, las políticas de adaptación se han hecho cada vez más importantes.

Este informe estudia las posibilidades de adaptación del sistema energético (especialmente el sistema eléctrico), a los efectos del cambio climático. El sector energético es especialmente relevante debido a su doble carácter de causante y víctima del cambio climático. Por un lado, en los usos energéticos fósiles de forma generalizada se encuentra la principal causa del cambio climático, y, por otro lado, al mismo tiempo estos cambios provocan un impacto en ese mismo sistema energético. En este sentido, el concepto de adaptación de los sistemas de energía al cambio climático es cada vez más fundamental. Debe ser la base para el establecimiento de nuevas políticas energéticas que garanticen la seguridad de suministro mediante la conservación y adaptación de las infraestructuras energéticas.

Como se ha mencionado, los principales estudios que existen acerca de los efectos del cambio climático sobre diversos sectores, incluido el energético, se han centrado en la mitigación. Sin embargo en los últimos años han empezado a proliferar estudios también dedicados a la adaptación. El IPCC, como casi siempre, es el punto de referencia. La mayoría de los estudios se basan en los distintos informes de evaluación del IPCC, y en especial a los trabajos del WGII sobre la adaptación al cambio climático. El último informe del WGII en orden cronológico (IPCC, 2014) es parte del AR5.

Otro texto de referencia es el de Ebinger y el Banco Mundial (Ebinger and World Bank, 2011). Este compendio se ocupa más específicamente del sector energético. En él, los autores citan casos de estudio concretos sobre la adaptación del sector en Albania o México.

Por otro lado, varias instituciones han investigado sobre la adaptación de sistemas energéticos específicos. Por ejemplo, podemos encontrar estudios sobre el sector de la energía eléctrica de Asia y el Pacífico, o de la región del Mediterráneo; investigaciones sobre la adaptación en los países nórdicos y bálticos, las Islas Canarias o en Europa en general; informes que se refieren a la adaptación de la producción de energía y su uso en los Estados Unidos; documentos sobre los problemas del sector nuclear; proyectos relacionados con los países en desarrollo de África y algunos otros.

En este contexto, el presente informe pretende ofrecer un resumen completo del tema de adaptación al cambio climático en el sector energético, con un énfasis especial en la oferta y demanda eléctrica.

Después de esta introducción, el informe comienza ofreciendo, en su segunda sección, una visión general del estado del arte de la adaptación al cambio climático, basado principalmente en los escenarios propuestos por el IPCC. A continuación, la sección 3 propone un marco general de adaptación del sistema energético al cambio climático, un marco que guiará todo el análisis posterior. Siguiendo a este marco, en primer lugar se analizan los tres principales efectos del cambio climático: aumento de la temperatura, cambio en las precipitaciones y aumento de eventos extremos. Desde ahí, se estudian los impactos que cada uno de estos efectos genera en las cuatro principales variables del sistema energético: agua, recursos energéticos, oferta y demanda. Una vez planteados los efectos del cambio climático y sus impactos potenciales en el sector energético, la sección 4 ofrece una

prospectiva de la posible evolución en el tiempo de estos impactos. A la luz del estudio de los impactos del cambio climático sobre el sector energético de la sección anterior, la sección 5 presenta un compendio de las principales vulnerabilidades del sector, centrándonos en este caso en el lado de la oferta. Finalmente, la sección 6 presenta una serie de propuestas de adaptación del sector energético que intenten responder a los retos planteados.

2. Adaptación al cambio climático

2.1. Fuentes de información

Desde finales del siglo XX, después de la creación del IPCC en 1988, la celebración de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 1992 y la ratificación del Protocolo de Kioto en la COP-3 (Tercera Conferencia de la Partes) en 1997, la comunidad científica se ha volcado en el problema del medio ambiente y el cambio climático.

De entre las diversas maneras de afrontar el problema, aunque la mitigación copaba la gran mayoría de los esfuerzos, la estrategia de adaptación emergió como una forma importante de gestionar el cambio climático. Poco a poco, gracias a la conciencia de que no podemos evitarlo en su totalidad, la comunidad se ha movido en parte a la dirección de la adaptación. Gracias a esto, en la actualidad disponemos de una amplia literatura científica sobre adaptación al cambio climático.

El WGII es el grupo de trabajo del IPCC que evalúa la vulnerabilidad de los sistemas socioeconómicos y naturales al cambio climático, sus consecuencias y las opciones para adaptarse a él. Esta evaluación es general, no se centra solo en los sistemas de energía sino que cubre todos los sectores que podrían verse afectados por el cambio climático, como los recursos hídricos, los ecosistemas, la agricultura y los bosques, los sistemas costeros, la industria y la salud humana, entre otros. Todos estos análisis son abordados en el AR5 (IPCC, 2014), el informe más completo hasta la fecha acerca de esta problemática y donde se da cuenta de las diferentes soluciones existentes y las posibilidades de adaptación sectoriales al cambio climático.

Aunque sea el más importante, el IPCC no es el único grupo de expertos vinculados a la adaptación. Muchos otros científicos y grupos de investigación también se dedican a esta cuestión. Analizando los diferentes trabajos, se observa que todas las investigaciones difieren en algunos detalles, pero siguen básicamente un patrón común. Los informes sobre adaptación suelen tener dos secciones: la primera se refiere a los impactos del cambio climático sobre los sistemas que consideran, mientras que la segunda trata propiamente la adaptación de dichos sistemas al cambio climático. Esta división es una constante de las investigaciones científicas sobre adaptación, y tiene todo el sentido: antes de plantear las posibles soluciones es necesario identificar todos los impactos que el cambio climático genera en los distintos sistemas.

De entre todos los trabajos relacionados con adaptación, algunos simplemente ofrecen recomendaciones generales mientras que otros proponen soluciones más concretas a sectores o regiones específicas. Por ejemplo, el estudio “Impactos del cambio climático global en los Estados Unidos” (U.S. Global Change Research Program, 2009) no solo resume la ciencia del cambio climático y sus impactos esperados en los Estados Unidos, sino que también se ocupa de algunas de las iniciativas que la sociedad está adoptando o puede adoptar para responder al desafío climático.

Por su parte, Neumann y Price (2009) evalúan las amenazas y necesidades multidimensionales que el cambio climático impone en la infraestructura pública. Además, presentan opciones para mejorar

la capacidad de adaptación a través de inversiones del sector público e incluyen un análisis de la generación de energía y la infraestructura de transmisión.

Otro ejemplo es el Proyecto de Investigación PESETA (Ciscar et al., 2009). El objetivo principal de este proyecto es analizar posibles políticas de adaptación dentro de Europa. El foco se concentra más en la agricultura, las inundaciones fluviales, los sistemas costeros, el turismo y la salud humana que en materia de energía. Sin embargo, este proyecto refleja el compromiso de la Unión Europea sobre el problema de la adaptación. El trabajo nació a partir del estudio del Libro Blanco de la Comisión Europea (European Commission, 2009a), donde se señalaba la necesidad de conocer mejor las posibles consecuencias del cambio climático en Europa. Al informe anterior le acompañó otro centrado en la evaluación de los impactos (European Commission, 2009b). Estos pasos preliminares culminaron con la adopción en 2013 de la Estrategia Europea de Adaptación al Cambio Climático, cuyo horizonte de acción es 2013-2020. Uno de los resultados más interesantes que hasta la fecha se ha generado en esta Estrategia (ver Figura 18) se recoge en el documento "Adapting infrastructure to climate change" que acompaña a la Estrategia. Se trata de una tabla que califica el nivel de impacto (de 1 a 3) debido a diferentes eventos climáticos vinculados al cambio climático, sobre las infraestructuras energéticas.

Technology	Δ air temp.	Δ water temp.	Δ precip.	Δ wind speeds	Δ sea level	flood	heat waves	storms
Nuclear	1	2				3	1	
Hydro			2			3		1
Wind onshore				1				1
Wind offshore				1	3			1
Biomass	1	2				3	1	
PV							1	1
CSP						1		1
Geothermal						1		
Natural gas	1	2				3	1	
Coal	1	2				3	1	
Oil	1	2				3	1	
Grids	3					1	1	3

Figura 18: Impacto esperado en infraestructuras energéticas según la Estrategia Europea de Adaptación

A nivel español, el hito principal ha sido la elaboración del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático cuyo primer programa de trabajo se aprobó en 2006 viniendo precedido por los trabajos del ECCE (Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático), tal y como se observa en la Figura 19.

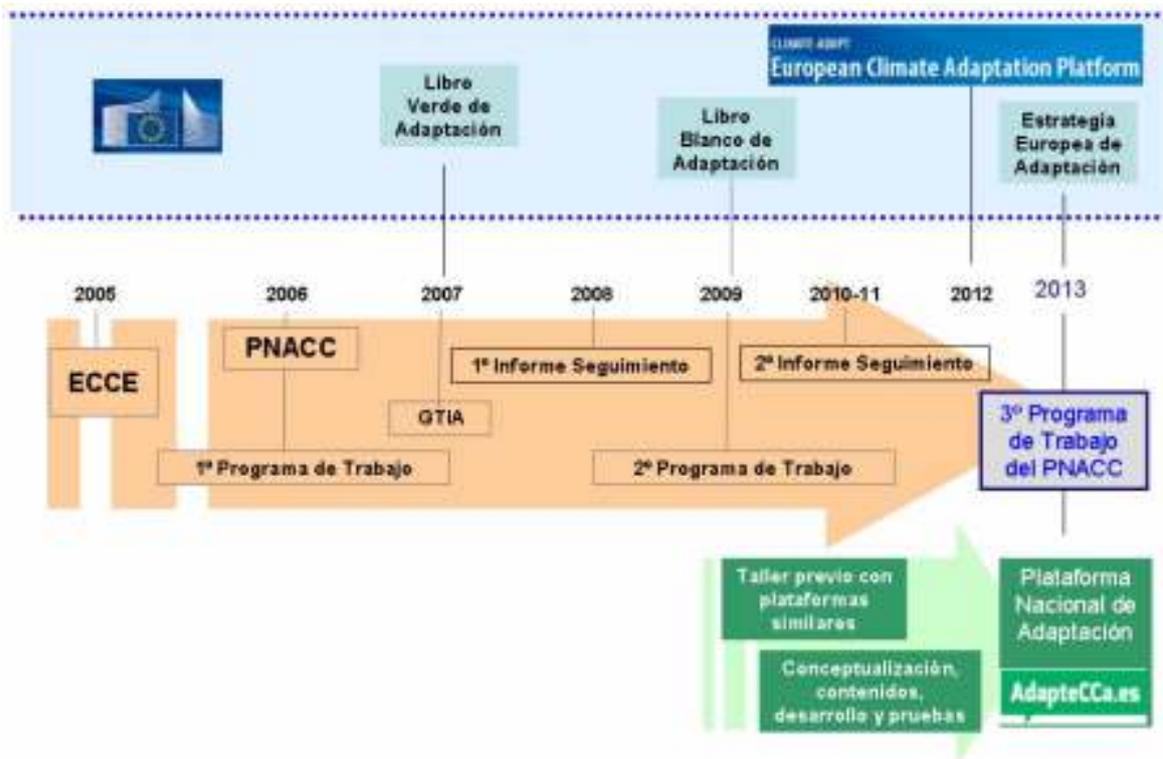


Figura 19: Hitos de la adaptación al cambio climático en la UE y en España entre 2005 y 2013

Con respecto a la adaptación más concreta del sector energético, algunos otros científicos se han centrado específicamente en su análisis. Los sistemas energéticos son uno de los principales agentes que provocan el cambio climático, de ahí que la producción científica sea prolífica sobre este asunto. Entre esos trabajos está el de Wilbanks (Wilbanks et al., 2008) en el cual se resume lo que se sabe sobre los efectos del cambio climático en producción de energía y su uso en los Estados Unidos, y la necesidad de ampliar la base de conocimientos sobre los efectos del cambio climático. Otras organizaciones como el Banco Mundial, el Banco Asiático de Desarrollo y HELIO Internacional han realizado también estudios sobre adaptación. Al contrario que muchos estudios similares, estos se diferencian porque incluyen un conjunto de recomendaciones sobre la adaptación de los sistemas energéticos, recomendaciones que no solo van para los gobiernos sino también para los usuarios.

- El trabajo del Banco Mundial (Ebinger y World Bank, 2011) consiste en un compendio actualizado de lo que se conoce acerca de la variabilidad del clima, de las tendencias climáticas proyectadas y de sus impactos en el suministro y la demanda de servicios energéticos. Analiza las medidas de adaptación que van surgiendo y las herramientas que plantean para la gestión de los impactos climáticos. También tiene en cuenta la integración de las consideraciones climáticas en los procesos de planificación y las prácticas operativas. Concluye finalmente con un resumen de las acciones esenciales para apoyar la adaptación, entre las que destaca que, sin una red de información sobre el clima, no podemos apoyar correctamente la toma de decisiones.
- El Banco Asiático de Desarrollo (Banco Asiático de Desarrollo, 2012) realizó un estudio que buscaba crear conciencia sobre la exposición y la vulnerabilidad del sector de la energía en

Asia y el Pacífico al cambio climático. También identificó las medidas de adaptación ingenieriles y no ingenieriles disponibles para cada fuente de generación de energía, así como para el uso y la distribución final de la energía eléctrica. El informe destaca también la importancia de mejorar significativamente la coordinación y planificación entre los organismos clave de energía: los ministerios gubernamentales, los productores de energía, los reguladores y los usuarios, para hacer frente a las tensiones inducidas por el clima.

- Por parte de HELIO Internacional (Williamson et al., 2009), se realizó un estudio que proporcionaba una serie de recomendaciones para ayudar a reforzar la capacidad de recuperación de los sistemas energéticos.

Algunas otras investigaciones han profundizado en el tema de adaptación de los sistemas energéticos en regiones concretas. Estos estudios han llevado a cabo un análisis en profundidad sobre los sistemas de energía. Los resultados difieren mucho de un caso a otro, ya que dependen de las circunstancias y condiciones específicas.

- Ruth y Linn (2006) exploran los impactos potenciales del cambio climático en el gas natural, la electricidad y el uso de combustible para calefacción en el sector residencial y comercial en el estado de Maryland en EE.UU. El estudio llega a la conclusión de que no hay una necesidad inmediata de inversión a gran escala en sistemas de generación de electricidad adicionales para satisfacer las demandas de energía inducidas por el cambio climático, con la excepción de la demanda de electricidad comercial. Esta consideración se debe al hecho de que la demanda de energía en la región aumentará considerablemente en el futuro, pero por razones que no están directamente relacionadas con el cambio climático. Los autores sólo sugirieron un ajuste de los perfiles de uso de energía en esa región.
- Por su parte, (Kopytko y Perkins, 2011) analizan el problema de la adaptación y mitigación en el uso de las centrales nucleares. Los autores revisaron varias plantas de energía nuclear de la costa (15 reactores en 9 sitios costeros en EE.UU. y 44 reactores en 15 sitios del interior de Francia) para desarrollar cinco criterios que sirvieran para evaluar el dilema adaptación-mitigación. Además, en una sección del documento se examinan los impactos de eventos extremos en los reactores del interior en Francia y en los reactores costeros en los Estados Unidos. En dicha sección se presentan algunas medidas de adaptación de las diversas plantas a estas amenazas. Son medidas y resultados muy a tener en cuenta a la hora de desarrollar estrategias coherentes y útiles de adaptación para plantas nucleares.
- En la conferencia de energía y agua del Instituto Canario de la tecnología - ITC (Piernavieja Izquierdo, 2015) se presentaron algunos resultados del proyecto ITC CLIMATIQUE (Observatorio Cambio Climático Canarias - Souss-Massa-Drâa, 2015) cuyos objetivos eran analizar los impactos de las variables climáticas en el sistema energético y la elaboración de estrategias particulares para cubrir el tema de adaptación de las plantas de energía térmica, las tecnologías de energías renovables y de la red eléctrica en las Islas Canarias y en la región africana de Souss-Massa-Drâa.
- Finalmente, en el informe del Banco Mundial (Ebinger y World Bank, 2011) los autores presentaron dos estudios específicos sobre el sistema energético de Albania y los servicios públicos de electricidad de México, además del análisis general de acciones de apoyo a la

adaptación. El Banco Mundial, junto con el Gobierno de Albania, llevó a cabo una serie de talleres en Tirana en 2009 sobre los riesgos climáticos y la vulnerabilidad en el sector energético del país, así como las oportunidades que presenta el cambio climático. Llegaron a la conclusión de que hay varias acciones medidas que Albania podría adoptar para mejorar su sistema energético, especialmente el hidroléctrico. El anexo sobre México presentó un plan específico cuyo objetivo era definir las actividades y mecanismos de control que se deben seguir para restablecer el servicio eléctrico después de los desastres naturales.

Por último, algunos artículos técnicos e informes han tratado el problema de la adaptación bajo un punto de vista más particularizado.

IDDR, CIRED-Meteo France y CIRCE produjeron el informe: “El futuro del Mediterráneo” (IDDR, 2009). En él se presenta un marco general para la implementación de la adaptación en el contexto mediterráneo, basado en una serie de aclaraciones importantes y acompañado de recomendaciones operativas. La cuestión tratada en particular era el vínculo entre la adaptación y la mitigación. Con demasiada frecuencia, estas dos estrategias fueron consideradas como opciones alternativas en la lucha contra los efectos del cambio climático, y esta distinción oculta a veces una serie de interrelaciones existentes entre la mitigación y la adaptación. Hay acciones de adaptación que tienen consecuencias sobre la mitigación y viceversa: acciones de mitigación que tienen consecuencias sobre la adaptación. El Informe Técnico de la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA, 2005) se preparó con el objetivo de proporcionar información sobre la vulnerabilidad en Europa, y facilitar el intercambio de información entre los países miembros de la Unión que contribuyese a la discusión sobre las estrategias de adaptación y así identificar las necesidades de información actuales y futuras. Lo singular aquí es la definición particular de vulnerabilidad que plantean los autores: “los impactos residuales del cambio climático después de que se han aplicado las medidas de adaptación”. Esto significa que la vulnerabilidad se considera como resultado de las medidas de adaptación, lo que resulta de gran utilidad para identificar los retos y las estrategias de adaptación al cambio climático.

Otro trabajo a destacar entre aquellos que ofrecen un análisis más pormenorizado es el ya mencionado de HELIO Internacional (Williamson et al, 2009) cuyo enfoque era ayudar a identificar las políticas y medidas que mejor pudieran facilitar las actividades de adaptación. Para ello desarrollaron un conjunto de indicadores para evaluar la vulnerabilidad y resiliencia de sistemas energéticos nacionales. Eligieron diez países subsaharianos como primer campo de pruebas de sus indicadores, porque África es uno de los continentes más vulnerables al cambio climático, como ya destacó el WGII del IPCC. En comparación con la mitigación, cuya métrica común utilizada durante muchos años ha sido la reducción de "toneladas equivalente de CO₂", la evaluación de las medidas de adaptación se encuentra todavía en su infancia. No hay parámetros e indicadores comúnmente aceptados que permitan comparar las necesidades de adaptación. Así, HELIO Internacional desarrolló una metodología y una serie de indicadores en línea con el principio rector de que la métrica subyacente fuera accesible para la mayoría de los países, y en el caso de que se requieran cálculos para derivar un indicador, estos debían ser simples.

Teniendo en cuenta los estudios disponibles actuales sobre la adaptación al cambio climático, se observa que la mayoría se centran en los sistemas naturales y humanos, y no específicamente en el

sistema energético. En el presente informe se intentará cubrir en la medida de lo posible este hueco, particularizándolo además para el caso español en los casos en que sea posible hacerlo.

2.1. Escenarios de cambio climático

El primer paso de la investigación sobre la adaptación es definir los escenarios de cambio climático posibles para, a partir de ellos, analizar los impactos sobre los diversos sistemas.

Como ya anticipamos en la sección anterior, el IPCC es el organismo internacional líder en la evaluación del cambio climático. El propósito esencial de los miles de científicos de todo el mundo que contribuyen a la labor del IPCC sobre una base voluntaria es asegurar una evaluación objetiva y completa de la literatura actual sobre el cambio climático y sus estrategias de abordaje: la adaptación y mitigación. Casi todos los investigadores de todo el mundo que investigan la adaptación al cambio climático basan sus estudios sobre el trabajo del IPCC, y en especial utilizan sus escenarios climáticos, los *Representative Concentration Pathways* (RCP), es decir, las sendas posibles de evolución de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Los RCPs son un conjunto de cuatro escenarios desarrollados como base para el modelado a corto, medio y largo plazo del cambio climático.

La importancia de estos RCPs es crucial, por eso, antes de examinar los impactos del cambio climático, es conveniente familiarizarse con el último trabajo del IPCC: el informe AR5, donde se definen estos escenarios RCP.

El WGI del IPCC evalúa los aspectos físicos del sistema climático y el cambio que está experimentando en la primera parte del AR5 (IPCC, 2013). En este estudio, los diversos miembros del WGI introducen este nuevo conjunto de escenarios de cambio climático - los RCPs - que son instrumentos útiles para elaborar nuevas proyecciones del cambio climático y su impacto en los sistemas naturales, humanos y de la energía. Los RCPs son un importante desarrollo en la investigación del clima y proporcionan una base potencial para una mayor investigación y evaluación, incluyendo la mitigación de emisiones y análisis de impacto. Además, estos escenarios son el producto de una colaboración innovadora entre científicos que se dedican a modelar distintos aspectos como el clima, los ecosistemas terrestres y los inventarios de emisiones. El producto resultante forma un conjunto muy completo de datos con altas resoluciones espaciales y sectoriales para un período que se extiende hasta 2100.

La metodología utilizada para elaborar este conjunto de escenarios de clima e impactos es completamente nueva. El enfoque utilizado en la AR5 es totalmente diferente del utilizado en las evaluaciones anteriores.

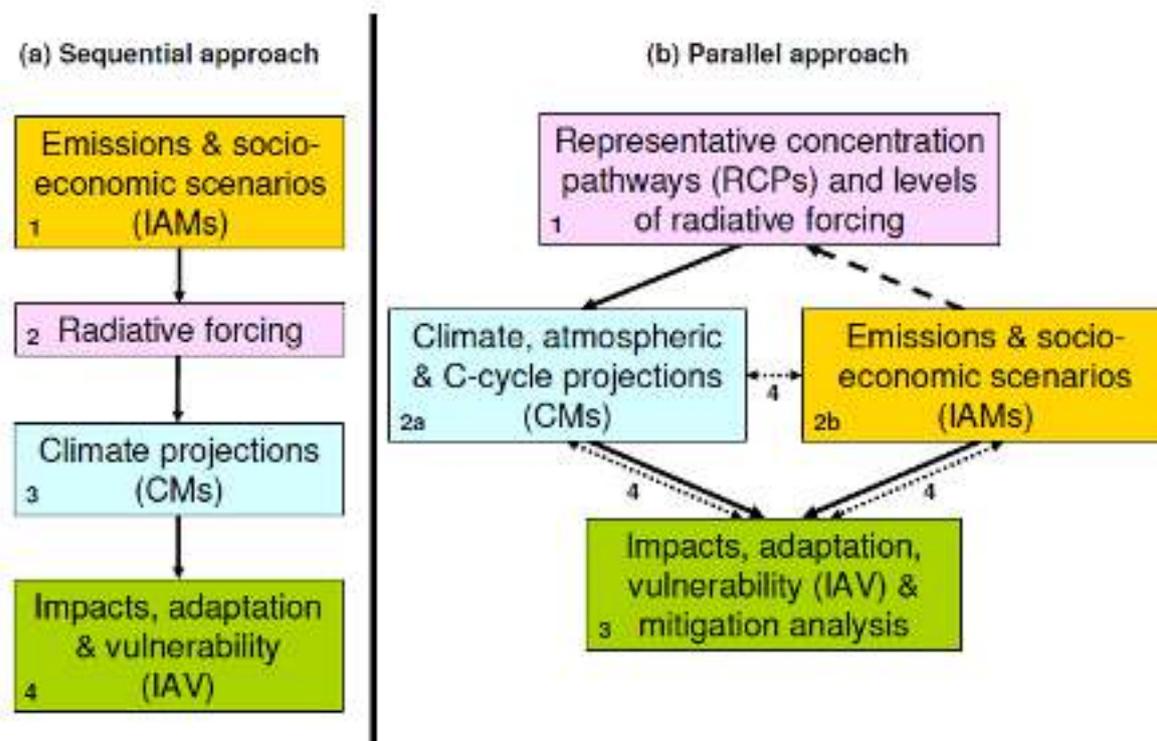


Figura 20: Modelos de evaluación del IPCC

La Figura 20 (Moss et al., 2007) muestra las diferencias entre la vieja y la nueva metodología. El nuevo enfoque paralelo proporciona una mejor integración entre cada uno de los sistemas.

La motivación que hay detrás de este esfuerzo es, en primer lugar, que la comunidad científica necesita nuevos escenarios, como ha señalado Moss et al. (2010), para el correcto funcionamiento de la actual generación de modelos. En segundo lugar, era necesario definir escenarios que ayudaran a explorar explícitamente el impacto de las diferentes políticas sobre el clima. Por último, surgió la necesidad de estudiar la adaptación en más detalle, y para ello de nuevo los escenarios eran fundamentales.

Es importante señalar que el desarrollo de los escenarios RCP trascendió el propio trabajo del IPCC. De esta manera, la nueva metodología de enfoque de análisis en paralelo quedó estructurada de la siguiente forma:

1. Desarrollo de un conjunto de escenarios que definieran las emisiones, la concentración y las trayectorias en el uso del suelo (RCPs).
2. Una fase de desarrollo paralelo que consiste en la ejecución de modelos climáticos y el desarrollo de nuevos escenarios socioeconómicos.
3. Una fase de integración y difusión final.

El principal objetivo de la primera fase (el desarrollo de las RCPs) era proporcionar información sobre las posibles trayectorias de desarrollo para los principales agentes causantes del cambio climático,

en consonancia con la literatura actual sobre escenarios, que permitiera el posterior análisis por los modelos climáticos (CMS) y los modelos de evaluación integrada (IAM). El punto crucial del nuevo enfoque era la cuantificación del forzamiento radiativo (RF). El procedimiento es completamente diferente del enfoque secuencial anterior, en que las emisiones y escenarios socioeconómicos suministraban la evaluación del forzamiento radiativo. De esta forma, los RCPs no están asociados únicamente a un nivel de emisiones o a un escenario socioeconómico concreto, sino que pueden ser el resultado de diferentes escenarios económicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionales en el futuro.

El forzamiento radiativo se define en AR5, tal y como se hacía en las evaluaciones anteriores del IPCC, como el cambio en el flujo neto hacia abajo (de onda corta + de onda larga) en la tropopausa (la zona de transición entre la troposfera y la estratosfera) después de permitir temperaturas estratosféricas que reajusten el equilibrio radiativo, mientras se mantienen otras variables de estado, tales como la temperaturas de la troposfera, el vapor de agua y la cobertura de nubes fijas en los valores no perturbados (IPCC, 2013, p.53). De forma más sencilla, el forzamiento radiativo es una medida del cambio neto en el balance energético del sistema de la Tierra en respuesta a alguna perturbación externa, de forma que un RF positivo conlleva un calentamiento y un RF negativo un enfriamiento. Las perturbaciones externas son principalmente actividades humanas que han cambiado y seguirán cambiando la superficie y la composición atmosférica de la Tierra. Algunos de estos cambios tienen un impacto directo o indirecto sobre el balance energético de la Tierra y son impulsores del cambio climático, y son: el cambio directo en la composición atmosférica a través de las emisiones de gases o partículas (CO₂, CH₄, N₂O, los CFC, halocarbonos); el cambio indirecto en la composición atmosférica a través de la química atmosférica; la interacción antropogénica aerosoles-radiación (ari) y la interacción de aerosoles-nubes (ACI); cambios en los usos de la tierra (como la deforestación); e impulsores naturales como forzamientos solares y volcánicos.

Todos estos factores agregados producen un forzamiento radiativo total positivo, lo que ha dado lugar a una absorción de energía en el sistema climático. La mayor contribución al forzamiento radiativo total es causada por el aumento de la concentración atmosférica de CO₂ desde 1750 (IPCC, 2013, p.13).

Es importante señalar que los escenarios utilizados en el WGI se han centrado en las emisiones antropogénicas y no incluyen los cambios en los impulsores naturales.

Para el AR5 del IPCC, la comunidad científica identificó diferentes escenarios de emisiones específicos (incluyendo datos sobre el uso y cobertura del suelo) a partir de la literatura revisada por pares, de forma que todo el espectro de escenarios estuviera representado, y de este modo facilitar que se trabajara en un amplio espacio climático. Estos recibieron la etiqueta "Vías de concentración representativas" (RCPs). "Representativa" significa que cada RCP proporciona solo uno de los muchos escenarios posibles que conducirían a las características específicas de un forzamiento radiativo concreto. Por su parte, el término "vía" subraya que no sólo los niveles de concentración a largo plazo son de interés, sino también la trayectoria elegida para llegar a ese resultado.

A la hora de nombrar a estos RCPs, se les identificó por su objetivo de forzamiento radiativo total aproximado en el año 2100 con relación a 1750: 2,6 W/m² para RCP2.6; 4,5 W/m² para RCP4.5; 6,0 W/m² para RCP6.0 y 8,5 W/m² para RCP8.5.

En 2011, el RF total antropogénico en relación a 1750 fue 2,29 W/m², y se ha aumentado más rápidamente desde 1970 que durante décadas anteriores (IPCC, 2013, p.13).

El segundo elemento clave en el AR5 tiene que ver con los modelos. El CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) es el nuevo experimento multi-modelo (coordinado por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas) que presenta un nivel sin precedentes de información sobre la cual basar las evaluaciones de la variabilidad climática. CMIP5 es mucho más amplio que el multi-modelo CMIP3 precedente. CMIP5 tiene más del doble de los modelos y muchos más experimentos. Además, en CMIP5 se tratan un mayor número de agentes de forzamiento y de forma más completa.

El resultado de todo este proceso en paralelo es la realización de proyecciones de cambios en el sistema climático. Las proyecciones para las próximas décadas muestran patrones espaciales del cambio climático similares a los previstos para finales del siglo XXI, pero con menor magnitud.

Como hemos visto, el enfoque utilizado en el AR5 por la comunidad científica es totalmente diferente del enfoque secuencial anterior. Esta disimilitud provoca diferencias entre los resultados del análisis. Las predicciones del cambio climático y los impactos derivados de las proyecciones de aproximación y RCPs escenarios paralelos son diferentes de los obtenidos a partir del enfoque secuencial y los escenarios del SRES anteriores. Sin embargo, la mayoría de estudios e investigaciones sobre adaptación se han realizado con la base del AR4, lo que abre una puerta muy grande a la comunidad investigadora para ir adaptando estudios precedentes a esta nueva y más precisa metodología.

2.2. El contexto energético español

Una buena manera de entender el sistema energético español es analizando la foto fija del último año del que se tienen datos, ver cuál ha sido la senda seguida para llegar a ella y anticipar en la medida de lo posible lo que se espera en el futuro.

Tener esta visión, aunque sea necesariamente limitada, es necesario para poder entender qué sector es aquel sobre el que se pretende plantear una política de adaptación.

Según el Observatorio de Energía y Sostenibilidad en España (OSEE, 2014), el sector energético español consumió en 2013 un total de 5,93 EJ de energía primaria, emitió 235 Mt de CO₂ (un 94% del total de CO₂ español), y generó un valor añadido de 33.900 M€, correspondiente a un 3,7% del PIB. La Figura 21 presenta la evolución del consumo de energía per cápita entre el año 2000 y el 2013, mientras que en la Figura 22 se aprecia la evolución del consumo total de energía primaria desagregado por fuentes.

El año 2013 fue un año de caída del consumo final, que se vio reducido en un 3,5% respecto a 2012, continuando la tendencia observada en 2012 y 2011. Por el contrario, invirtiendo la tendencia

respecto al año anterior, la intensidad energética primaria disminuyó, observándose un descenso del 5,5%. Esto se explica en parte por el descenso del peso de carbón y el gas natural en el mix (reducción de los consumos en un 25,6% y un 7,5% respectivamente), así como el aumento en el peso de las energías renovables, especialmente la hidráulica (aumento del 79,0% en energía primaria respecto a 2012).

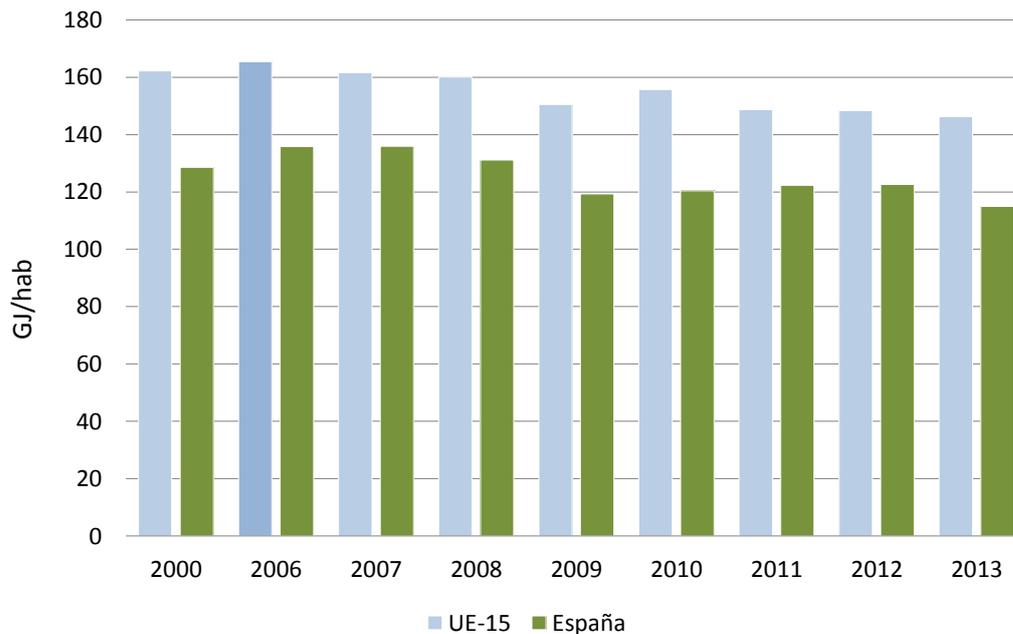


Figura 21: Consumo de energía primaria per cápita. España 2000-2013

Asimismo, se observa un descenso de las importaciones junto con un aumento de las exportaciones. Las importaciones totales se redujeron en un 6,0%, con descensos particularmente relevantes en la importación de derivados del petróleo y carbón (11,8% y 24,4% respectivamente). Por otro lado, la exportación de derivados del petróleo aumentó un 9%. Todos estos cambios hacen que el descenso en el consumo de energía primaria sea más acusado que el descenso en el consumo de energía final e indican un aumento de la eficiencia en el sistema energético español en 2013, lo que constituye un cambio de tendencia respecto a los dos años anteriores.

Las emisiones de CO₂ asociadas a energía primaria disminuyeron el 7% en 2013, debido tanto a la menor importación de combustibles fósiles, especialmente el carbón, como a la mayor participación de las renovables en el mix eléctrico respecto a 2012, en particular la energía hidráulica. Puede observarse como en esta ocasión, la reducción en el consumo de energía primaria tiene su reflejo en una reducción de las emisiones en el sistema energético español.

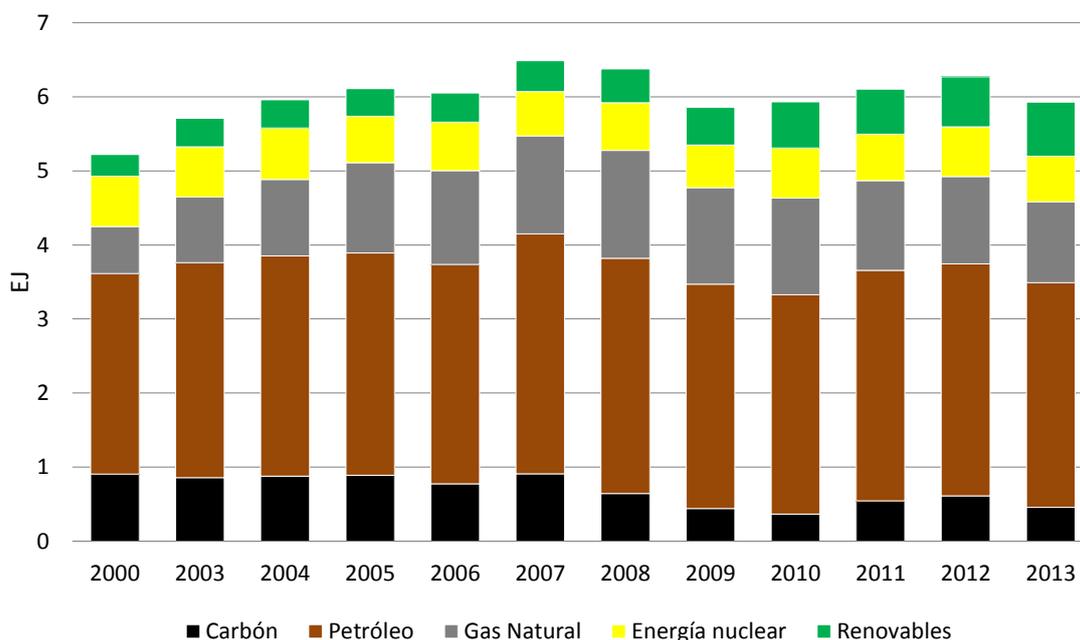


Figura 22: Consumo de Energía Primaria en España. España 2000-2013

El nivel de dependencia energética de España respecto al exterior sigue siendo muy alto y, pese a descender ligeramente respecto a 2012 hasta el 86% en 2013, continúa muy por encima de la media europea. Aunque el alto nivel de diversificación de suministradores de gas natural y petróleo mitiga mucho los riesgos de esta dependencia, el sector energético, y por consiguiente también la economía española, siguen expuestos a un importante riesgo de precio de estos combustibles.

En lo que respecta a la participación de las distintas tecnologías (ver Figura 22Figura 23), debe destacarse en 2013 el significativo descenso de la generación eléctrica con carbón, siendo sustituido principalmente por la generación hidráulica y otras renovables como la eólica, o la solar. Los biocarburantes cayeron mucho respecto a 2012 (un 58% en consumo final). La mayor contribución de las renovables a la matriz de energía primaria sigue correspondiendo a biomasa, eólica e hidráulica (cuya contribución ha sido la que más se ha incrementado en 2013). La energía solar ha experimentado un crecimiento significativo y se acerca a la hidráulica en cuanto a importancia. En total, las renovables supusieron en 2013 el 12,3% de la energía primaria (un aumento de más de dos puntos porcentuales respecto a 2012), incrementando notablemente su contribución a la producción de energía eléctrica (del 30,5% en 2012 al 41,1% en 2013).

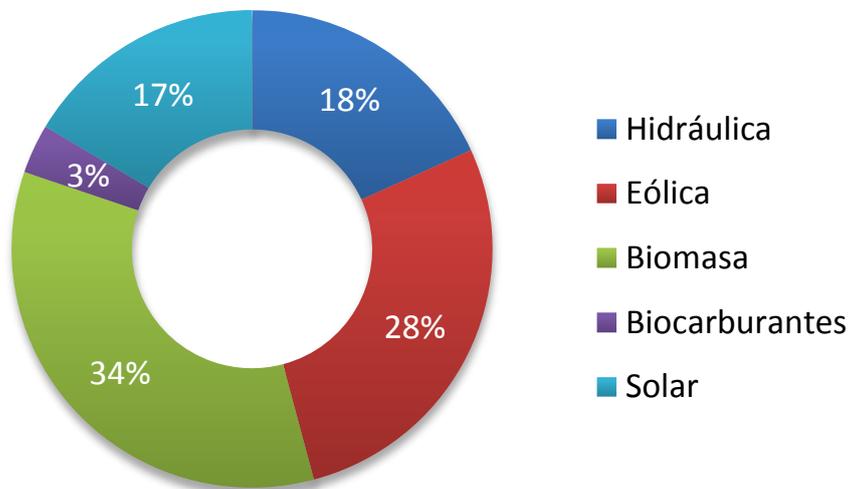


Figura 23: Energías renovables en energía primaria. España 2013

Respecto a los combustibles fósiles, el gas natural y el carbón pierden peso en la matriz de energía primaria. Ocurre lo mismo con los productos derivados del petróleo, mientras que el peso del crudo aumentó en 2013.

En cuanto al análisis sectorial, lo más llamativo es que el transporte de mercancías ha seguido descendiendo por sexto año consecutivo a un ritmo aún mayor (en un 14% respecto a 2013). El transporte de pasajeros en 2013 se ha mantenido prácticamente constante en términos globales respecto a 2012, si bien el transporte de pasajeros por avión se duplicó en dicho período. En términos absolutos, en cualquier caso, el transporte sigue siendo el sector que más energía consume (un 23%) y el que más emisiones de CO₂ causa (26%).

Es interesante analizar también la demanda de hidrocarburos, especialmente la de los productos petrolíferos (Figura 24) y el gas (Figura 25), a partir de datos de CORES. En ambos casos nos encontramos con un pico de demanda en torno al año 2007-2008, seguido de una disminución continuada, más acusada en el caso del gas.

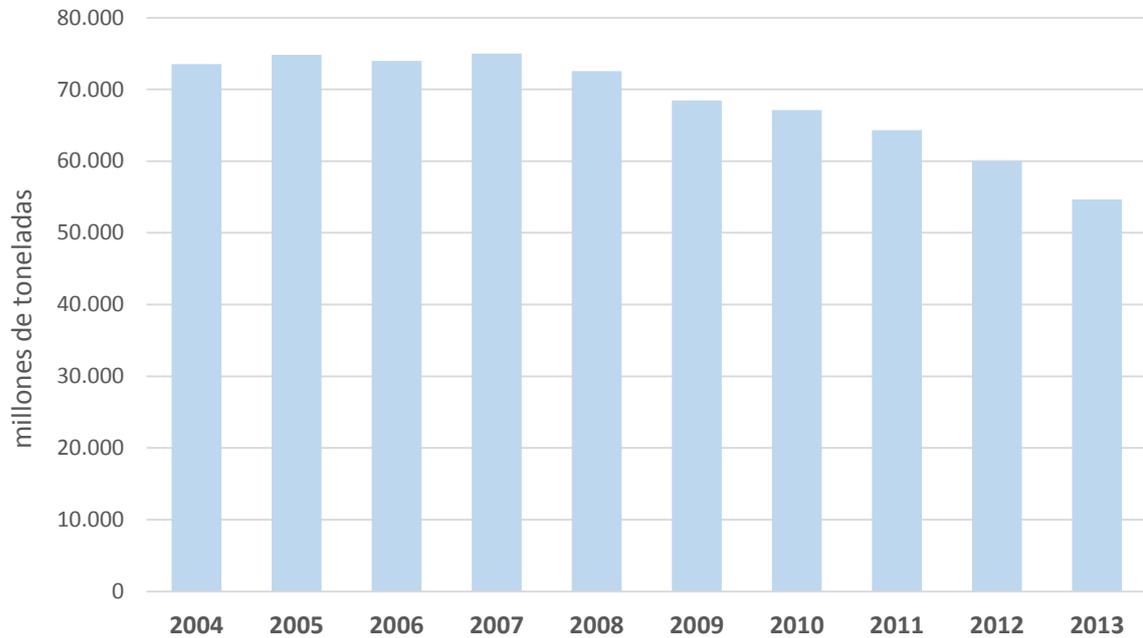


Figura 24: Evolución de la demanda de productos petrolíferos

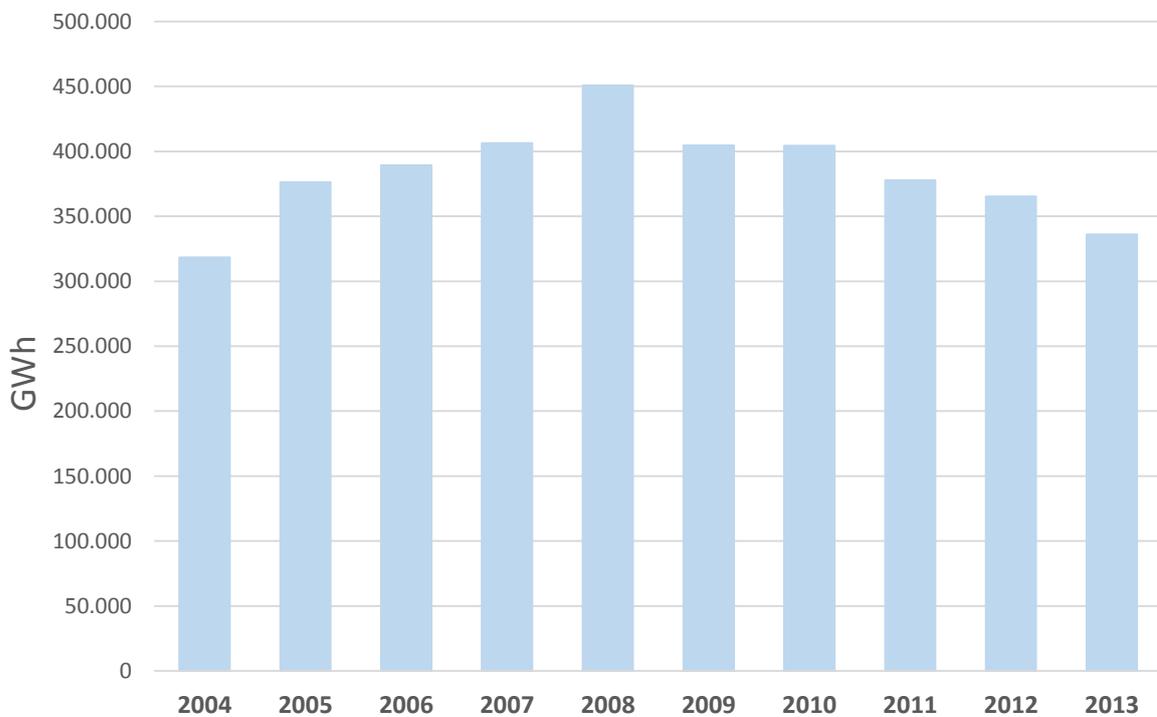


Figura 25: Evolución de la demanda de gas

En relación al sector eléctrico, y siguiendo siempre los datos que ofrece REE, la Figura 26 muestra la ubicación de las centrales de generación eléctrica en la España peninsular a diciembre de 2014. El mapa indica además la potencia instalada en cada central fotovoltaica y eólica.



Figura 26: Centrales de generación eléctrica en España. Diciembre de 2014

Por otro lado, la Figura 27 muestra cómo se distribuye la potencia eléctrica instalada en España por tecnologías. Se puede observar que no hay una tecnología dominante, sino que la diversificación en la generación eléctrica es notable. Este hecho puede resultar muy beneficioso a la hora de establecer políticas de adaptación al cambio climático pues permite mucha flexibilidad para cubrir la demanda.

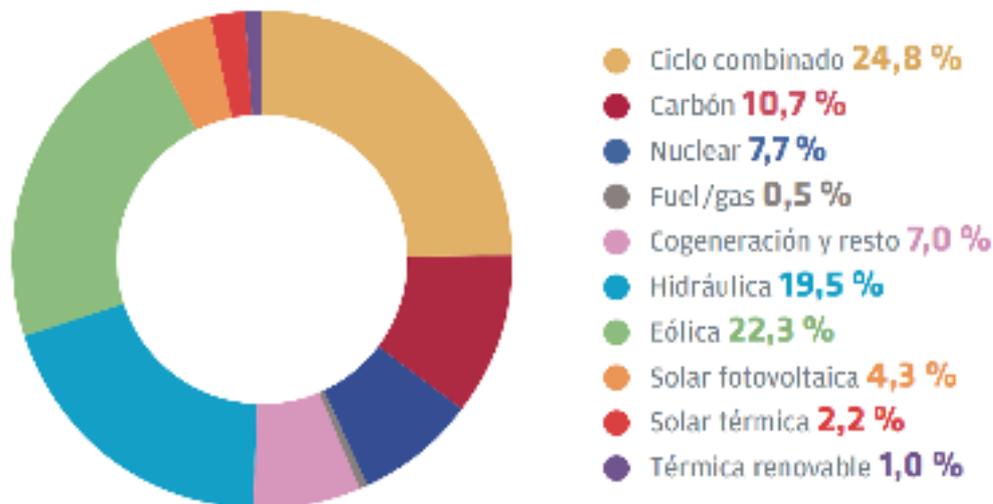


Figura 27: Potencia eléctrica instalada en España por tecnologías. 2014

Dentro de este mix de oferta energética, conviene analizar en detalle la oferta hidráulica debido a su especial vulnerabilidad al cambio climático. En primer lugar, la Figura 28 muestra la evolución de la producción hidroeléctrica en España en el periodo 2010-2014. En él nos encontramos dos ciclos bien diferenciados. Por un lado, de 2010 a 2012, la producción hidráulica tuvo un descenso muy acusado debido a unos años de baja pluviosidad. Por el contrario, desde 2012 a 2014, se produjo el ciclo inverso.

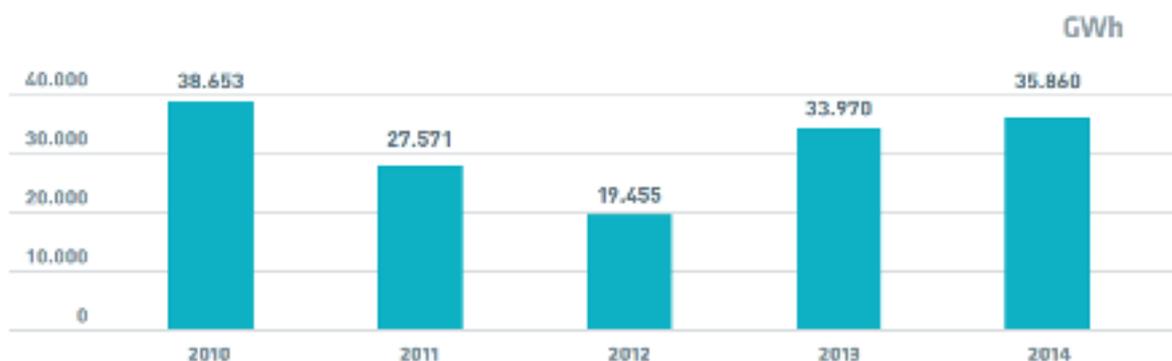


Figura 28: Evolución de la producción hidroeléctrica en España. 2010-2014

También es interesante tener presente cómo está distribuida la capacidad de generación hidroeléctrica por cuencas en España. La Figura 29, ofrecida también por REE, recoge esta información junto con las reservas hidráulicas a diciembre de 2014 tanto para los embalses de régimen anual como los de régimen hiperanual⁵.

⁵ Los embalses de régimen anual son aquellos en los que, supuesto el embalse a su capacidad máxima, el vaciado del mismo se realizaría en un período inferior a un año. Los de régimen hiperanual, son aquellos en los que el tiempo de vaciado es superior al año.



Figura 29: Distribución de la potencia hidroeléctrica instalada en las diferentes cuencas y sus reservas. Diciembre 2014.

Respecto a la evolución de la demanda eléctrica, la Figura 30 muestra cómo el crecimiento sostenido en las décadas de los 90 y los 2000 se frena bruscamente en 2008, con una caída significativa que se recupera tímidamente en 2010 y que vuelve a descender hasta 2014.

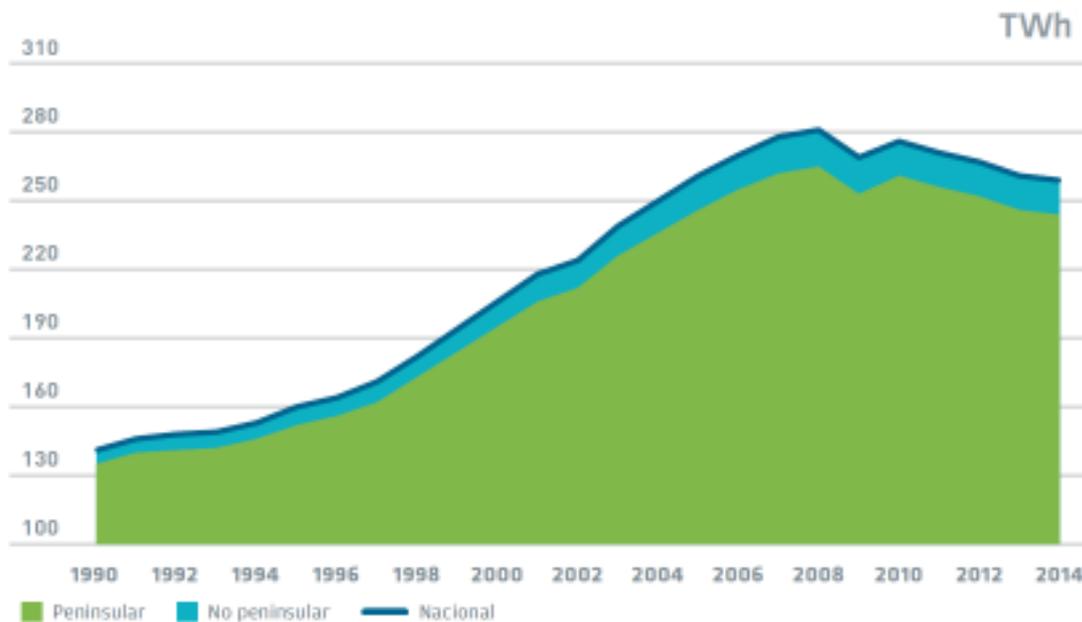


Figura 30: Evolución de la demanda eléctrica (b.c.)⁶ en España

Finalmente, si la Figura 27 mostraba la potencia instalada por tecnologías, la Figura 31 muestra cómo cada tecnología ha contribuido a cubrir la demanda energética total. Llama especialmente la atención la escasa aportación de los ciclos combinados dado el porcentaje de potencia instalada.

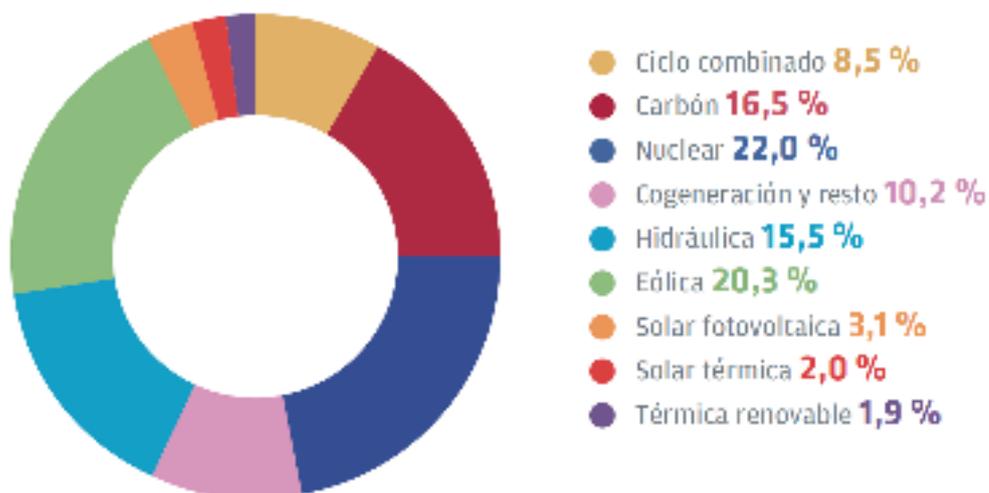


Figura 31: Cobertura de la demanda de energía en España por tecnologías. 2014

Esto se puede entender analizando la Tabla 10, que recoge la potencia instalada de cada tecnología en España desde 2006 hasta 2015. Se puede ver que entre 2006 y 2010, la potencia instalada de ciclos combinados aumentó un 63% con el objetivo de cubrir unas previsiones de aumento de demanda

⁶ Demanda b.c. (barras de central) es la energía inyectada en la red procedente de las centrales de régimen ordinario, régimen especial y de las importaciones, y deducidos los consumos en bombeo y las exportaciones. Para el traslado de esta energía hasta los puntos de consumo habría que detraer las pérdidas originadas en la red de transporte y distribución.

eléctrica que finalmente no se cumplieron, dejando de este modo un parque de generación por ciclos combinados de gas muy infrutilizado.

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Hidráulica convencional y mixta	14,983	14,990	15,038	15,038	15,048	15,055	15,269	15,269	15,275	15,275
Bombeo puro	2,517	2,517	2,517	2,517	2,517	2,517	2,517	2,517	2,517	2,517
Hidráulica	17,500	17,507	17,555	17,555	17,564	17,572	17,786	17,786	17,792	17,792
Nuclear	7,730	7,730	7,730	7,730	7,791	7,866	7,866	7,866	7,866	7,866
Carbón	11,963	11,895	11,898	11,898	11,919	12,159	11,624	11,642	11,482	11,482
Fuel + Gas	9,351	7,572	7,192	6,025	5,149	3,721	3,432	3,309	3,309	2,784
Ciclo combinado	16,683	22,385	23,100	24,496	27,139	27,164	27,199	27,199	27,199	27,199
Hidroeléctrica	-	-	-	-	-	-	-	-	12	12
Resto hidráulica	1,797	1,871	1,981	2,023	2,037	2,042	2,043	2,106	2,106	2,106
Eólica	11,420	13,668	16,118	18,869	19,715	21,175	22,766	23,002	23,002	23,002
Solar fotovoltaica	125	637	3,353	3,398	3,838	4,259	4,560	4,667	4,672	4,672
Solar térmica	11	11	61	232	532	999	1,950	2,300	2,300	2,300
Térmica renovable	574	588	635	782	821	887	975	980	1,018	1,018
Térmica no renovable/Cogeneración y resto	6,463	6,617	6,870	7,077	7,240	7,318	7,281	7,200	7,196	7,196
Total	83,617	90,482	96,492	100,085	103,746	105,161	107,483	108,057	107,953	107,429

Tabla 10: Evolución potencia eléctrica instalada en España (MW). Fuente: REE

A modo de resumen del sistema energético español, en el Anexo III se adjunta el diagrama Sankey obtenido del Observatorio de Energía y Sostenibilidad en España, 2014, que presenta la evolución de cada flujo de energía primaria hasta su conversión en energía final. El grosor de cada línea es proporcional a su magnitud, medida en este caso en Exajulios.

Por último, también en el Anexo III se incluye un diagrama Sankey que recoge las emisiones totales de CO₂ vinculadas al sector energético español. Aunque reducir las emisiones es más bien tarea de las políticas de mitigación y no las de adaptación, es importante tener presente el escenario completo para poder abordar el problema de la contribución del sector energético al cambio climático de forma global. Ambos diagramas están disponibles en versión dinámica en la [web del Observatorio BP de Energía y Sostenibilidad de la Universidad Pontificia Comillas](#).

3. Marco conceptual de la adaptación al cambio climático en el sector energético

Como se ha comentado en la introducción, ante el creciente reconocimiento de que el cambio climático está en marcha y plantea graves riesgos para las sociedades humanas y los sistemas naturales, es necesario adoptar medidas que contemplen las estrategias nacionales de adaptación al cambio climático en aquellos sectores estratégicos más vulnerables. Ese es uno de los objetivos del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático desarrollado por la Oficina Española de Cambio Climático. De entre todos los sectores, el energético se presenta como uno de los prioritarios, y a él se dedica el presente informe.

Para poder avanzar de forma ordenada en este análisis, el primer paso que se consideró fue crear un marco conceptual para el estudio de la adaptación al cambio climático en el sector energético.

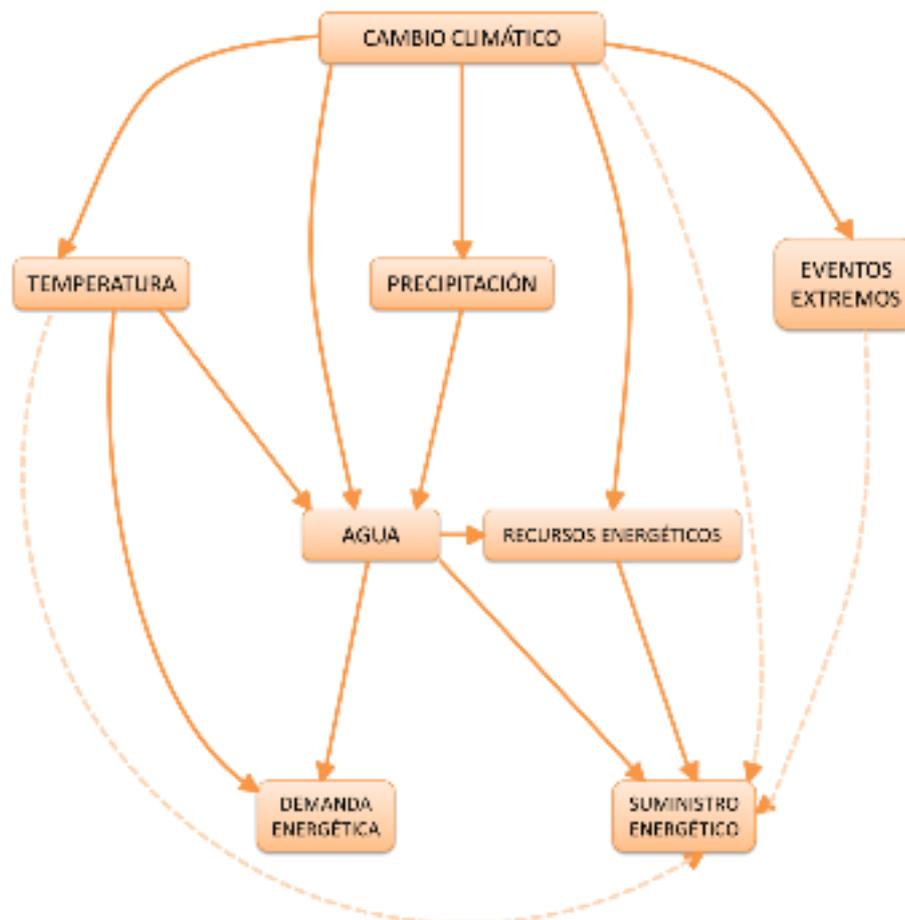


Figura 32: Marco general de adaptación al cambio climático en el sector energético

La Figura 32 presenta este marco, y en él se pueden ver las diferentes relaciones que existen entre el cambio climático y el sistema energético. Como se puede apreciar, se divide en dos partes. La parte superior se centra en los sistemas físicos: se tienen en cuenta las principales tendencias climáticas

que constituyen el cambio climático, a saber, la temperatura, las precipitaciones y los fenómenos extremos. La parte inferior se refiere a los impactos que el cambio climático y sus consecuencias producen en todos los sectores que constituyen un sistema de energía. Esta será la sección principal de este informe, que se abordará en la sección siguiente. Es importante notar que en esta parte se considera el agua como integrante del sistema de energía. Se hace por tratarse ésta de un recurso fundamental tanto para la demanda de energía como para la oferta. Agua y energía están vinculados a través de numerosas vías. Muchas fuentes de energía requieren cantidades significativas de agua y producen una gran cantidad de aguas residuales que requieren energía para su tratamiento. Por todo ello, los sistemas de energía deben ser gestionados teniendo en cuenta a su vez el agua y su gestión, debido a que estas dos áreas tienen una fuerte relación inversa. El análisis, la gestión y el control de estos dos sistemas grandes no pueden ser completamente separados.

Una vez presentado el marco general, hay que señalar que la clasificación propuesta aquí no pretende ser exhaustiva. La complejidad de las cadenas de impacto del cambio climático es muy considerable, y toda acotación se aleja inevitablemente de la realidad que busca reflejar. Por eso, el objetivo del marco presentado es solo dar una visión general de esta complejidad, mostrando cómo se presenta en términos agregados, ofreciendo así una primera imagen de la magnitud relativa del cambio climático en el sistema energético.

Además del problema de reducción de la complejidad en la elección de los elementos principales de las dos etapas superior e inferior del diagrama, conviene recordar que esta distribución es subjetiva y discutible. Eso no significa que la elección sea arbitraria, es fruto de la revisión de la literatura, pero aun así el factor subjetivo siempre está presente en un trabajo de estas características.

3.1. El cambio climático y los impactos físicos

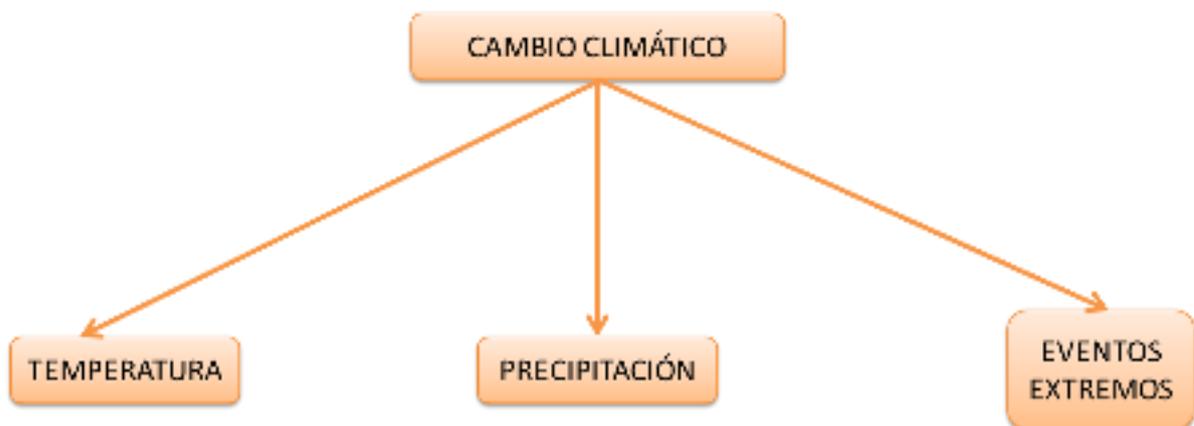


Figura 33: Marco general. Impactos físicos.

El punto de partida de toda evaluación de los impactos del cambio climático sobre el sistema de energía es la evaluación de los impactos físicos en los sistemas naturales. Hay un elevado acuerdo y una evidencia robusta de que el cambio climático se está produciendo y que está afectando a los sistemas naturales, físicos y humanos. Las observaciones de los cambios en el sistema climático y su magnitud, son importantes para el tema de adaptación, debido a que los grandes cambios del sistema físico son los motores de cambio sobre el sistema energético. Estas fuerzas motoras pueden ser agrupadas en tres grandes efectos climáticos: (1) el cambio de temperaturas, (2) el cambio de patrón de las precipitaciones y (3) el cambio de la frecuencia e intensidad de eventos extremos. Es importante analizarlas con algo de detalle pues serán estas las fuerzas motrices de los impactos sobre todo el sistema energético.

Los distintos datos que se manejan en las siguientes secciones, a menos que se indique lo contrario, han sido tomados de la contribución del WGII al AR5 del IPCC.

3.1.1. Los cambios de temperatura

Cada una de las tres últimas décadas ha sido, sucesivamente, más caliente en la superficie de la Tierra que cualquier década anterior desde 1850 (IPCC, 2013, p.5). El efecto más claro del cambio climático tiene que ver con ello, es decir, con un aumento de la temperatura media en la casi totalidad del mundo. Este aumento de temperatura se puede observar en varios elementos que constituyen el sistema natural, como la atmósfera, la tierra, el océano, los ríos, los lagos y los glaciares.

Para apreciar la intensidad media de este calentamiento, los investigadores sopesan algunos parámetros, como la temperatura media global de la superficie, la temperatura atmosférica libre, la temperatura de la troposfera y la temperatura del océano. A excepción de algunos casos particulares, con una evidencia robusta, todas las proyecciones indican un calentamiento general.

El promedio global de la temperatura de la superficie de la tierra y el océano combinados ha aumentado 0,85 °C durante el período de 1880 a 2012. Respecto a los océanos, el calentamiento es más grande cerca de la superficie: los primeros 700m de columna de agua en los océanos se han calentado a un ritmo de 0,11 °C por década durante el período 1971-2010, lo que supone más de 60% del aumento neto de energía en el sistema climático.

3.1.2. Cambios en las precipitaciones

El patrón de precipitaciones ha cambiado significativamente en el siglo XX. Se estima que en las latitudes medias del hemisferio norte la precipitación ha aumentado desde 1901, y especialmente después de 1951. Sin embargo, un análisis detallado de la influencia humana en los cambios en los patrones de precipitaciones es difícil de hacer con los registros existentes. En la actualidad existe confianza media⁷ en que ha habido una influencia humana significativa en los cambios a escala global en los patrones de precipitación, especialmente en el hemisferio norte.

⁷ Una de las métricas en las que se basa el AR5 es la confianza (“confidence”) en la validez de un hallazgo, basada a su vez en el tipo, la cantidad, la calidad y consistencia de la evidencia.

De cara al futuro, las proyecciones sí muestran un aumento claro de la precipitación más marcado en función de la latitud. En términos generales, las precipitaciones medias anuales aumentarán en las latitudes altas y disminuirán en las medias. En el Anexo I se pueden consultar algunas gráficas que ponen de manifiesto esta realidad.

3.1.3. Eventos extremos

Desde 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos⁸. Estos episodios graves aparecen en diferentes formas, y afectan a la temperatura, a las precipitaciones y a la circulación atmosférica.

Los días y las noches fríos ha disminuido y los días y las noches cálidos se han incrementado a escala global. La frecuencia de las olas de calor ha aumentado en Europa, Asia y Australia, y los científicos anticipan que en el futuro habrá más eventos extremos de alta temperatura y menos de baja temperatura en la mayoría de las zonas terrestres. Además, las olas de calor se producirán con mayor frecuencia y duración, mientras que los inviernos de frío extremo, aunque menos numerosos, podrán seguir teniendo lugar.

La frecuencia y la intensidad de precipitaciones torrenciales han variado: en América del Norte y Europa probablemente se han incrementado, mientras que en otros continentes no hay tanta evidencia. Las proyecciones globales a corto y largo plazo confirman una tendencia clara de aumento en las precipitaciones medias a nivel mundial, pero hay variaciones significativas entre regiones. Por ejemplo, las precipitaciones extremas se harán más intensas y más frecuentes en la mayor parte de las latitudes medias y las regiones tropicales húmedas.

También ha habido una modificación en la actividad de huracanes o ciclones en el siglo XX. El informe AR4 concluyó que existe una tendencia creciente de ciclones tropicales desde 1970 en algunas regiones. No obstante, la literatura más reciente indica que es difícil sacar conclusiones firmes con respecto a los niveles de confianza asociados con las tendencias observadas antes de la era de los satélites. Sin embargo, las proyecciones futuras de la actividad de los ciclones tropicales afirman que habrá una disminución o en todo caso un estancamiento a nivel agregado durante el siglo XXI. A nivel mundial, el área abarcada por sistemas monzónicos aumentará durante el siglo mientras que los vientos del monzón se debilitarán y las precipitaciones se intensificarán debido al aumento de la humedad atmosférica.

En el Anexo I se incluye una descripción en detalle de las proyecciones de cambios en la temperatura, las precipitaciones y los eventos extremos según los trabajos del WGI en el AR5.

⁸ Un **evento extremo meteorológico** es un evento inusual para un lugar en particular y una época del año concreta. Puede considerarse evento extremo meteorológico cuando se encuentra por encima o por debajo del percentil 90 o 10 de la función de probabilidad observada. Por otra parte, para que se pueda hablar de **evento extremo climático** se precisa que el patrón meteorológico extremo se extienda en el tiempo hasta afectar de forma significativa a los parámetros climáticos medios de una estación.

4. Proyecciones Futuras de impactos del cambio climático en los sistemas energéticos

Como hemos anticipado en las secciones anteriores, el cambio climático, según todas las previsiones, tendrá un impacto en el corto y en el largo plazo sobre los recursos energéticos, su producción y su uso, y de ahí que sea necesaria una política de adaptación específica para el sector energético. Algunos impactos pueden ser sistémicos y afectar a amplias zonas geográficas; otros pueden ser localizados e influir sólo en infraestructuras específicas.

Si en la sección precedente se describieron cualitativamente los impactos del cambio climático sobre los sistemas físicos (temperatura, precipitaciones y eventos extremos), en esta sección se presenta primero una cuantificación de los impactos esperados del cambio climático sobre el sistema energético basándonos sobre todo en el AR5 del IPCC. A partir de estos datos, se enumeran también los impactos esperados sobre los recursos energéticos, sobre la demanda de energía y sobre la oferta energética. En este caso, esta información se ha obtenido mediante una revisión amplia de la literatura relacionada.

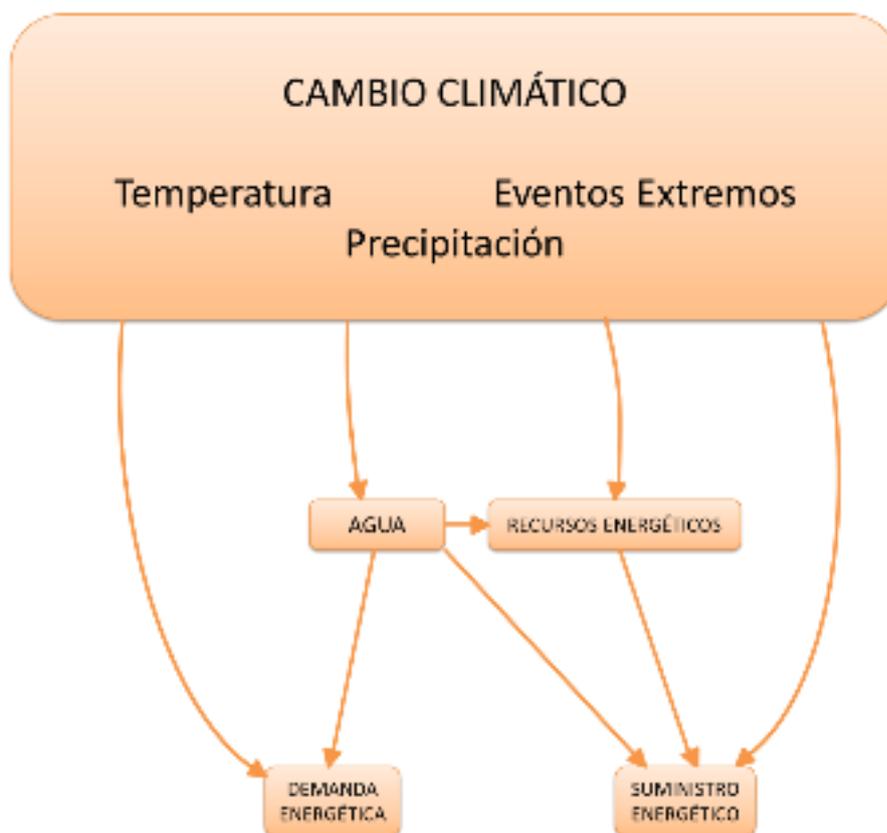


Figura 34: Marco general. Impacto sobre los sistemas energéticos

Si en la sección 3 se presentó la primera parte del marco conceptual de adaptación al cambio climático para el sector energético (ver Figura 32), en esta se aborda la segunda, aquella que tiene que ver propiamente con el sistema en sí. Ahora, el sistema energético se considera subdividido en

tres ámbitos principales, como se puede observar en la Figura 34: fuentes de energía (agua y otros recursos), demanda de energía y suministro de energía. Como se mencionó anteriormente, el agua se considera aparte de los recursos energéticos, ya que tiene una mayor importancia que otras fuentes de energía, y porque afecta fuertemente a muchas partes de la estructura.

Los recursos energéticos se refieren a la cantidad de energía primaria disponible; la demanda de energía se refiere al uso final de la energía y el suministro de energía se centra en las tecnologías que convierten la energía primaria en una forma que pueda ser utilizada por los consumidores.

Con respecto al suministro, dado que parte importante del sistema energético actual (e incluso las instalaciones de energía en construcción o en proyecto que se llevarán a cabo en los próximos años) probablemente seguirá estando operativa en las nuevas condiciones climáticas dada la larga vida útil de la infraestructura energética, un análisis preciso de la oferta actual del sistema energético es absolutamente necesaria.

En esta sección se tratará por tanto de cubrir una amplia variedad de impactos que el cambio climático puede tener sobre los sistemas de energía, y se hará siempre con la guía del marco conceptual de la Figura 34. Se irá avanzando desde los recursos hacia la demanda de energía y el suministro de energía, analizando en cada caso cuál es la influencia de los impactos físicos (temperatura, precipitaciones y eventos extremos) sobre el elemento en cuestión.

4.1. Impacto esperado en el agua

4.1.1. Impactos en la criosfera

La Tabla 11 resume los impactos esperados en la criósfera.

IMPACTO	CORTO PLAZO	LARGO PLAZO	REFERENCIA
Criósfera			
<ul style="list-style-type: none"> Extensión del hielo 	<p>Deshielo casi total en el ártico en septiembre (menos de 1×10^6 km² de hielo al menos durante 5 años consecutivos) antes de 2050 para el RCP8.5</p>	<p>Periodo proyectado: 2081-2100 Periodo de referencia: 1986-2005</p> <p>Reducción de la extensión de hielo (hemisferio norte)</p> <ul style="list-style-type: none"> 8% para RCP2.6 a 34% para RCP8.5 (Feb) 43% para RCP2.6 a 94% para CP8.5 (Sep) <p>Reducción del volumen medio del hielo (hemisferio norte)</p> <ul style="list-style-type: none"> 29% para RCP2.6 a 73% para RCP8.5 (Feb) 54% para RCP2.6 a 96% para RCP8.5 (Sep) <p>Reducción de la extensión del hielo (hemisferio sur)</p> <ul style="list-style-type: none"> 16% para RCP2.6 a 67% para RCP8.5 (Feb) 8% para RCP2.6 a 30% para RCP 8.5 (Sep) <p>Reducción del volumen de hielo (hemisferio sur)</p> <ul style="list-style-type: none"> El 75% de los modelos CMIP5 pronostican un escenario de 	IPCC 2013

IMPACTO	CORTO PLAZO	LARGO PLAZO	REFERENCIA
		ausencia total en febrero según el RCP8.5 <ul style="list-style-type: none"> 60% bajo RCP4.5 	
<ul style="list-style-type: none"> Extensión de la cobertura de nieve 	Periodo proyectado: 2016-2035 Periodo de referencia: 1986-2005 Cobertura de nieve media de marzo a abril (hemisferio norte) <ul style="list-style-type: none"> 5.2%±1.9% (CMIP5 bajo RCP2.6) 5.3%±1.5% (CMIP5 bajo RCP4.5) 4.5%±1.2% (CMIP5 bajo RCP6.0) 6.0%±2.0% (CMIP5 bajo RCP8.5) 	Periodo proyectado: 2081-2100 Periodo de referencia: 1986-2005 Cobertura de nieve media de marzo a abril (hemisferio norte) <ul style="list-style-type: none"> 7%±4% (CMIP5 bajo RCP2.6) 13%±4% (CMIP5 bajo RCP4.5) 15%±5% (CMIP5 bajo RCP6.0) 25%±8% (CMIP5 bajo RCP8.5) 	IPCC 2013
<ul style="list-style-type: none"> Permafrost 	Periodo proyectado: 2016-2035 Periodo de referencia: 1986-2005 Reducción media del área de permafrost cerca de la superficie <ul style="list-style-type: none"> 21%±5% (CMIP5 bajo RCP2.6) 18%±6% (CMIP5 bajo RCP4.5) 18%±3% (CMIP5 bajo RCP6.0) 20%±5% (CMIP5 bajo RCP8.5) 	Periodo proyectado: 2081-2100 Periodo de referencia: 1986-2005 Reducción media del área de permafrost cerca de la superficie <ul style="list-style-type: none"> 37%±11% (CMIP5 bajo RCP2.6) 51%±13% (CMIP5 bajo RCP4.5) 58%±13% (CMIP5 bajo RCP6.0) 81%±12% (CMIP5 bajo RCP8.5) 	IPCC 2013

Tabla 11: Impactos esperados en el agua (recurso energético) por el cambio climático

Críósfera

Críósfera es el término que describe las partes de la superficie de la Tierra donde el agua se encuentra en estado sólido. Se compone de varios elementos que son sensibles a los cambios en la temperatura del aire y la precipitación, y por lo tanto al cambio climático en general. Específicamente, los investigadores han realizado proyecciones en los tres componentes principales de la criósfera, que son el hielo marino, la cubierta de nieve y el permafrost.

La extensión del hielo del mar

La reducción en la extensión del hielo marino representa uno de los datos más mediáticos y más sensibles del cambio climático, al suponer una confirmación firme y visible del calentamiento global. Hay mucha literatura que estudia este fenómeno de una manera muy detallada. Las proyecciones se han realizado en el plano espacial: sobre la extensión del hielo marino en ambos hemisferios, y temporal: para los meses de invierno y los meses de verano considerando febrero y septiembre como meses de referencia.

Los cambios en el forzamiento radiativo externo afectan a la variabilidad interanual y decenal del clima, y esto complica la capacidad de hacer proyecciones precisas a corto plazo de los cambios en la criósfera, de ahí que los datos más fiables estén relacionados con el largo plazo.

La mayoría de los modelos CMIP5 pronostican un Ártico prácticamente sin hielo (extensión del hielo marino de menos de 1 x 10⁶ km² por lo menos durante 5 años consecutivos) al final del verano de 2100 en el escenario RCP8.5. Algunos otros modelos de la CMIP5 muestran grandes cambios también

en el corto y medio plazo. Estos modelos proyectan un período de verano sin hielo en el Océano Ártico en 2040. Escalando los resultados de los modelos CMIP3 a los recientes cambios en el hielo marino observado, se prevé un Ártico prácticamente sin hielo en septiembre en 2037. Sin embargo, otros modelos prevén una disminución más lenta en la extensión del hielo del mar en el corto plazo.

Con respecto a las predicciones para finales del siglo XXI, con base en el análisis de los modelos CMIP3, el AR4 llega a la conclusión de que las cubiertas de hielo marino del Ártico y de la Antártida se reducirán en todos los escenarios del SRES (los escenarios de emisión utilizados por el IPCC en sus informes AR3 y AR4). También hace hincapié en que, en algunas proyecciones, el Océano Ártico quedará casi completamente libre de hielo a finales de verano durante la segunda mitad del siglo XXI. Estas conclusiones fueron confirmadas por análisis adicionales de los CMIP3, y se fortalecieron con los CMIP5.

Las proyecciones para el período 2081-2100 sobre la cobertura superficial de hielo medio del mar y el volumen medio de hielo marino en ambos hemisferios en febrero y septiembre en relación con el período de tiempo 1986-2005 se pueden ver en la Figura 35.

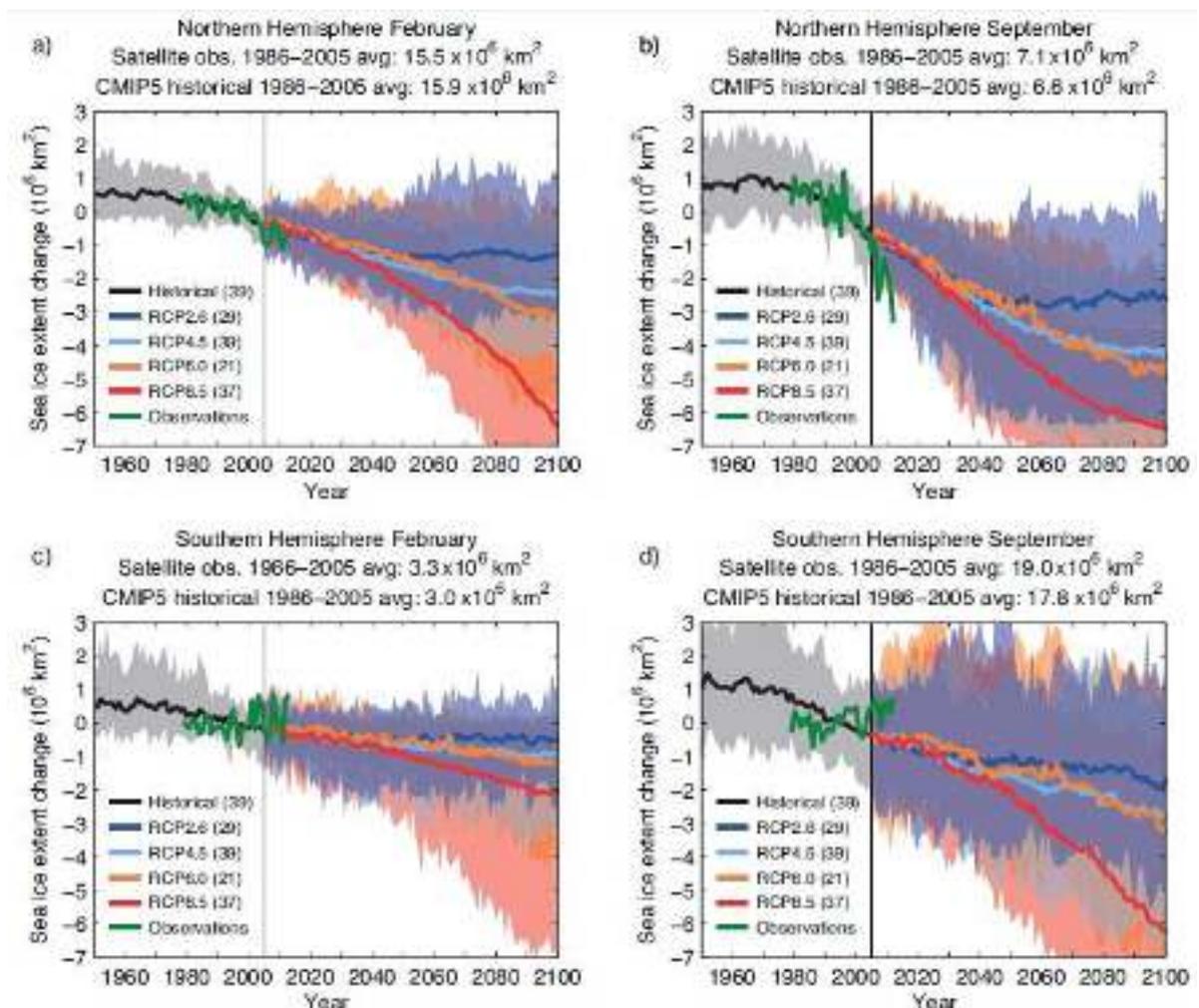


Figura 35: Evolución hielo en los océanos

Numéricamente, la reducción media en la extensión del hielo marino en el hemisferio norte sería:

- Del 8% para RCP2.6 al 34% para RCP8.5 en febrero
- Del 43% para RCP2.6 al 94% para RCP8.5 en septiembre

La reducción del volumen medio del hielo marino en el hemisferio norte:

- Del 29% para RCP2.6 al 73% para RCP8.5 en febrero
- Del 54% para RCP2.6 a 96% para RCP8.5 en septiembre

La reducción media en la extensión del hielo marino en el hemisferio sur sería:

- Del 16% para RCP2.6 al 67% para RCP8.5 en febrero
- Del 8% para RCP2.6 a 30% para RCP8.5 en septiembre

La reducción del volumen medio del hielo marino en el hemisferio sur:

- Estado casi libre de hielo para RCP8.5 en febrero
- 60% bajo RCP4.5 en febrero

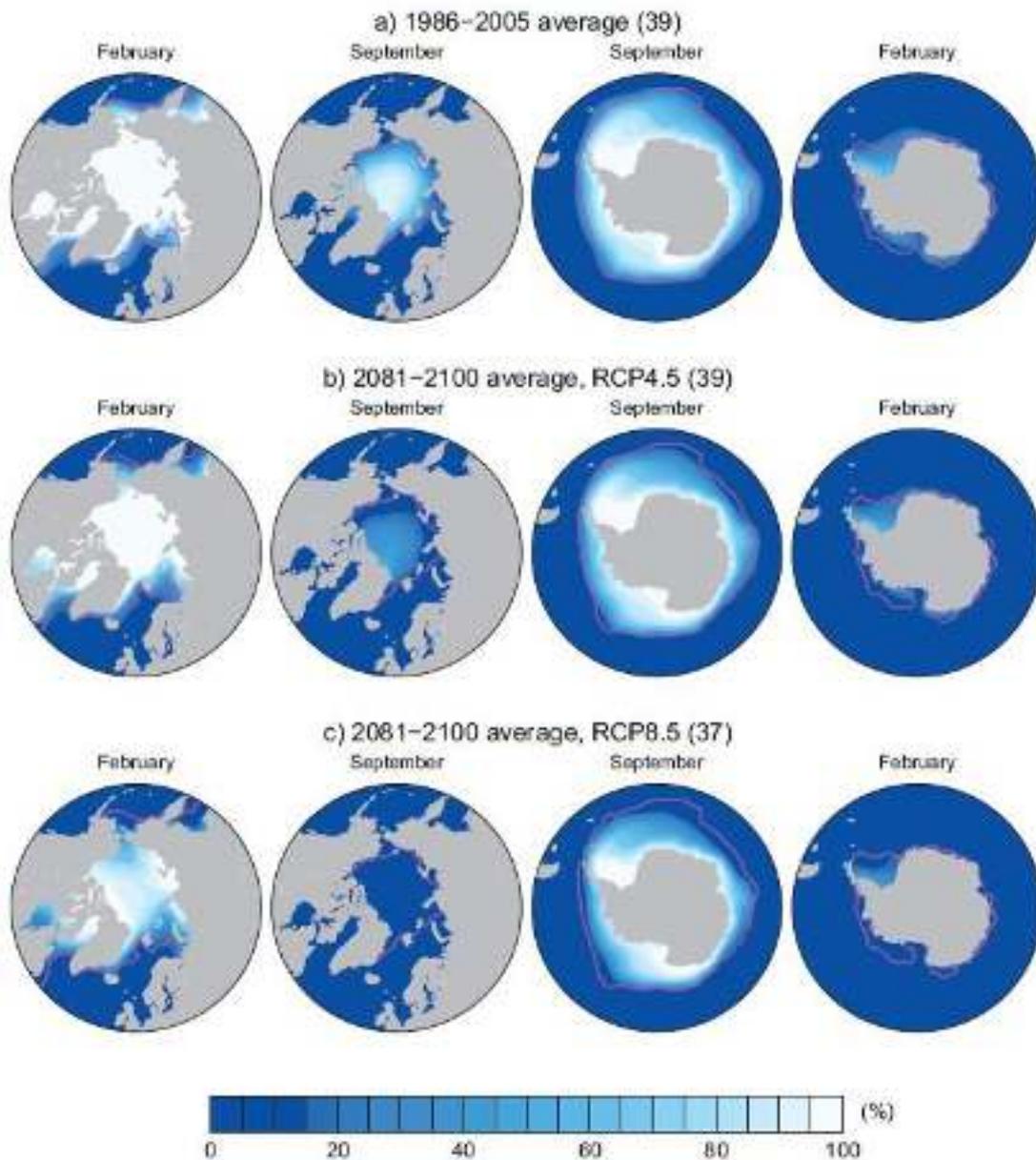


Figura 36: Proyecciones a largo plazo de la reducción de hielo en los océanos

Como ponen de manifiesto los datos, los modelos CMIP5 pronostican un futuro casi libre de hielo durante el mes de septiembre en el Ártico antes de 2100 bajo RCP8.5 (ver Figura 36). Por otro lado, los porcentajes en febrero del volumen de hielo marino son mucho más altos que los correspondientes a la extensión del hielo del mar, lo cual es indicativo de un adelgazamiento sustancial del hielo marino.

Cobertura media de nieve

Definimos la cobertura media de nieve (SCE) como la nieve que cubre las áreas de tierra libres de hielo, y no toda la nieve sobre la superficie mundial. Los análisis de los cambios en la cobertura de nieve de temporada se centran generalmente en el hemisferio norte, donde la configuración de los

continentes induce una SCE estacional máxima mayor y por tanto la sensibilidad a los cambios climáticos es también mayor. La disminución de la SCE está fuertemente conectada con el acortamiento de la duración de temporada de nieve, y ahí entran tanto los efectos ligados a la temperatura como a las precipitaciones. Por ejemplo, los aumentos proyectados en las nevadas en gran parte de las latitudes altas del norte actúan para aumentar la cantidad de nieve, pero el calentamiento reduce la fracción de precipitación que cae en forma de nieve.

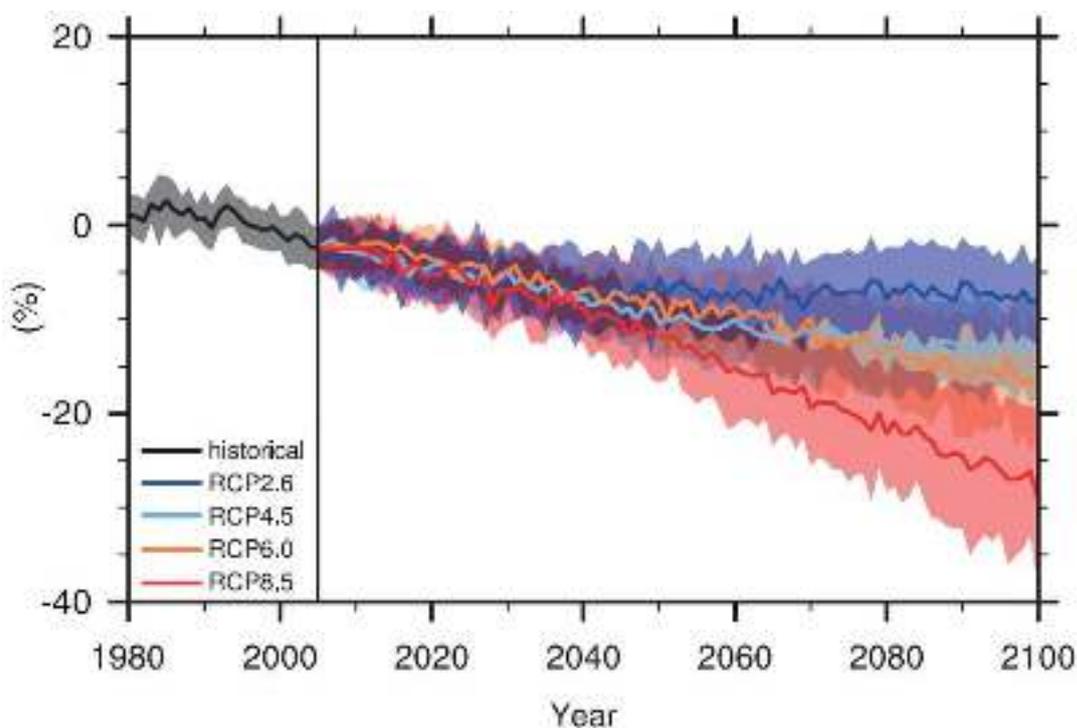


Figura 37: % de cambio en la cobertura de nieve estimada para el hemisferio norte

La Figura 37 muestra el porcentaje de cambio estimado en la cubierta de nieve del hemisferio norte según los modelos CMIP5, en relación con la medida simulada para el período de referencia de 1986-2005. Las proyecciones, en el corto plazo y largo plazo, serían:

SCE promedio de marzo a abril en el hemisferio norte para el período 2016-2035:

- -5,2% \pm 1.9% bajo RCP2.6
- -5,3% \pm 1.5% bajo RCP4.5
- -4,5% \pm 1,2% bajo RCP6.0
- -6,0% \pm 2.0% bajo RCP8.5

SCE promedio de marzo a abril en el hemisferio norte para el período 2081-2100:

- -7% \pm 4% bajo RCP2.6
- -13% \pm 4% bajo RCP4.5
- -15% \pm 5% bajo RCP6.0
- -25% \pm 8% bajo RCP8.5

Permafrost

Se define el permafrost como la capa de hielo permanente en los niveles superficiales del suelo de las regiones muy frías. El fuerte calentamiento estimado por todas las simulaciones de los modelos climáticos para las latitudes altas del norte tiene implicaciones para este suelo helado. Las proyecciones recientes de la magnitud de la degradación del permafrost cerca de la superficie varían ampliamente dependiendo del clima subyacente, del escenario escogido y del modelado físico, pero prácticamente todas ellas indican una alta degradación del permafrost cerca de la superficie en amplias zonas. La degradación del permafrost a mayor profundidad se produce mucho más lentamente.

Los modelos climáticos están comenzando a representar procesos y propiedades físicas del permafrost con más exactitud, por lo que las proyecciones han aumentado la credibilidad en comparación con la anterior generación de modelos evaluados en el AR4. Los cambios proyectados en el permafrost son una respuesta no sólo al calentamiento, sino también a los cambios en las condiciones de nieve, dado que su evolución estacional ejerce un control significativo sobre el estado térmico del suelo.

Todas las proyecciones de corto plazo indican una degradación sustancial del permafrost cerca de la superficie (por lo general tiene lugar en la parte superior, de 2 a 3 m de profundidad) sobre gran parte de la zona por la que se extiende. La misma tendencia se estima para las proyecciones a largo plazo. Los rangos, que están relacionados con el período de referencia 1986-2015, se muestran en la y se desarrollan a continuación.

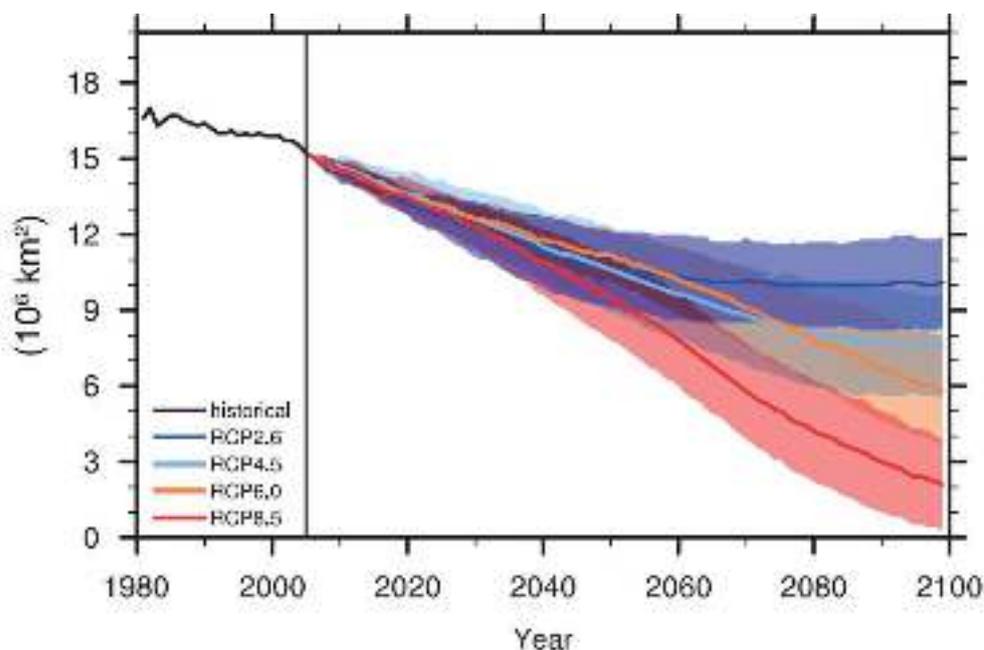


Figura 38: Evolución estimada del área de permafrost cerca de la superficie

Área de permafrost cerca de la superficie para el período 2016-2035:

- - 21% ± 5% bajo RCP2.6
- - 18% ± 6% bajo RCP4.5
- - 18% ± 3% bajo RCP6.0
- - 20% ± 5% bajo RCP8.5

Área de permafrost cerca de la superficie para el período 2080-2099:

- - 37% ± 11% bajo RCP2.6
- - 51% ± 13% bajo RCP4.5
- - 58% ± 13% bajo RCP6.0
- - 81% ± 12% bajo RCP8.5

4.1.2. Impactos en el nivel medio global del mar

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Nivel del mar	Periodo proyectado: 2081-2100 Periodo de referencia: 1986-2005 Valores medianos y posibles rangos para las proyecciones del incremento del nivel medio global del mar (GMSL) para ese periodo: 0.40 [0.26 a 0.55]m (RCP2.6) 0.47 [0.32 a 0.63]m (RCP4.5) 0.48 [0.33 a 0.63]m (RCP6.0) 0.63 [0.45 a 0.82]m (RCP8.5) Valores medianos y rangos para 2100: 0.44 [0.28 a 0.61]m (RCP2.6) 0.53 [0.36 a 0.71]m (RCP4.5) 0.55 [0.38 a 0.73]m (RCP6.0) 0.74 [0.52 a 0.98]m (RCP8.5)	IPCC 2013
<ul style="list-style-type: none"> • Expansión térmica 	Influencia en el aumento de la altura: 30 a 55% 0.14 [0.10 a 0.18]m (RCP2.6) 0.19 [0.14 a 0.23]m (RCP4.5) 0.19 [0.15 a 0.24]m (RCP6.0) 0.27 [0.21 a 0.33]m (RCP8.5)	IPCC 2013
<ul style="list-style-type: none"> • Criósfera (glaciares) 	Influencia en el aumento de la altura: 15 a 35% Para 2100, del 15 al 55% del volumen actual de los glaciares (excluyendo la Antártida) se espera que desaparezcan bajo RCP2.6, y del 35 a 85% bajo RCP8.5. 0.10 [0.04 a 0.16]m (RCP2.6) 0.12 [0.06 a 0.19]m (RCP4.5) 0.12 [0.06 a 0.19]m (RCP6.0) 0.16 [0.09 a 0.23]m (RCP8.5)	IPCC 2013

Tabla 12: Impactos esperados sobre el nivel del mar

La mayor parte de la superficie terrestre está cubierta por océanos y mares. El cambio climático en su conjunto afecta al sector del agua y, por consiguiente, a las características de los océanos. De entre todos los factores derivados del cambio climático que afectan al agua, la temperatura juega un papel significativo.

Todos los datos y los rangos de aumento del nivel del mar que se resumen en la Tabla 12 fueron recogidos por el WGI del IPCC y se registraron en el AR5 (IPCC, 2013).

Las proyecciones de incremento del Nivel Medio Global del Mar (GMSL) durante el siglo XXI son la suma de las contribuciones derivadas de los modelos que fueron evaluados por los miembros del IPCC. Las proyecciones de aumento GMSL para cada escenario RCP se basan en los resultados de los Modelos de Circulación General (MCGAO) del CMIP5, los cuales proporcionan la representación del sistema climático más completa disponible actualmente. Los investigadores afirman que la expansión térmica y el derretimiento de los glaciares y en la cubierta de hielo en Groenlandia y la Antártida, han sido los dos contribuyentes dominantes para este aumento en el siglo XX, y seguirán siéndolo en el futuro.

En la Figura 39 se presenta la suma de las contribuciones de los diversos factores a la subida del nivel del mar, junto con los rangos de los dos principales. La expansión térmica y la contribución del derretimiento de los glaciares podrían explicar hasta el 90% de las proyecciones futuras. La Figura 39 muestra las proyecciones de los modelos para el periodo 2081-2100 con respecto a 1986-2005 para los cuatro escenarios RCPs de la AR5 y el escenario A1B de la AR4.

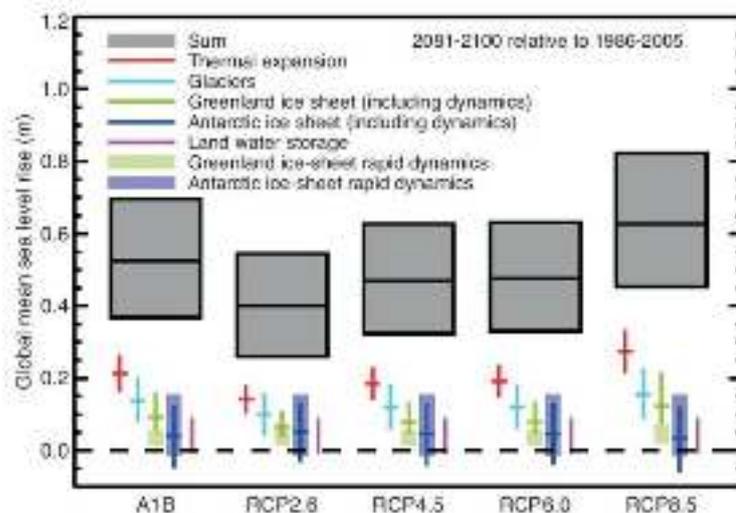


Figura 39: Desagregado de factores que influyen en el aumento medio del nivel del mar (GMSL)

A finales del siglo XXI, en el período 2081-2100 en relación con 1986-2005, los valores de la mediana y los probables rangos para las proyecciones de aumento del GMSL son:

- 0,40 [0,26 a 0,55] m bajo RCP2.6
- 0,47 [0,32 a 0,63] m bajo RCP4.5
- 0,48 [0,33 a 0,63] m bajo RCP6.0
- 0,63 [0,45 a 0,82] m bajo RCP8.5

Se puede observar que RCP4.5 y RCP6.0 son muy similares a finales de siglo: la diferencia es que RCP4.5 tiene una mayor tasa de aumento a principios de siglo que RCP6.0, lo que se aprecia con mayor claridad en la Figura 40. En ella se puede notar también que la tasa de aumento se vuelve más o menos constante antes de mitad de siglo en RCP2.6, mientras que en RCP4.5 y RCP6.0 se hace constante hacia finales. Por el contrario, en RCP8.5 la tasa continúa creciendo durante todo el siglo.

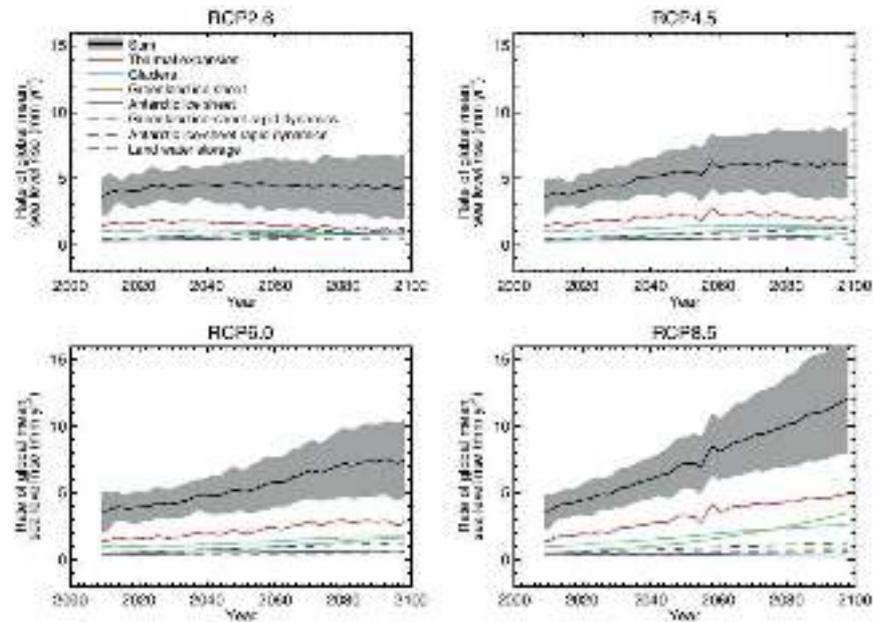


Figura 40: Tasa de evolución del GMSL

En 2100, los valores de las medianas y los rangos de aumento de la GMSL son:

- 0,44 [0,28 a 0,61] m bajo RCP2.6
- 0,53 [0,36-0,71] m bajo RCP4.5
- 0,55 [0,38-0,73] m bajo RCP6.0
- 0,74 [0,52-0,98] m bajo RCP8.5

Estos valores y rangos se presentan en la Figura 41.

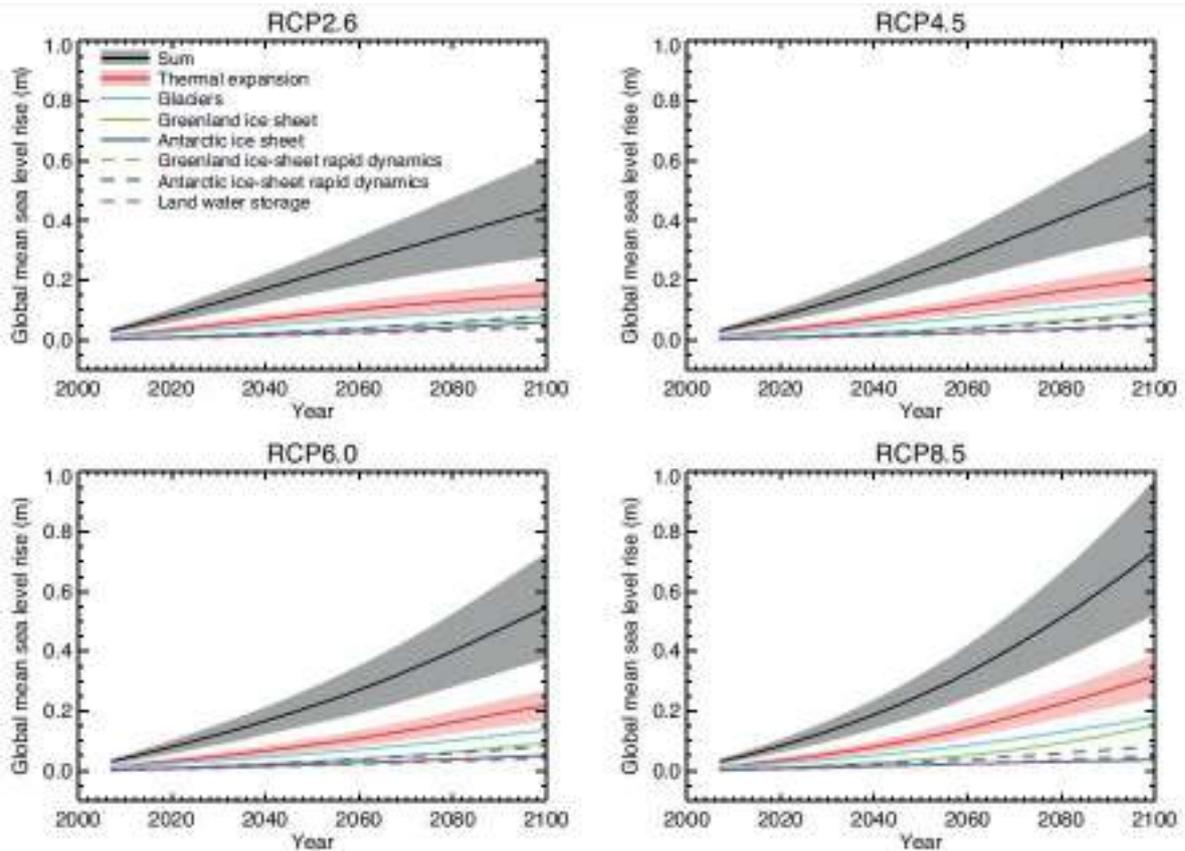


Figura 41: Evolución del GMSL

Como se comentó, los dos principales contribuyentes del GMSL son la expansión térmica y el derretimiento glaciar, cuyas contribuciones son:

Expansión de calor (30 a 55% de las proyecciones):

- 0,14 [0,10 a 0,18] m bajo RCP2.6
- 0,19 [0,14-0,23] m bajo RCP4.5
- 0,19 [0,15 a 0,24] m bajo RCP6.0
- 0,27 [0,21-0,33] m bajo RCP8.5

Fusión glaciar (15 a 35% de las proyecciones):

- 0,10 [0,04 a 0,16] m bajo RCP2.6
- 0,12 [0,06 hasta 0,19] m bajo RCP4.5
- 0,12 [0,06 hasta 0,19] m bajo RCP6.0
- 0,16 [0,09 a 0,23] m bajo RCP8.5

El derretimiento glaciar excluye la capa de hielo de la Antártida, pero incluye los glaciares periféricos y la capa de hielo de Groenlandia. Para el año 2100, del 15 al 55% de este volumen de los glaciares fuera de la Antártida se prevé que desaparezcan bajo RCP2.6, y entre el 35% y el 85% bajo RCP8.5.

4.1.3. Impactos en los recursos hídricos

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Inundaciones	Baja confianza en relación a la tendencia y la magnitud de la frecuencia de las inundaciones a escala global	(IPCC, 2013 p.214)
Sequías	Baja confianza en la magnitud de los futuros impactos	(IPCC, 2013 p.1086)
Cambios en los caudales	Modificación de los periodos de lluvias	(CCC, 2006)
Salinidad	Aumento de la salinidad en las regiones subtropicales.	(IPCC, 2013 p.1094)

Tabla 13: Impactos de las precipitaciones en el agua

Como ya se ha discutido ampliamente en secciones precedentes, las consecuencias en su conjunto del cambio climático sobre los sistemas naturales están afectando y afectarán cada vez más a todos los elementos que constituyen el sistema energético, incluido el agua. Dicho esto, es posible asociar algunas repercusiones específicas sobre el agua como elemento del sistema energético, debidas a los cambios de los patrones de precipitación. Estos efectos son las inundaciones, las sequías, los cambios en los caudales y la salinidad.

Las **inundaciones** principalmente se producen por fuertes lluvias, cuando los cursos de agua naturales no tienen la capacidad de transmitir el exceso de agua. Por lo tanto las causas no están asociadas solo al evento natural, sino también a una incapacidad del sistema. Por estas razones, es difícil encontrar una tendencia global general de las inundaciones, tal y como el WG2 del IPCC concluyó en el AR4. Sin embargo, en el AR5, el WG2 evaluó las inundaciones con detalle regional, poniendo de manifiesto que las tendencias de las mismas están fuertemente influenciadas por los cambios en la gestión de los ríos.

Estudios para Europa y Asia muestran evidencias contrapuestas en relación a las inundaciones, por lo que actualmente no existe una evidencia clara y generalizada de las futuras tendencias, más allá de aquellas vinculadas al deshielo temprano. En resumen, sigue existiendo una falta de pruebas en las proyecciones de las inundaciones futuras, y por lo tanto baja confianza con respecto a la señal de magnitud y frecuencia de las mismas en una escala global.

Las **sequías** pueden ocurrir por muchas razones, pero la principal es por el cambio de patrón de precipitaciones. Si tiene lugar una reducción de la precipitación, es muy probable que se produzca una sequía meteorológica. No obstante, los periodos secos podrían ser el resultado de otros cambios en el patrón de precipitaciones, asociadas con agentes adicionales. El aumento de las temperaturas, por ejemplo, conducirá a un mayor porcentaje de precipitación que caerá en forma de lluvia en lugar de nieve, el deshielo temprano y un aumento de la evaporación y la transpiración. La baja precipitación y la modificación de los periodos de máxima y mínima disponibilidad de agua (asociados no solo con las altas temperaturas, sino también con los cambios en la humedad del suelo) pueden causar sequías agrícolas. El riesgo de futuras sequías de este tipo aumentará en las regiones de fuerte

disminución de la humedad del suelo (IPCC, 2013, p. 1086). Sin embargo, hay poca confianza en la magnitud de los impactos futuros (agricultura y sequías meteorológicas), a pesar de que se proyecta un aumento sustancial de la sequía meteorológica en el Mediterráneo, América Central, Brasil, Sudáfrica y Australia, justo al contrario que en las altas latitudes del norte, donde se espera que disminuyan.

Las inundaciones y las sequías no son los únicos efectos del cambio del régimen de lluvias. Las mismas causas que pueden llevar a las sequías agrícolas, también afectarán a la hidrología de varias **cuencas** de ríos de todo el mundo. El estudio llevado a cabo por el Centro para Cambio Climático en California (California Climate Change Center, 2006) analizó los problemas de generación de energía hidroeléctrica asociados con la disponibilidad de agua. Hicieron simulaciones en dos zonas, bajo dos modelos diferentes y para dos escenarios diferentes de emisiones gases de efecto invernadero (A2 y B1, que pertenecen a los escenarios del SRES y no a los RCPs), dando un total de ocho relaciones de perturbación. Sus predicciones de caudal se hicieron para el periodo 2070-2099 en comparación con el período 1960-1990. La Figura 42 y la Figura 43 muestran los resultados que se obtuvieron, en pie³/seg.

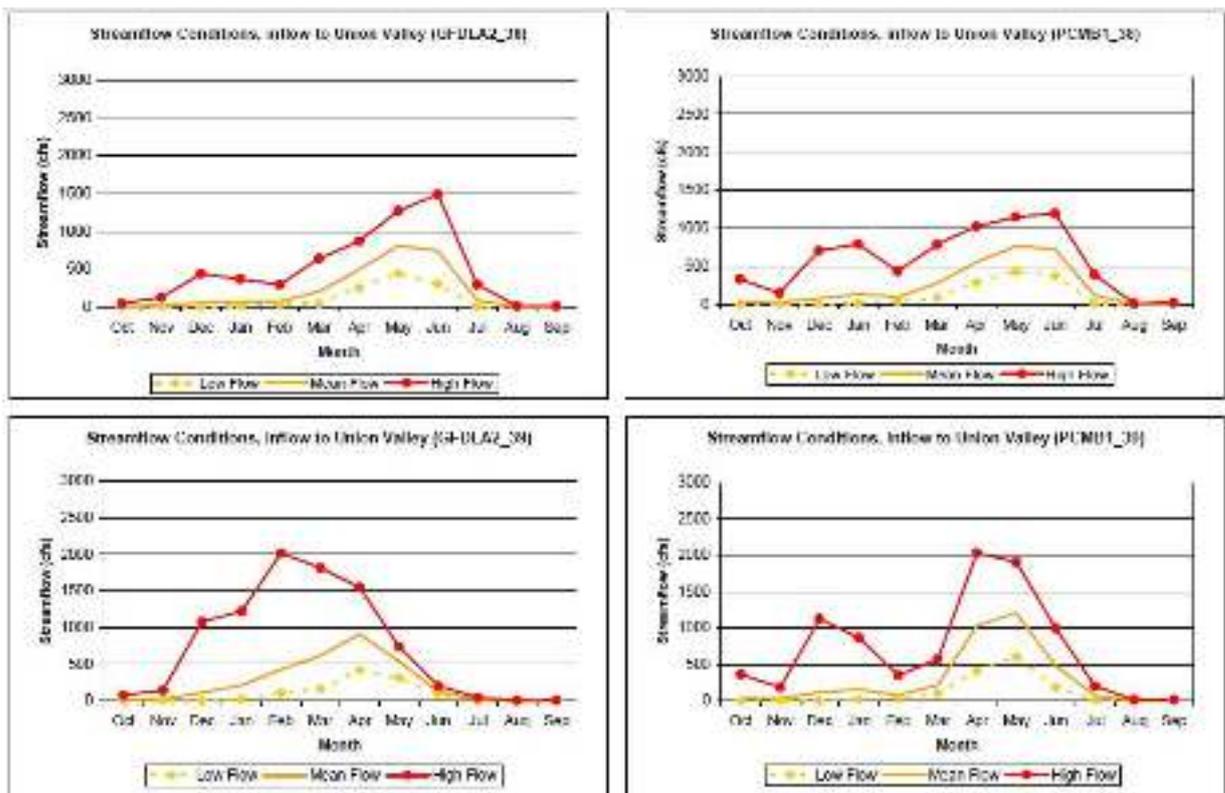


Figura 42: Impacto esperado de las sequías en la producción hidroeléctrica en California (I)

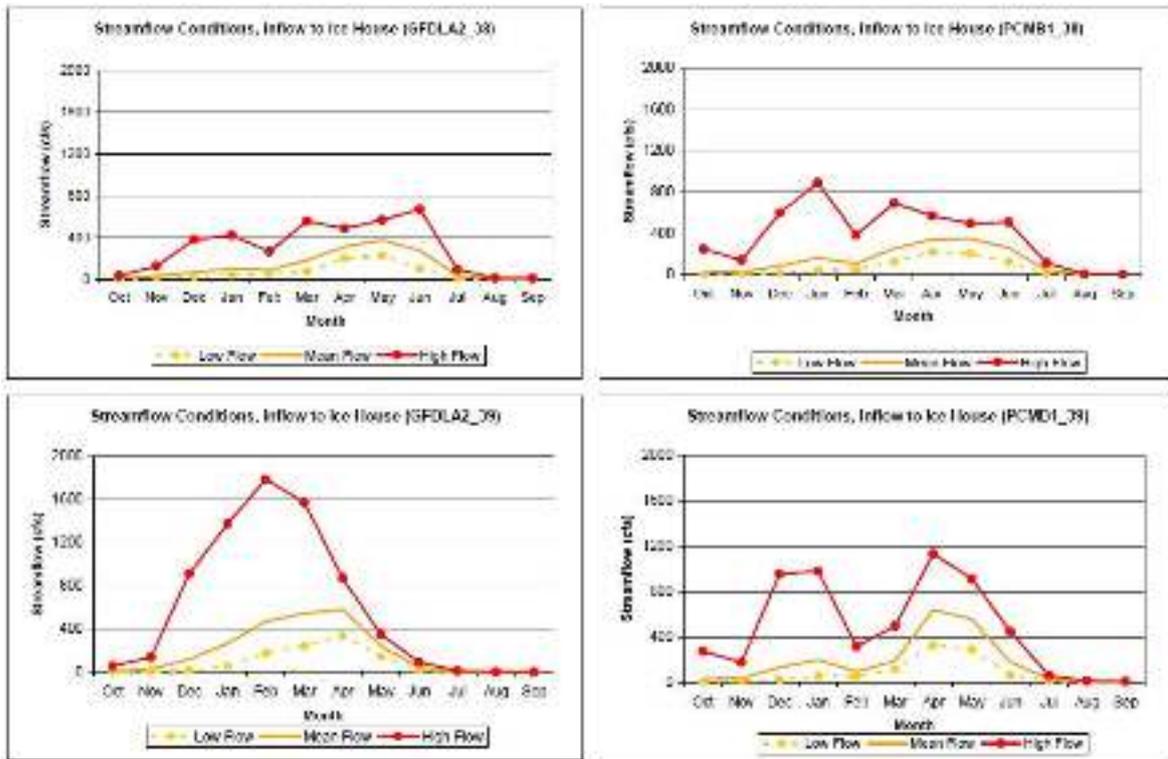


Figura 43: Impacto esperado de las sequías en la producción hidroeléctrica en California (II)

La tendencia general que se puede apreciar a partir de estas proyecciones es una disminución de los caudales en primavera y verano, así como el aumento de los caudales en invierno. Cada mes se divide en conjuntos iguales de días húmedos, normales y secos, generando tres series de relaciones de perturbación mensuales (*low flow*, *mean flow* y *high flow*). Los resultados muestran que, en general, los caudales máximos diarios aumentan más que los caudales medios y bajos (húmedos, normales y días secos). Los cambios porcentuales de los caudales anuales son:

- 71% para PCMB1_38
- 86% para PCMB1_39
- 62% para GFDLA2_38
- 86% para GFDLA2_39

La modificación del patrón de precipitaciones también ha tenido una enorme influencia en la salinidad del agua de océanos, ríos y lagos. Las regiones con alta salinidad donde la evaporación domina a la precipitación se han vuelto aún más salinas desde los años 50, y en las regiones de baja salinidad, donde domina la precipitación, se han vuelto más frescas.

El estuario Casamance (Blesgraaf et al., 2006) es un ejemplo perfecto del problema asociado a este impacto. En este informe de la salinidad en el estuario de Casamance, los autores presentaron razones por las que el estuario se había convertido en hipersalino. La principal es la disminución de las precipitaciones. En relación al futuro, el modelo predice que más lluvias se traducirán en más escorrentía, y, a pesar de que el estuario reacciona rápido al cambio de la lluvia y a la intensidad de la escorrentía, varios años de fuertes lluvias no serán suficientes para limpiarlo por completo.

El WGI del IPCC en el AR5 presentó algunas proyecciones a largo plazo de la salinidad superficial del mar (SSS). Las proyecciones de modelos climáticos CMIP5 disponibles sugieren que las SSS en las altas regiones subtropicales, dominadas por evaporación neta, son típicamente cada vez más altas. También sugieren una continuación de esta tendencia en el Atlántico, donde el agua superficial subtropical irá aumentando su salinidad a medida que avanza el siglo. Al mismo tiempo, el Pacífico Norte tenderá a disminuir su salinidad. La Figura 44 muestra las diferencias de salinidad superficial del mar proyectadas para 2080-2100 bajo el RCP8.5, en relación al periodo 1986-2005 y según los modelos CMIP5.

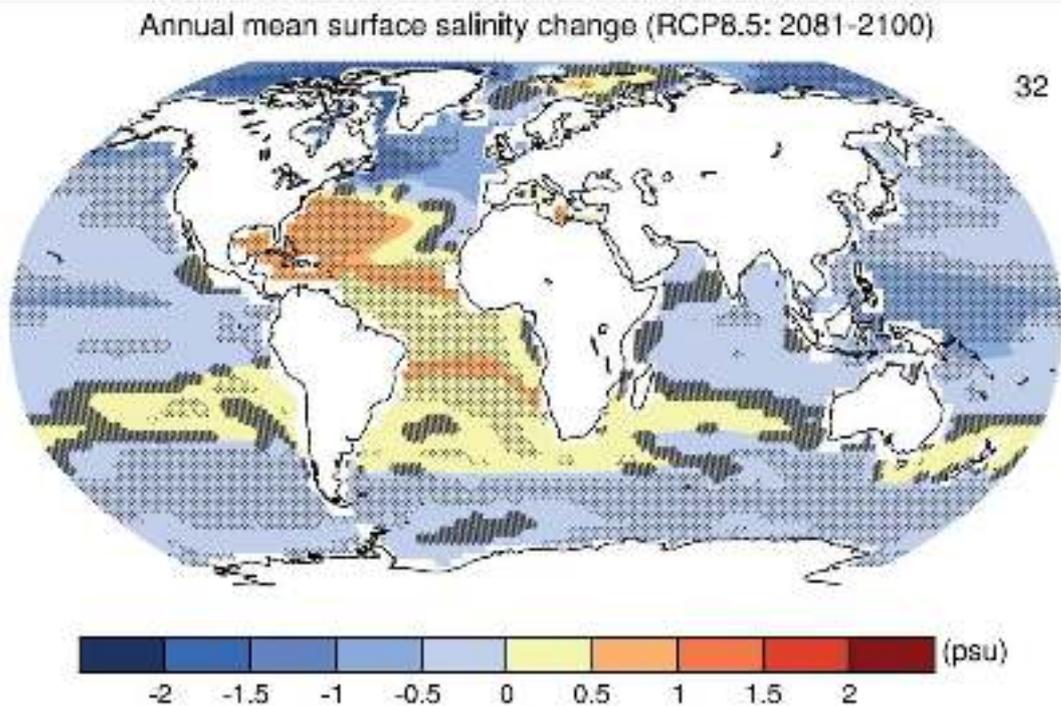


Figura 44: Salinidad media estimada en los océanos en el periodo 2080-2100

4.1.4. Impactos en la evaporación

IMPACTO	CORTO PLAZO	LARGO PLAZO	REFERENCIA
Evaporación	Incremento de la precipitación global y de la evaporación de 1 a 3% /°C Cambios en el periodo 2016-2035 relativos a 1986-2005 bajo RCP4.5: algunas regiones alcanzarán +25% de evaporación, otras el +15%	La evaporación superficial media sobre los océanos crece mientras decrece en tierra, siguiendo los patrones de incremento y decremento de las precipitaciones medias.	IPCC 2013

Tabla 14: Impactos esperados en la evaporación

Como ya se ha mencionado anteriormente, las fuerzas antropogénicas están provocando un aumento de las precipitaciones en algunas zonas del mundo. Al mismo tiempo, la variabilidad de la humedad atmosférica almacenada es insignificante, por lo que para equilibrar el aumento de la precipitación (que requiere una cierta cantidad de agua) es necesario un aumento medio global en la evaporación. El aumento en la cantidad de vapor de agua almacenado en la atmósfera está limitado

por la ecuación de Clausius-Clapeyron a un máximo de 7% / K. En consonancia con lo anterior, según las simulaciones del IPCC, tanto la evaporación como la precipitación están aumentando entre el 1 y el 3% / K (IPCC, 2013, p.986).

La evaporación superficial media anual en los modelos evaluados en AR4 muestra un aumento en la mayor parte del océano y aumenta o disminuye en tierra con el mismo patrón del aumento o disminución en la precipitación. Un comportamiento similar se produce en el conjunto de modelos CMIP5. Se observa un aumento de la evaporación sobre la mayor parte del océano así como importantes disminuciones sobre la tierra, especialmente en el sur y noroeste de África, y a lo largo del Mediterráneo. Las áreas de disminución corresponden a zonas con precipitación reducida. De hecho, si observamos la Figura 45, vemos la variación anual de la evaporación media a finales del siglo XXI, y se puede comparar con la de la Figura 97, que presenta la variación anual de precipitación media para el mismo período. Se observa que los cambios en la precipitación y en la evaporación van de la mano: donde hay un aumento en la precipitación existe un incremento similar en la evaporación.

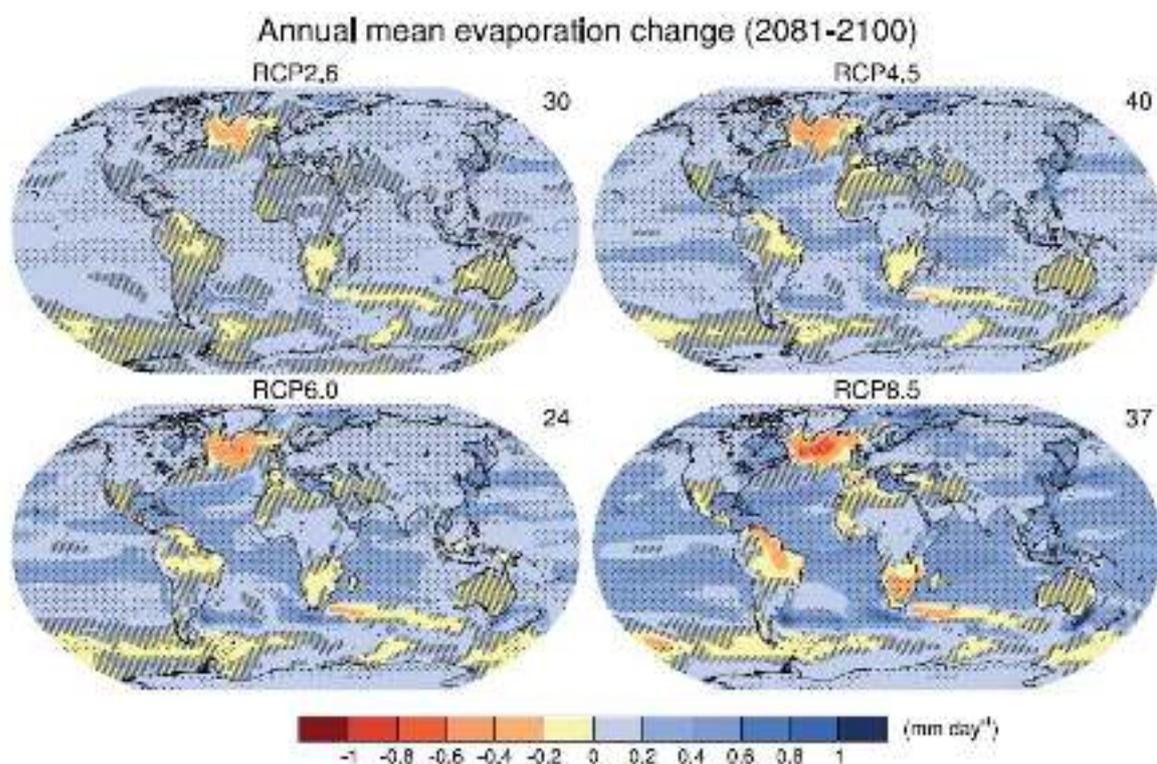


Figura 45: Cambio medio estimado en la evaporación (largo plazo)

La Figura 46 muestra el promedio anual de cambio en la evaporación según los CMIP5 para el período 2016-2035 con respecto a 1986-2005 bajo la RCP 4.5.

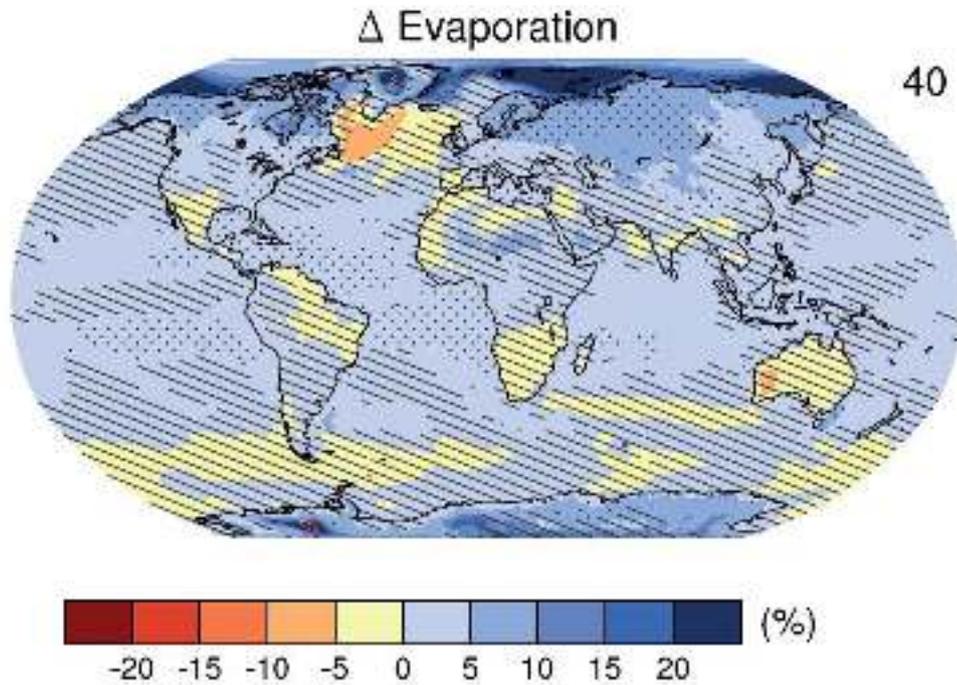


Figura 46: Porcentaje de cambio estimado en la evaporación. Periodo 2016-2035. Modelos CIMP5. Escenario RCP4.5

4.2. Impacto esperado en los recursos energéticos

Recordemos el punto de partida: todas las fuentes que pueden utilizarse para generar electricidad u otros tipos de energía final se consideran recursos energéticos. Estas fuentes se dividen en dos categorías: los recursos renovables y los no renovables. El viento, la radiación solar, el agua, los cultivos, el petróleo, el gas natural y el carbón son las fuentes que tomamos en consideración en el informe, pues son las que se ven más afectadas por el cambio climático. En esta sección, el enfoque está dirigido a la dotación de energía y, para ser más precisos, a la cantidad de energía primaria disponible para cada recurso.

Como se explicó en la sección 3, se agregarán las consecuencias climáticas que afectan a la dotación de energía bajo un parámetro único: el cambio climático. La única excepción se hace para la dotación de energía hidroeléctrica, que en nuestro análisis consideramos afectada solo por el sistema de agua, para poner así de relieve la fuerte correlación entre el sistema de agua y el sistema de energía.

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Viento	Disminución 1-2% en la densidad del aire y una disminución acorde en la energía debido a un aumento en la temperatura del aire de 5 ° C. Noroeste de Estados Unidos: la velocidad del viento se reducirá en 6.4% y en consecuencia los recursos de energía eólica puede disminuir hasta en un 40% en primavera y verano. Estados Unidos Continental: la velocidad del viento se reducirá entre un 1 y un 3,2% en los próximos 50 años, y entre 1,4 y 4,5% durante los próximos 100 años	Pryor y Barthelmie (2010) (de Lucena et al., 2009b) (Sailor et al., 2008) (Breslow y marinero, 2002) Mideska y Kallbekken (2010)
Bioenergía	Brasil:	(Persson et al., 2009)

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
	La caña de azúcar (bioetanol): la superficie plantada con caña de azúcar debería aumentar un 148% en el período 2005-2030, alcanzando 13,9 millones de hectáreas, y el rendimiento de los cultivos debería aumentar en un 7% (77 a 82 t / ha).	(de Lucena et al., 2009b)
Olas y mareas	Algunas regiones: +44% en la altura de las olas debido a la subida del 20% en la velocidad del viento +133% en la potencia debido a un 20% de aumento en la velocidad media del viento Otras regiones: -67% en la potencia debido a la disminución de 20% en la velocidad media del viento	(Harrison y Wallace, 2005)
Petróleo, gas y carbón	La calidad del carbón disminuye por el aumento de la precipitación media debido a un mayor contenido de humedad. Por otro lado, la calidad del carbón también se ve afectada por los incendios de la veta, más numerosos cuanto mayor sea la temperatura.	(Williamson et al., 2009)

Tabla 15: Impactos en los recursos energéticos

Los recursos que consideramos en esta sección son: eólica, bioenergía, olas y mareas y el petróleo, el gas natural y el carbón. La dotación de estos recursos se verá alterada de forma diferente. En relación a los recursos renovables, la cantidad de energía que se puede extraer de los mismos está estrechamente relacionada con los parámetros climáticos, por lo que la dotación de estos recursos varía con los cambios en las variables climáticas. Por otro lado, la cantidad de energía de un recurso no renovable no varía con el tiempo, por lo que el efecto del cambio climático sobre los mismos tiene que ver con los accesos, que podrían verse influenciados por los cambios en el clima. Veamos cada uno por separado.

4.2.1. Viento

La disponibilidad y la fiabilidad de la energía eólica dependen directamente de las condiciones meteorológicas. Los parques eólicos deben ser colocados en sitios donde las estadísticas de viento (máximo, mínimo, media y varianza) son óptimas para la producción de energía. Sólo unos pocos sitios tienen las características adecuadas para este propósito, y el cambio climático y sus consecuencias pueden introducir el riesgo de reducir la generación de energía eólica al disminuir o aumentar drásticamente la dotación de viento en muchos de ellos. También puede ocurrir la situación opuesta: una zona inadecuada podría convertirse en adecuada debido al cambio climático. Debido a lo anterior, las investigaciones sobre la viabilidad de la energía eólica en determinadas zonas no deben tener en cuenta solo los patrones actuales de viento sino también la previsión de evolución de los mismos. De la misma forma, estas investigaciones no deben centrarse solo en las estadísticas de viento (velocidad media del viento y rachas), sino también de otros factores como la densidad del aire.

Desgraciadamente no contamos todavía con un estudio de referencia sobre la evolución temporal de los patrones de viento a escala planetaria, sin embargo sí se encuentran en la literatura gran cantidad de estudios precisos que se ocupan de regiones o países específicos. A continuación se presentan varios de estos estudios que ofrecen algunas de estas proyecciones de viento regionales.

Pryor y Barthelmie (2010) presentaron en su estudio algunas tendencias de la densidad de la energía eólica en el norte y el sureste de Europa, y en el norte y sur de América. Una de las conclusiones del estudio es que el cambio climático global puede cambiar la distribución geográfica y la variabilidad inter e intra-anual de los recursos eólicos, o modificar otros aspectos de las condiciones externas

para desarrollos eólicos. Al igual que en otros componentes del cambio climático, habrá "ganadores" y "perdedores", es decir, regiones donde la energía eólica pueda beneficiarse del cambio climático y regiones donde esta pueda verse afectada negativamente. Según los investigadores, a finales del siglo XXI puede haber un aumento de la densidad de energía de invierno en el norte de Europa y un descenso en el sureste, pero la incertidumbre es muy elevada. Otras investigaciones sugieren que los cambios a lo largo de América del Sur pueden ser de una magnitud mayor, aunque las estimaciones adolecen también de una incertidumbre alta.

Hablando de América del Sur, algunos investigadores analizaron la vulnerabilidad de la energía eólica con el cambio climático en Brasil (de Lucena et al., 2009b). El objetivo del estudio fue analizar algunos de los posibles impactos del cambio climático global sobre el potencial de la energía eólica de Brasil, mediante la simulación de condiciones de viento asociadas con los escenarios A2 y el B2 del AR4 del IPCC. Los resultados indicaron que el potencial de la energía eólica en Brasil no se pondría en peligro en el futuro debido al cambio en las condiciones climáticas. Más bien al contrario, los autores encontraron que la velocidad media del viento se incrementaría considerablemente en las regiones costeras, especialmente en el norte y el noreste del país. Los resultados basados en las proyecciones climáticas mostraron que el potencial de generación de energía eólica de Brasil podría triplicarse en el escenario B2 y cuadruplicarse en el escenario A2 en 2071-2100, en comparación con la situación de referencia de 1961-1990. El potencial eólico se estimó utilizando las proyecciones de futuras velocidades del viento a 10 m de altura, que es inferior a la de una turbina eólica comercial típica. La relación entre la altura y la velocidad del viento se puede aproximar por una regla logarítmica, en la que la rugosidad es uno de los parámetros clave que depende de la cobertura vegetal. En la Figura 47 y la Figura 48 se presentan estas velocidades de viento estimadas.

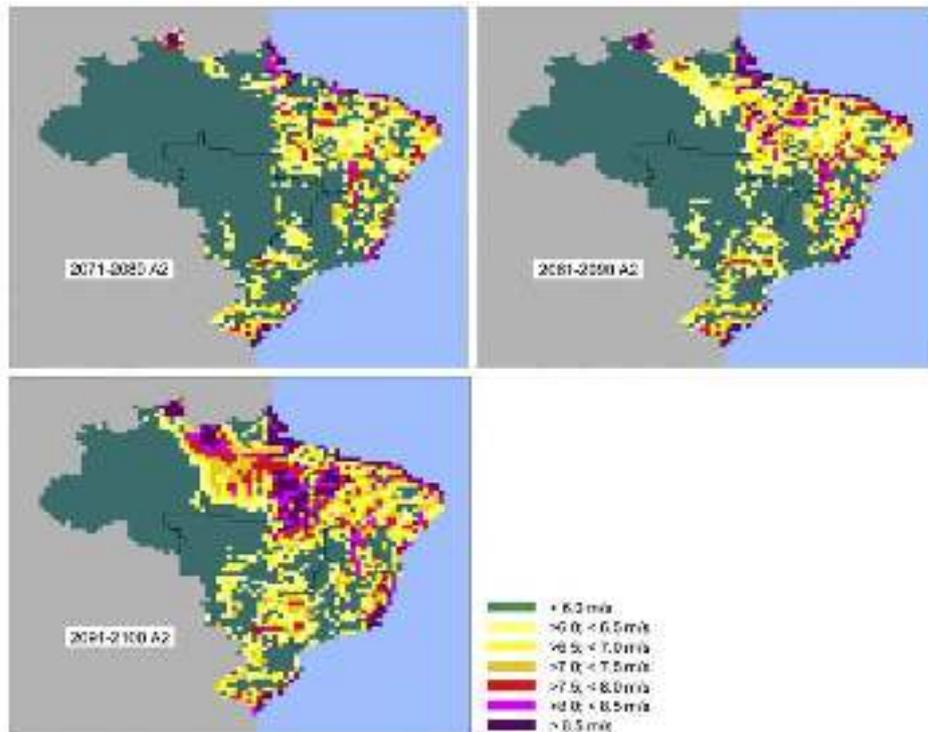


Figura 47: Velocidades de viento estimadas en Brasil. Escenario A2.

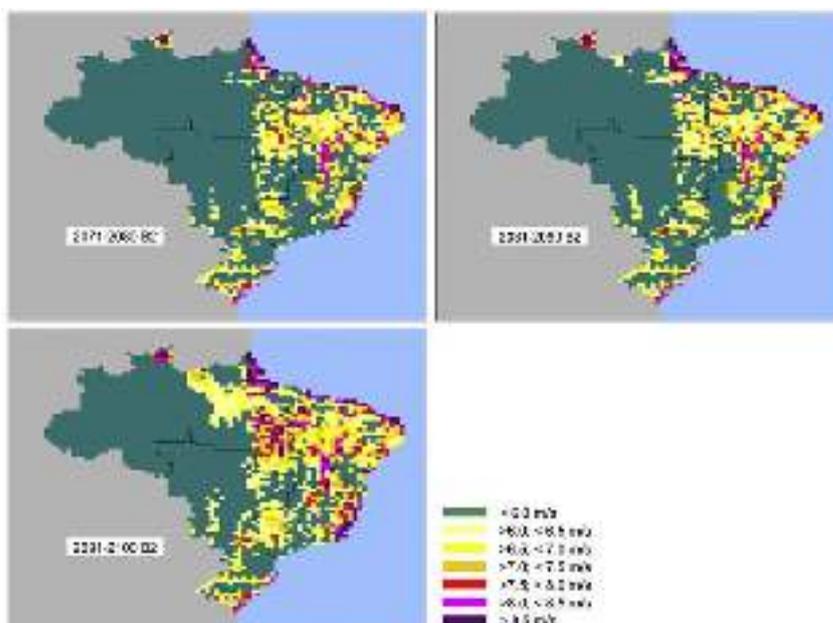


Figura 48: Velocidades de viento estimadas en Brasil. Escenario B2.

En (Sailor et al., 2008), los autores investigaron los escenarios de los impactos del cambio climático sobre el potencial de generación de energía eólica en una región de cinco estados en el Noroeste de los Estados Unidos (Idaho, Montana, Oregón, Washington y Wyoming). Los escenarios sugieren que las velocidades del viento de verano en el Noroeste pueden disminuir entre 5-10%, mientras que

las velocidades del viento de invierno disminuirán poco, o incluso aumentarán ligeramente. Con estos datos, el recurso eólico en el noroeste de Estados Unidos podría disminuir hasta en un 40% en los meses de primavera y verano. Los resultados para el invierno fueron menos consistentes.

Por otro lado, Breslow y Sailor en (Breslow y Sailor, 2002) investigaron el impacto potencial del cambio climático en las velocidades del viento, y por lo tanto en la energía eólica, en la zona continental de los EE.UU. Utilizaron el Modelo del Centro Climático de Canadá (CCC) y del Centro Hadley para proporcionar una gama de posibles variaciones en la velocidad media estacional del viento. Los resultados del modelo de Hadley sugieren un impacto mínimo del cambio climático en los recursos eólicos, mientras que los resultados del modelo de la CCC indican reducciones en las velocidades medias de viento del orden de 10 a 15%. Ambos coincidían además en la predicción de que en los EE.UU. las velocidades de viento se verán reducidas entre un 1,0 y un 3,2% en los próximos 50 años, y entre el 1,4 y el 4,5% en los próximos 100 años.

Mideska y Kallbekken (2010) destacan por su parte que, mientras que la frontera de la investigación ha avanzado significativamente, aún existe una importante necesidad de seguir profundizando para comprender mejor los efectos del cambio climático sobre el mercado de la electricidad. Los autores detectaron lagunas importantes en las que centraron su análisis: la demanda y el suministro de electricidad. Discutiendo sobre el suministro de electricidad y, específicamente, sobre la producción de energía eólica, los investigadores citan algunos estudios sobre el impacto del cambio climático en el potencial de la energía eólica que se habían llevado a cabo en diversas regiones:

- Clausen et al., 2007, citado en Mideska y Kallbekken, 2010, p. 4: El potencial de la energía eólica podría aumentar hasta en un 15% en la región del Mar Báltico según el escenario IPCC SRES A2.
- Lynch et al., 2006, citado en Mideska y Kallbekken, 2010, p. 4: El cambio climático tendrá un impacto diferente según las estaciones en el potencial de energía eólica de Irlanda. Habrá un aumento general de las velocidades del viento en invierno de alrededor del 8.4% mientras que se espera un descenso durante los meses de verano.
- Cradden et al., 2006, citado en Mideska y Kallbekken, 2010, p. 4: Se espera que las velocidades de viento disminuyan en verano un 5% en la mayor parte del Reino Unido y en un 15% en torno a la parte sur-oriental de Irlanda del Norte. Por el contrario, gran parte del Reino Unido experimentaría una mayor velocidad de viento durante el invierno.
- Bloom et al., 2008, citado en Mideska y Kallbekken, 2010, p. 4: Para el Mediterráneo Oriental se prevé que la velocidad de viento en 2071-2100 presente un aumento general en tierra y una disminución sobre el mar, con la excepción de un notable incremento sobre el Mar Egeo.

4.2.2. Bioenergía

Los biocombustibles líquidos son vulnerables a los efectos de las modificaciones climáticas a través del impacto sobre los cultivos utilizados como materia prima para su producción. Los cambios en la

temperatura, en los patrones de lluvia, en la frecuencia de las precipitaciones, en los fenómenos extremos y en el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera pueden alterar el rendimiento de los cultivos y zonas de distribución agrícolas.

Estudios como el de Persson sobre la producción de etanol de maíz (Persson et al., 2009), analizan la relación entre las condiciones climáticas y las prácticas de manejo del cultivo para evaluar el futuro EROI (*Energy Return On Investment*), es decir, la energía neta obtenida contabilizando todos los insumos energéticos no renovables empleados en la producción de biocombustibles. Este indicador puede ser una señal para la sostenibilidad a largo plazo de la producción de bioetanol, ya que representa tanto las prácticas de manejo de los cultivos como la variabilidad del clima. Da una evaluación cualitativa del futuro rendimiento de grano para una gestión específica de los cultivos.

La magnitud de la futura dotación de biocombustibles depende especialmente de la magnitud de las futuras zonas aptas para los cultivos energéticos debido a la modificación en el clima. En este sentido, (de Lucena et al., 2009b) evaluaron los efectos del cambio climático sobre la distribución geográfica de la producción de cultivos de biocombustibles. Se hizo el análisis del impacto en la producción de biocombustibles en Brasil, tanto para el etanol como para el biodiesel. El trabajo presenta una estimación de los impactos del cambio climático global sobre la distribución geográfica de los cultivos de caña de azúcar y de semillas oleaginosas (por bioetanol y biodiesel), considerando sólo los cambios en el rango de temperatura por región. El estudio no considera otras variables que pueden influir en la productividad y la adaptación de estos cultivos en regiones determinadas, como la concentración atmosférica de CO₂ y las alteraciones en los regímenes hídricos, así como la incidencia de las plagas de los cultivos y las enfermedades. Debido a estas limitaciones, los resultados presentados pueden ser demasiado pesimistas para algunos cultivos, como la caña de azúcar y la soja, y demasiado optimista para los demás. A tenor de todo lo anterior, a continuación se resume la situación del etanol y del biodiesel:

- **Etanol:** El área plantada con caña de azúcar podría aumentar un 148% en el período 2005-2030, alcanzando 13,9 millones de hectáreas, y el rendimiento del cultivo aumentaría en un 7% (de 77 a 82 t/ha). Como resultado, la producción crecería un 161%, alcanzando los 1140 millones de toneladas en 2030. Dado que los cultivos se dan en todas las regiones del país, incluso si el cultivo se hace inviable en algunas de estas regiones, otras pueden tomar el relevo, sobre todo el medio oeste, que se estima que continuará teniendo un rango de temperaturas favorables para la caña de azúcar (21 - 38 ° C), junto con grandes extensiones de tierra disponible. Es posible por tanto que haya cambios en la distribución geográfica, con algunas regiones haciéndose climáticamente desfavorables al cultivo de caña de azúcar, y otras cada vez más favorables. Incluso con estas posibles modificaciones en la distribución de cultivos, el cambio climático no tendrá un efecto significativamente negativo en la producción de etanol de caña de azúcar en Brasil.
- **Biodiesel:** Hay varias especies de plantas oleaginosas cultivadas en el país que tienen potencial como materia prima para producir biodiesel. La más destacable es la soja, cuyo aceite representa el 90% de la producción de aceite vegetal de Brasil, y las semillas de girasol, por su rendimiento en aceite y granos de ricino y por la resistencia

de la planta a la sequía. Según los resultados del informe, el noreste y las regiones del medio oeste de Brasil deberían experimentar un aumento sustancial de la temperatura, lo que puede afectar a su capacidad para producir soja. La producción de soja puede caer o incluso llegar a ser inviable en estas regiones debido a las grandes variaciones de temperatura. Por otro lado, el rango de temperatura para el cultivo de soja (8-34 ° C) en el sur mejorará, lo que puede compensar el efecto negativo de los cambios climáticos en el noreste y medio oeste. En términos generales, las proyecciones para la producción de soja son favorables. Las estimaciones hablan de un crecimiento de la producción alrededor de 3,5 millones de toneladas al año, lo que supone un incremento de entre el 5% y el 34%. A pesar de ello mantener la producción de biodiesel supondrá un desplazamiento de las zonas de cultivo hacia la región sur.

En relación a los eventos extremos, las sequías y las heladas, temperaturas y precipitaciones extremas, y los huracanes reducen la productividad de los cultivos y de ahí la disponibilidad de biomasa. Las tormentas y los ciclones también podrían destruir los equipos utilizados para la producción de biocombustibles.

4.2.3. Olas y mareas

Los océanos contienen gran cantidad de energía potencial a través de las olas y las mareas, aunque las tecnologías que aprovechan este tipo de recurso energético no estén demasiado extendidas, no al menos en la misma medida que otros recursos energéticos renovables como el sol o el viento.

El cambio climático tiene efectos sobre los patrones de viento, que a su vez provocan un impacto indirecto sobre las olas. En algunas regiones se ha observado un impacto positivo en la energía de las olas con una tendencia creciente en altura de las olas. En otras regiones, se ha producido una tendencia opuesta.

El estudio sobre el clima de la energía marina de (Harrison y Wallace, 2005) permite analizar la relación entre el viento y la energía de las olas. En este informe los autores ponen énfasis en Reino Unido, estudiando los cambios previstos de la futura dotación de las olas. La energía eólica depende de la velocidad del viento en una relación cúbica. Un cambio del 10% en la velocidad del viento podría alterar el rendimiento de energía de 13 a 25%, dependiendo del sitio y la temporada. Como las olas del mar son predominantemente el resultado de la acción del viento, los cambios en los patrones de viento afectarán, en última instancia, a los regímenes de las olas. Los convertidores de energía de las olas (WEC) están diseñados para capturar la energía de la altura de las olas, así que hay potenciales consecuencias significativas en el aprovechamiento de la energía de las olas. Por otro lado, la media del periodo de altura de ola y su energía varían dentro de la gama de cambios de velocidad del viento. El periodo de onda varía en proporción directa con la velocidad del viento, mientras que la altura de ola es más sensible a los aumentos de velocidad. Un aumento del 20% en la velocidad del viento aumenta la altura de las olas alrededor de un 44% (más de un metro en promedio). Por el contrario,

una disminución del 20% en la velocidad media del viento disminuye los niveles de energía disponibles en un 67%.

4.2.4. Combustibles fósiles

El petróleo, los recursos de gas y el carbón no se verán afectados directamente por el cambio climático, ya que son el resultado de un proceso de concentración que ha durado millones de años. Sin embargo, el cambio climático sí puede afectar al acceso a estos recursos. Por ejemplo, el cambio climático puede facilitar el acceso a nuevas zonas por la disminución de la capa de hielo en la región ártica.

Una mención específica debe hacerse para el carbón, especialmente a partir del estudio de (Williamson et al., 2009), que habla de los parámetros meteorológicos que podrían afectar a la dotación de combustibles fósiles, centrándose en el carbón. Si el promedio de precipitación aumentara, la calidad del carbón podría disminuir debido a un mayor contenido de humedad de las minas de carbón, aunque esta disponibilidad de carbón podría aumentar al reducirse los incendios en la veta de carbón. En el caso de disminución de la precipitación media, la situación sería la contraria.

Por su parte, las estaciones de operación de petróleo y gas en las zonas costeras de baja altitud, en tierra y las instalaciones off-shore sí podrían también verse afectadas por el cambio climático. Burkett (2011) en su análisis indicaba ocho amenazas claves para estas instalaciones: (1) la subida del nivel del mar, (2) la intensidad de las tormentas, (3) el régimen de olas, (4) la velocidad del viento, (5) la temperatura del agua, (6) los patrones de precipitación, (7) los cambios en el CO₂ y (8) la acidez del océano. El suministro de petróleo y gas en las instalaciones de costa y off-shore pueden incluso verse interrumpidos por eventos climáticos extremos, como huracanes intensos. El aumento previsto de la frecuencia, duración e intensidad de este tipo de eventos extremos puede tener impactos significativos en el suministro de petróleo y gas.

El refino de petróleo también puede verse afectado por los fenómenos extremos, especialmente debido a una menor disponibilidad de agua al tratarse de un actividad con un consumo muy intensivo en la misma. La demanda de agua en las refinerías de petróleo puede verse afectada por el aumento de las temperaturas.

Otros elementos que podrían verse afectados son los sistemas de transporte de gas y petróleo, por encontrarse expuestos a factores como los flujos de lodo, las inundaciones, los deslizamientos y otros eventos meteorológicos extremos.

4.2.5. Recursos hidroeléctricos

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Recursos hidroeléctricos/ Escorrentía	Proyecciones para el año 2050: +10 a + 40% de escorrentía en el este de África ecuatorial, la cuenca de La Plata y zonas de latitud alta en Norte América y Eurasia Desde -10 hasta -30% de escorrentía en el sur de África, el sur de Europa, el Medio Oriente y en latitudes medias el oeste de América del Norte Aumenta el flujo de agua dulce a nivel mundial en un 15% en 2100 (MIT Outlook 2014)	(IPCC, 2013)

Tabla 16: Impactos del agua sobre los recursos energéticos

Como ya se ha anticipado en secciones anteriores, el agua, como recurso energético, tiene una fuerte correlación con todos los componentes de un sistema de energía, y es por esta razón por la que la consideramos como una entidad independiente.

Principalmente el agua influye en la capacidad de generación de energía hidroeléctrica. Las centrales hidroeléctricas dependen del ciclo hidrológico y de la disponibilidad de los recursos hídricos. Sin embargo, el agua, como recurso energético, se utiliza para varios propósitos más, no sólo para la generación de energía hidroeléctrica. La agricultura y los procesos de refrigeración, por ejemplo, son necesidades que deben ser tomadas en consideración cuando queremos analizar la cantidad de recursos hídricos disponibles para la generación de energía hidroeléctrica.

La cantidad de agua disponible para todos estos objetivos se pondera con el parámetro de escorrentía. La escorrentía es aquella parte de la precipitación que no se evapora sino que fluye sobre la superficie del suelo y vuelve a acumularse. Varias investigaciones en todo el mundo evalúan los impactos futuros del cambio climático en la escorrentía usando diversos modelos hidrológicos.

El WGI del IPCC en la primera parte del AR5 (IPCC, 2013) proyectó cambios de la escorrentía en dos escalas de tiempo diferentes. Los modelos globales a escala de cuenca hidrográfica predicen un incremento de la escorrentía debido al calentamiento global en las cuencas de Liard (Canadá), Rio Grande (Brasil) y Xiangxi (China), así como en el noroeste de África, el sur de Arabia y el sureste de América del Sur. Por otro lado predicen también la disminución en las cuencas de Okavango (suroeste de África), el norte de África, el oeste de Australia, Europa del sur y el suroeste de EE.UU. (véase la Figura 49).

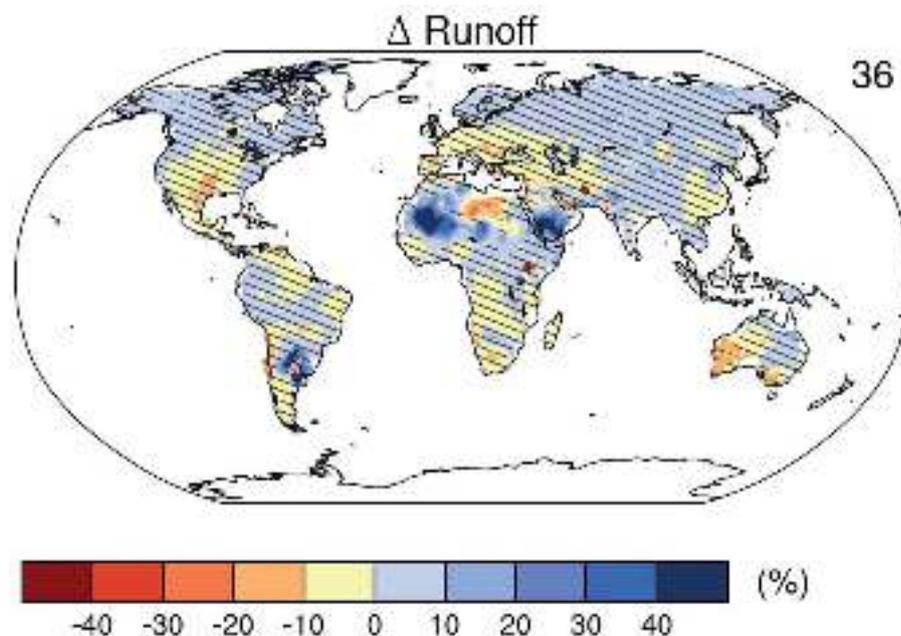


Figura 49: Predicción de la modificación de la escorrentía

Con respecto a las proyecciones a largo plazo, el informe AR4 predijo para el siglo XXI disminuciones de la escorrentía en el sur de Europa, Oriente Medio y el suroeste de EE.UU; así como el aumento en

el sureste de Asia, África oriental tropical y las altas latitudes septentrionales. Los mismos resultados se obtuvieron a partir de los modelos CMIP5 según los diversos RCPs, tal y como se muestra en Figura 50. La gran disminución de la escorrentía en el sur de Europa y el sur de África son consistentes con los cambios en la precipitación y el calentamiento inducido por el aumento en la evapotranspiración. Los altos incrementos de escorrentía previstos en latitudes septentrionales bajo RCP8.5 están también en consonancia con los aumentos de precipitación proyectados.

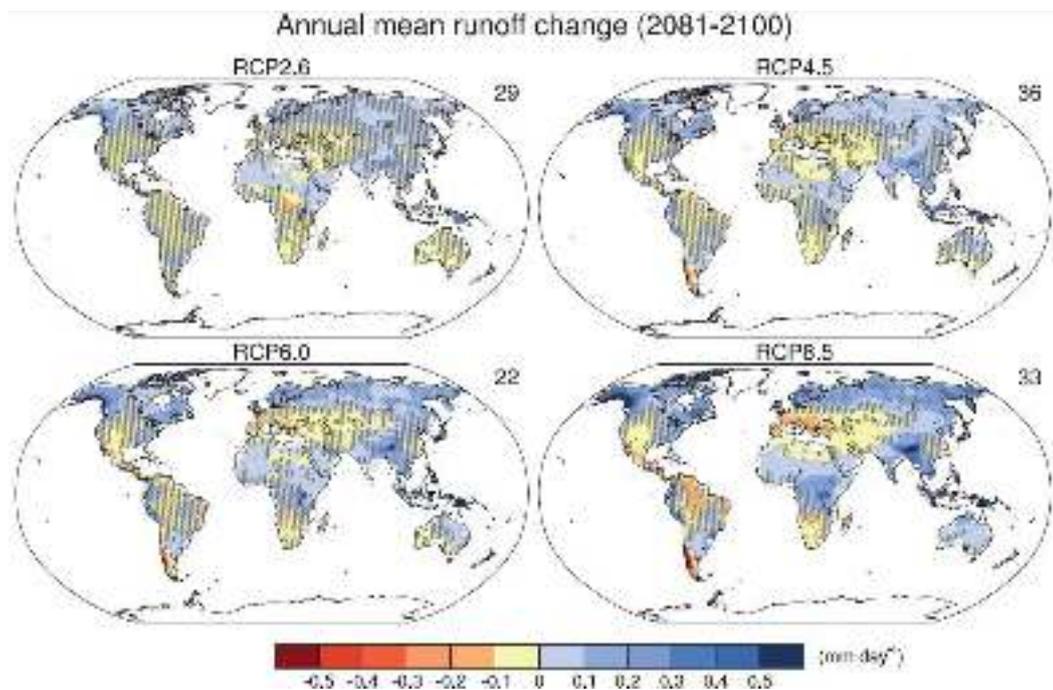


Figura 50: Cambio anual medio en la escorrentía (2081-2100)

El análisis de (Arnell, 2003) sobre estos resultados, aunque se ha quedado obsoleto ya que tuvo en cuenta los escenarios SRES y no los RCPs, nos da una información importante acerca de las cuencas. En la década de 2020, aproximadamente un tercio de todas las cuencas experimentará un aumento sustancial de la escorrentía, otro tercio sufrirá una fuerte disminución, mientras que el último tercio no mostrará cambios de consideración. En 2050, el número de cuencas sin cambios sustanciales se reducirá al 20 o 30%, bajando al 10 o 30% en la década de 2080. La Figura 51 muestra el grado de consistencia en la dirección prevista de cambio en la escorrentía media. Las áreas con disminución significativa de la escorrentía incluyen gran parte de Europa, Oriente Medio, África del Sur, América del Norte y la mayor parte de América del Sur. Las áreas con aumentos serían las latitudes altas de Norte América y Siberia, el este de África, partes de África al sur del Sahara y Australia, y el sur y el este de Asia.

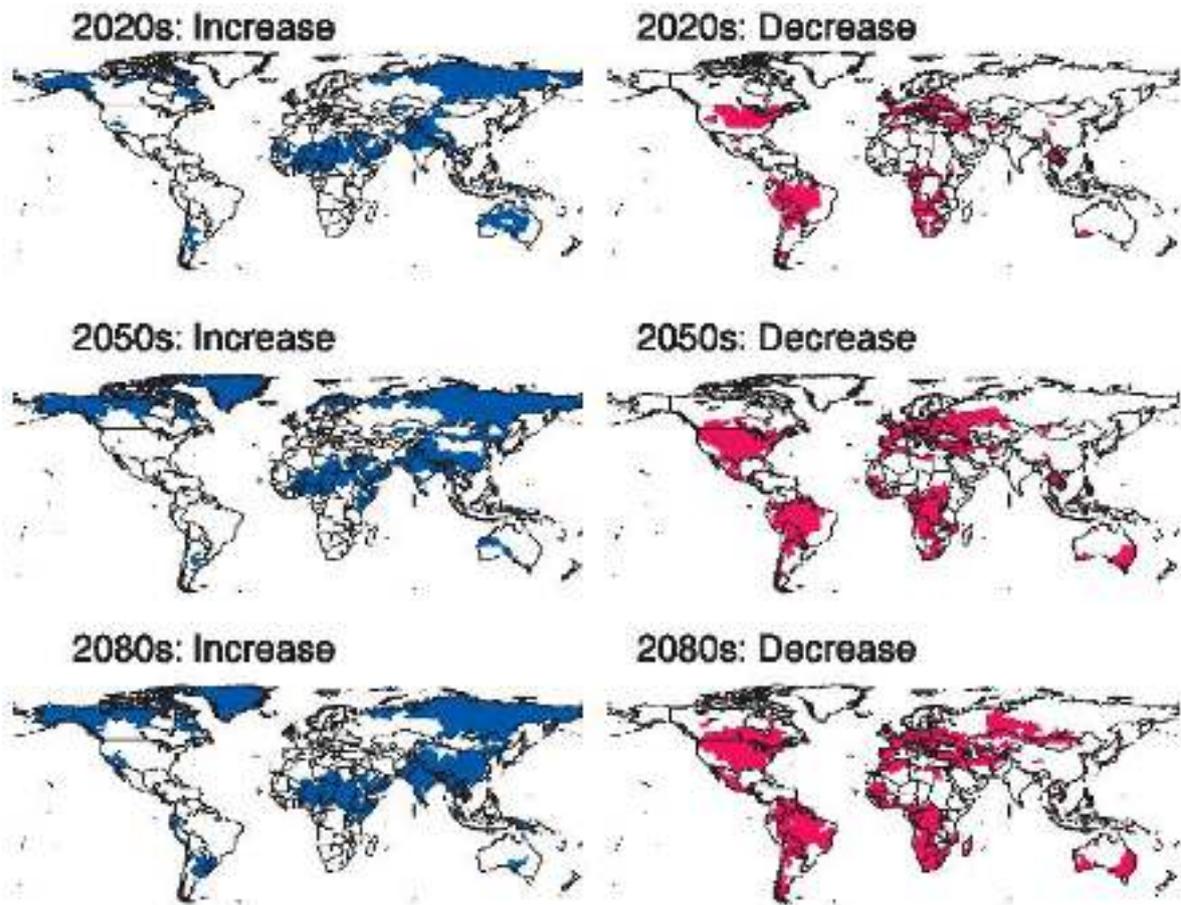


Figura 51: Cambios esperados en la escorrentía media

A partir de estas tendencias cualitativas queda en evidencia que los futuros cambios en la escorrentía no son unívocos en todo el mundo: algunas regiones sufrirán incrementos en la disponibilidad de agua y algunas otras disminuciones.

Además de estos datos agregados, podemos encontrar información más específica por regiones en otros estudios. Por ejemplo, en el artículo de Milly et al. (2005), los autores muestran tendencias específicas y rangos de variación en diversas regiones del mundo, explicando también las causas de tales cambios. Para ello utilizaron un conjunto de 12 modelos climáticos con los que simularon los patrones regionales observados en el caudal durante el siglo XX, para desde ahí proyectar futuros cambios en la escorrentía. Estos modelos predicen un 10-40% de aumento en la escorrentía en el este de África ecuatorial, la cuenca de La Plata y las latitudes altas de Norte América y Eurasia, así como de un 10 a un 30% de disminución en la escorrentía en el sur de África, el sur de Europa, Oriente Medio y latitudes oeste de América del Norte para el año 2050 (véase la Figura 52).

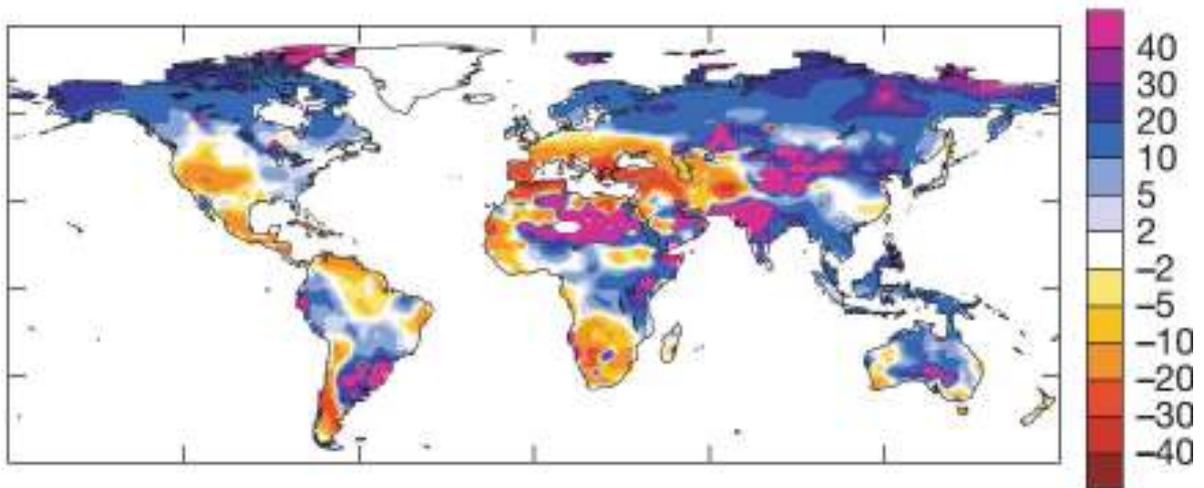


Figura 52: Evolución prevista de la escorrentía a 2050 (Milly et al., 2010)

Los autores destacaron que, en general, las áreas de aumento de la escorrentía se reducirán con el tiempo, mientras que las zonas de disminución crecerán.

Otro artículo sobre el tema fue el Hamududu y Killingtveit (2012), cuyos autores, aunque se centraron principalmente en la generación de energía hidroeléctrica, suministraron también una proyección de los futuros cambios de escorrentía. Hamadudu y Killingtveit utilizaron un conjunto de patrones regionales de los cambios en la escorrentía, calculados a partir de los modelos de circulación global (GCM). Hicieron simulaciones con 12 modelos diferentes. A partir de ellas encontraron que a nivel mundial la generación neta de energía hidroeléctrica se prevé que cambie muy poco para el año 2050. Los datos de escorrentía que manejaron se pueden observar en la Figura 53.

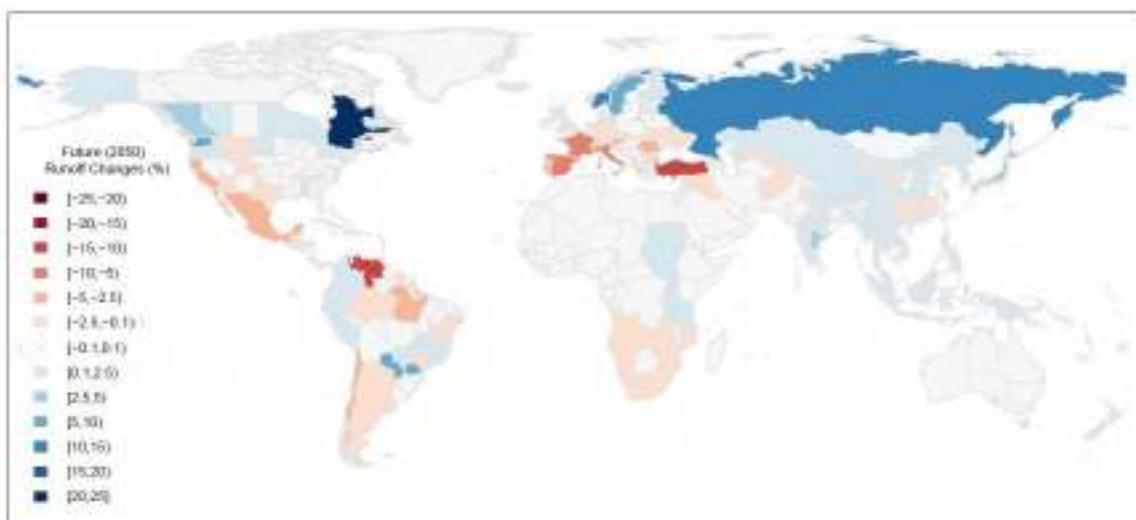


Figura 53: Cambios en la escorrentía a 2050 (Hamadudu et al., 2012)

Sobre la base de esta evaluación, los autores concluyeron que, aunque algunos países y/o regiones pueden experimentar impactos significativos, el cambio climático no dará lugar a cambios netos significativos en la generación de energía hidroeléctrica a escala global.

Otros autores (Hamlet et al., 2010) analizaron los efectos del cambio climático en la oferta y demanda de energía en el noroeste del estado de Washington y del Pacífico. En su artículo se evaluaron los posibles cambios en la estacionalidad y la cantidad anual de producción de energía hidroeléctrica y los cambios en la demanda de energía mediante la vinculación de los escenarios climáticos con los caudales producidos por un modelo hidrológico.

Los cambios en la temperatura y las precipitaciones que se esperan en el siglo XXI tendrán profundas implicaciones en el volumen de caudal en el noroeste del Pacífico, y estos a su vez tendrán implicaciones importantes para el suministro de energía eléctrica a escala regional. La producción de energía hidroeléctrica en la cuenca del río Columbia está fuertemente correlacionada con la modificación esperada en su caudal. La Figura 54 muestra las simulaciones del caudal medio mensual promedio en el río Columbia a su paso por la ciudad The Dalles, bajo el escenario base, los tres A1B y el B1. El calentamiento global producirá un aumento del flujo en invierno y flujos sistemáticamente más bajos en verano.

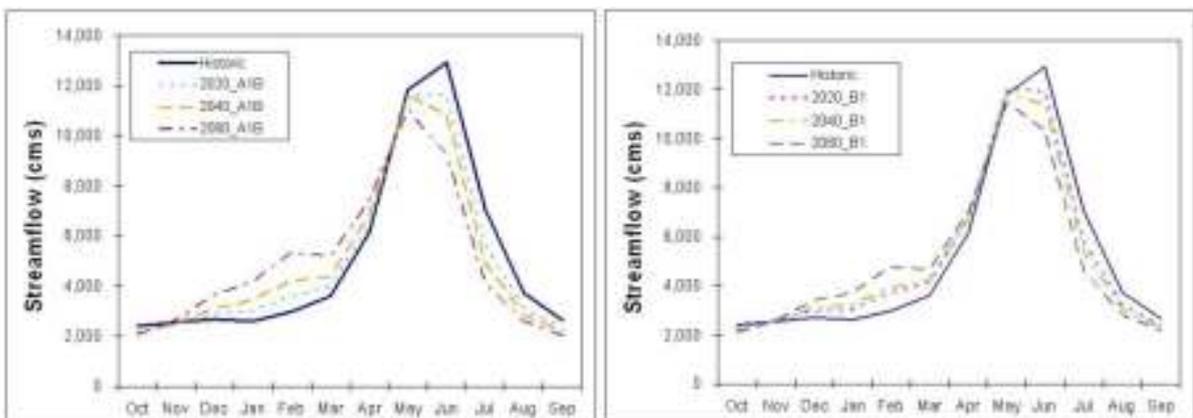


Figura 54: Estudio del caudal y el potencial hidroeléctrica en la cuenca del río Columbia

En contraste con los estudios mencionados hasta ahora, el MIT presentó un estudio en 2014 donde incluía una estimación global del futuro abastecimiento de agua total. Según este estudio, el suministro de agua total en 2010 fue de 46 billones de metros cúbicos, mientras que en 2100 será de 54 billones de metros cúbicos.

4.3. Impactos esperados en la demanda energética

La evaluación de los impactos del cambio climático sobre la demanda de energía es fundamental para la gestión de todo el sistema energético. Es tan importante porque nos da una estimación del consumo de energía en el futuro. Este análisis, que podría parecer de causalidad lineal entre oferta y demanda, se complica cuando entra la variable del cambio climático. Veámoslo con un ejemplo: un aumento de la temperatura del aire en superficie en verano dará lugar a un aumento en el consumo de electricidad para refrigeración, y de ahí un incremento de la generación de electricidad (afectados por el cambio climático) que requiere más recursos, los cuales a su vez están influenciados por los cambios climáticos. Vemos por tanto que los impactos del cambio climático en el sistema

energético no se limitan a la parte de los recursos y la oferta, hay realimentaciones que tener en cuenta.

Los tipos de demanda que se ven afectados de forma directa por el cambio climático son varios. Por un lado tenemos las necesidades energéticas, especialmente de refrigeración, en el sector residencial, pero no es la única. La cantidad de energía consumida en los edificios comerciales e industriales para calefacción de espacios es una segunda. A continuación podíamos citar otras como la energía para calefacción, para la refrigeración comercial, para la refrigeración de procesos industriales, para la agricultura y para la desalinización. Finalmente, como hemos visto en secciones previas, los requerimientos de agua son también alterados por el cambio climático: la demanda de agua en la industria y la agricultura variará a causa de la temperatura.

Esta sección considerará la subida de la temperatura y los cambios en el agua como los orígenes principales de los impactos en la demanda energética. El aumento de la temperatura media va a modificar el consumo de energía en los edificios (calefacción y demanda de refrigeración), en la industria y en la agricultura. El aumento de temperatura, además, va a modificar el uso del agua en los procesos industriales y en el sector agrícola.

4.3.1. Impactos de los cambios de temperatura en la demanda de energía

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Demanda de calefacción	Incremento del 0.8% por año entre 2000 y 2030. Lento decrecimiento desde 2030. -34% en 2100 (Maryland, EE.UU)	Ruth y Lin, 2006
Demanda de refrigeración	7% incremento entre 2020 y 2030. 1% disminución entre 2030 y 2100. +70% incremento para 2100, sobre la demanda estimada sin cambio climático, esto supone una demanda 40 veces superior en 2100 a la del 2000	Wilbanks et al., 2008
Industria	Consumo en EE.UU. por unidad de producción industrial: +0.0127% para un incremento de 1 HDD (Fahrenheit) +0.0032% para un incremento de 1 CDD (Fahrenheit) 1,098 billones de m3 de agua para 2100 (0,763 billones de m3 en 2010: +45%)	MIT Outlook 2014
Agricultura	Carga riego en julio en Estados Unidos (Noroeste del Pacífico): + 9,8% sin cambios en la superficie de cultivo de regadío (evaluación anterior: + 8,7%) Agua en agricultura: 1,389 billones de m3 en 2100 (1,551 billones de m3 en 2010: -10%)	Wilbanks et al., 2008 MIT Outlook 2014

Tabla 17: Impactos de la temperatura sobre la demanda

4.3.1.1. Demanda de calefacción y refrigeración en los edificios

La demanda total de energía para la calefacción y refrigeración de los edificios depende de la temperatura exterior. Una gran cantidad de estudios empíricos llegan a la misma conclusión: que la demanda de energía presenta un patrón de dependencia de la temperatura (TDP) en forma de U (véase la Figura 55). Esta TDP en forma de U sugiere que el cambio climático puede tener consecuencias ambiguas para la demanda futura de energía a nivel mundial. El aumento de la temperatura exterior en general podría reducir la demanda de calefacción mientras que el aumento en las necesidades de refrigeración podría incrementar la demanda. La evaluación de los impactos de las variaciones de temperatura se puede realizar utilizando el concepto de calentamiento y enfriamiento grados-día. Este método es apropiado si la eficiencia de los equipos se mantiene constante. Además, su aplicación es limitada, ya que solo considera el efecto de la temperatura de

bulbo seco, algo insuficiente ya que la humedad ambiental tiene una gran influencia en la determinación de la carga necesaria para refrigeración.

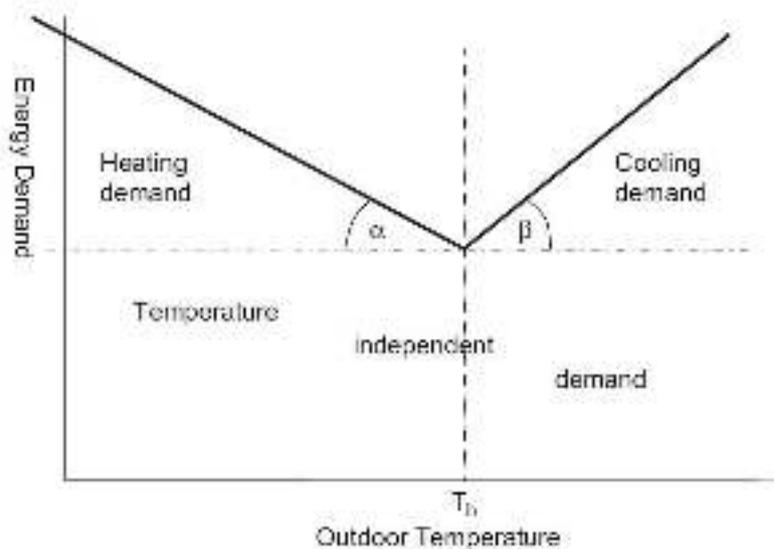


Figura 55: Patrón de dependencia de la demanda para calefacción y refrigeración con la temperatura exterior

El trabajo de Isaac y van Vuuren (2009) es uno de los pocos documentos que considera globalmente los impactos del cambio climático en el sector energético. En este trabajo los autores trataron de describir la demanda de calefacción residencial y de refrigeración en el contexto del cambio climático a escala global. Utilizaron relaciones relativamente simples para describir la demanda. De nuevo, los autores destacaron que los dos efectos del aumento de la temperatura en la demanda de energía en los edificios son claras: por un lado, disminuye el consumo para calefacción y aumenta para refrigeración. Por otro lado no es tan obvio si el neto aumentará o disminuirá, principalmente porque las reducciones y los incrementos de la demanda de energía en todo el mundo no son homogéneos.

Los autores utilizaron funciones basadas en Grados-día de calefacción y de refrigeración (HDD y CDD⁹) para estimar la demanda energética de los edificios. Además, utilizaron también otros parámetros, como el consumo medio de energía por hogar, la penetración de aparatos de aire acondicionado en los hogares y las mejoras en la eficiencia, para evaluar de la mejor manera el consumo futuro de energía en los edificios. Para todo ello plantearon escenarios futuros que describen la demanda regional y la oferta en función de los cambios en la población, la actividad económica y la eficiencia energética.

Los resultados de su investigación son fácilmente visibles en el diagrama de la Figura 56.

⁹ La interpretación de los grados día de calefacción (HDD) sería el número de grados para los que sería necesario utilizar recursos energéticos en los días de invierno para aproximar la temperatura ambiente a la de confort. Por su parte, los grados día de refrigeración (CDD) medirían los grados que haría falta enfriar con recursos energéticos para hacer descender en verano la temperatura hasta el nivel base o de confort. Esta temperatura base es por lo general una temperatura interior de 18 °C (~ 65 ° F) que es la considerada más adecuada para el confort humano.

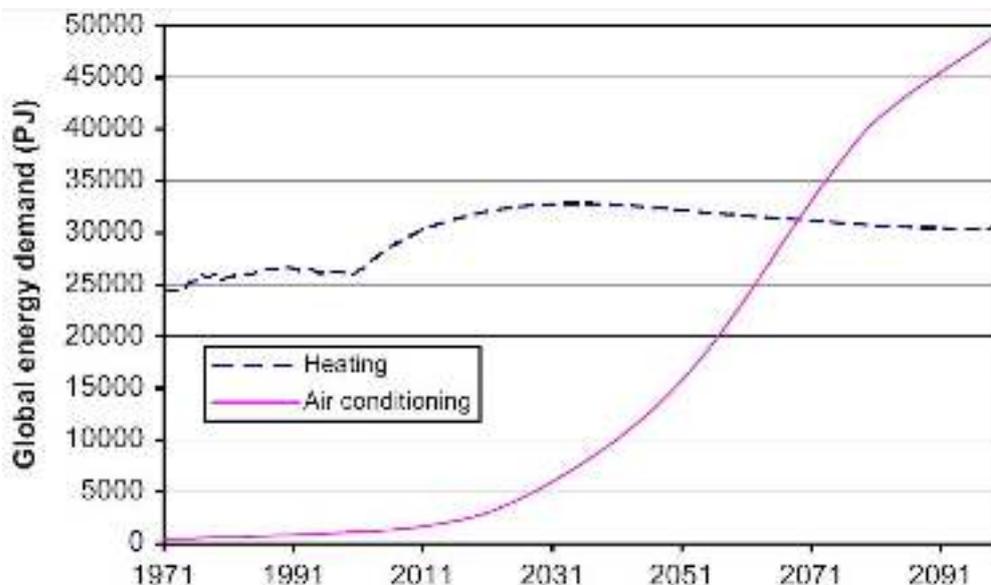


Figura 56: Evolución de la demanda de calefacción y refrigeración residencial

Otro estudio (Wang y Chen, 2014) cuantificó el impacto del cambio climático en el consumo de energía en calefacción y refrigeración en los edificios en los EE.UU. En este estudio se utilizó el modelo HadCM3 de Circulación Global (MCG) para generar los datos del tiempo para los próximos años: 2020, 2050 y 2080, para 15 ciudades en los EE.UU., sobre la base de tres escenarios de emisiones de CO₂. Se simularon dos tipos de edificios residenciales y siete tipos de edificios comerciales para cada una de las 15 ciudades. El estudio concluyó que el impacto del cambio climático variaría en gran medida según la ubicación geográfica y el tipo de construcción. Sin embargo, por lo general habría un aumento neto en el consumo de energía para 2080.

A diferencia de estudios precedentes, el trabajo de Wang y Chen no usa el indicador de días-grados, que puede proporcionar una estimación rápida del impacto del cambio climático en los edificios, pues solo tiene en cuenta la temperatura exterior como elemento de impacto, pero ignora otros factores como la radiación solar, las características de humedad y de construcción tales como masa térmica, que afectan en gran medida a la demanda de energía de un edificio. Por estas razones, los autores utilizaron métodos de simulación más sofisticados. La conclusión principal del estudio fue que la mayoría de las ciudades ubicadas en zonas de clima cálido experimentarían un incremento neto en la demanda de energía para refrigeración y calefacción hacia la década de 2080, mientras que las ciudades en zonas de clima frío experimentarían una reducción neta.

Por su parte, Wilbanks (Wilbanks et al., 2008) también se ocuparon de analizar la demanda de energía en los edificios residenciales y comerciales. Los autores se centraron principalmente en los efectos del cambio climático en el consumo de energía en los edificios, haciendo hincapié en la calefacción y la refrigeración del espacio.

Otro estudio de referencia es el de Mansur et al. (2005). En él se calcularon los efectos del cambio climático sobre la demanda energética para calefacción suponiendo un incremento de 1 °C en enero de 2050. El impacto en el consumo de energía en la calefacción residencial fue relativamente

modesto. Se predijo una reducción de 2,8% del consumo de electricidad residencial para los consumidores de electricidad, una reducción del 2% del consumo eléctrico residencial para los consumidores de gas, y una reducción del 5,7% del consumo de electricidad residencial para clientes de combustible diésel para calefacción. De ahí, los autores pronosticaron que un aumento de las temperaturas de 1 ° C en 2050 produciría una reducción en el consumo de electricidad de alrededor del 3% de la electricidad para los clientes totalmente eléctricos. Las temperaturas más cálidas también reducirían el consumo de gas natural en un 3% y la demanda de diésel un 12%, cifra bastante considerable. En cuanto a la refrigeración, los autores pronosticaron que cuando las temperaturas de julio se incrementaran en un 1° C, los clientes eléctricos sólo aumentarían su consumo de electricidad en un 4%, los clientes de gas natural aumentarían su demanda de electricidad en un 6%, y los clientes de diésel demandarían un 15 % más de electricidad. Por último, los cambios proyectados en la refrigeración de locales comerciales cuando las temperaturas de enero se incrementaran en un 1° C muestran un aumento del consumo de electricidad del 4,6% para los clientes puramente eléctricos, un descenso del 2% para los clientes de gas natural y un incremento del 13,8% para los clientes de diésel.

4.3.1.1.1. Calefacción

En la Figura 56 se puede observar que la demanda global de energía para calefacción se incrementará un 0,8% al año entre 2000 y 2030 debido al aumento de los ingresos y de la población, y después disminuirá lentamente debido al nivel de crecimiento de la población y a los efectos del cambio climático. Las regiones con mayor demanda energética de calefacción son Europa Occidental, EE.UU., Rusia y China. En Europa, la demanda de energía final se prevé que comenzará a disminuir en 2010 al 0,7% anual. En Rusia se espera que la demanda se reduzca a partir de 2020 un 0,6% cada año. La tendencia proyectada es consistente con el hecho de que la demanda de energía para calefacción ha sido más o menos constante en las últimas décadas en Europa. En los EE.UU. y China, la demanda de calefacción aumentará a lo largo del siglo. El 0,7% de aumento gradual de la demanda anual en los EE.UU. será impulsado por el aumento en las áreas de población y vivienda. En China la intensidad de calentamiento también se prevé que suba a partir de 2030. La mayor parte del crecimiento de la demanda de energía en este país se producirá antes de 2040, a una tasa del 1,7% anual.

Las tendencias de estos países y otros se pueden observar en la Figura 57. La reducción esperada de la demanda energética de calefacción para el año 2100 en todo el mundo es de 34%.

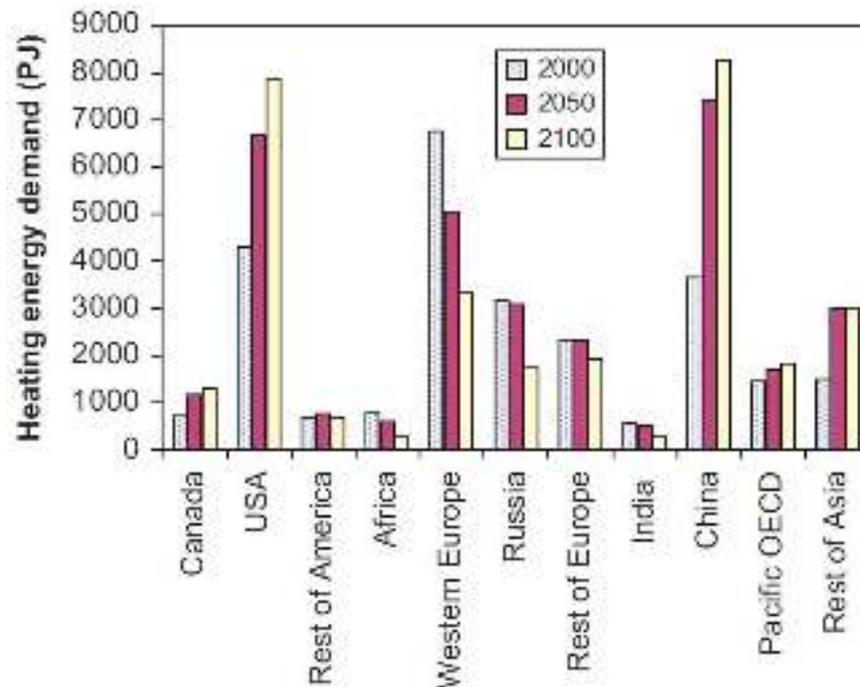


Figura 57: Evolución esperada de la demanda de calefacción

Ruth y Lin (Ruth y Lin, 2006) exploraron los impactos potenciales del cambio climático en el gas natural, la electricidad y el uso de combustible para calefacción en el sector residencial y los sectores comerciales en el estado de Maryland, EE.UU. Los autores no exploran los impactos del cambio climático a escala global, y tampoco a nivel de país: se concentraron en un solo estado, y eligieron Maryland porque las infraestructuras energéticas del estado han evolucionado para hacer frente tanto a las altas demandas de refrigeración durante el verano como a las demandas de calefacción durante el invierno. Los resultados indican que el cambio climático tendrá un impacto relativamente pequeño sobre la demanda futura de energía de Maryland. Es interesante además destacar que el documento también explora los cambios en otros sectores como el económico y el poblacional.

Las siguientes figuras ilustran los resultados del estudio, a saber, las proyecciones de consumo de electricidad per cápita, uso de gas natural per cápita, uso de combustible para calefacción per cápita, consumo de electricidad por empleado y uso de gas natural por empleado, y sus respectivos cambios porcentuales atribuibles al cambio climático.

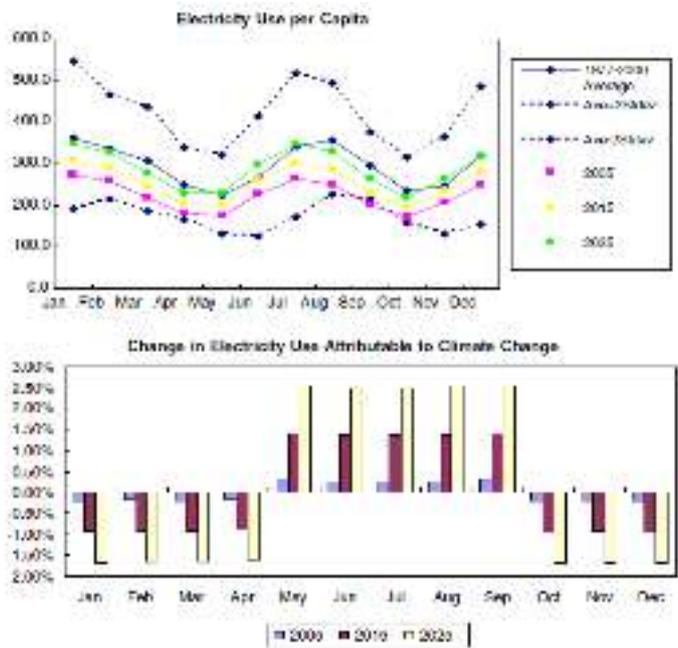


Figura 58: Cambio en el consumo de electricidad. Estado de Maryland

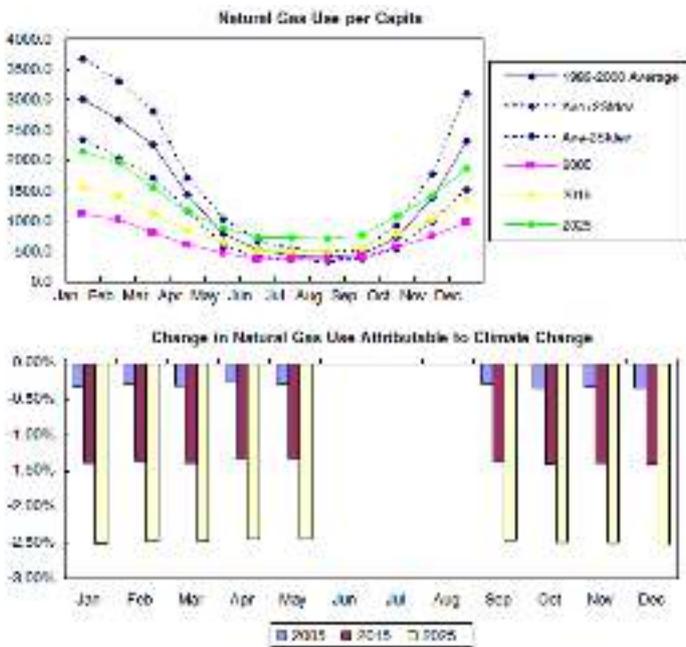


Figura 59: Cambio en el consumo de gas natural. Estado de Maryland

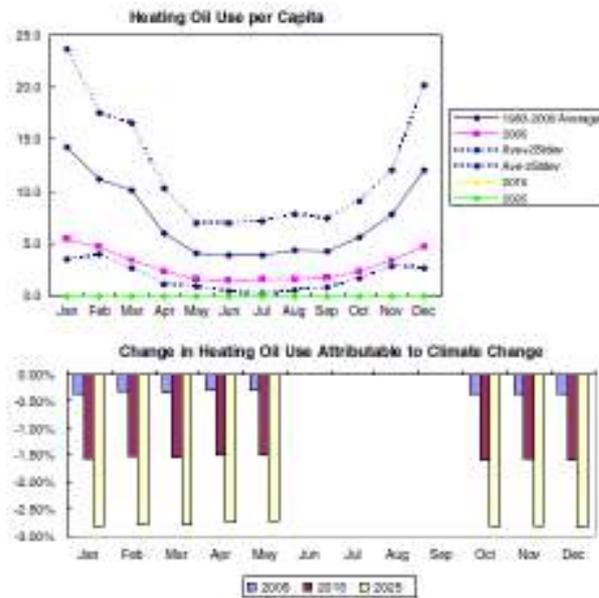


Figura 60: Cambio en el consumo de diésel para calefacción. Estado de Maryland

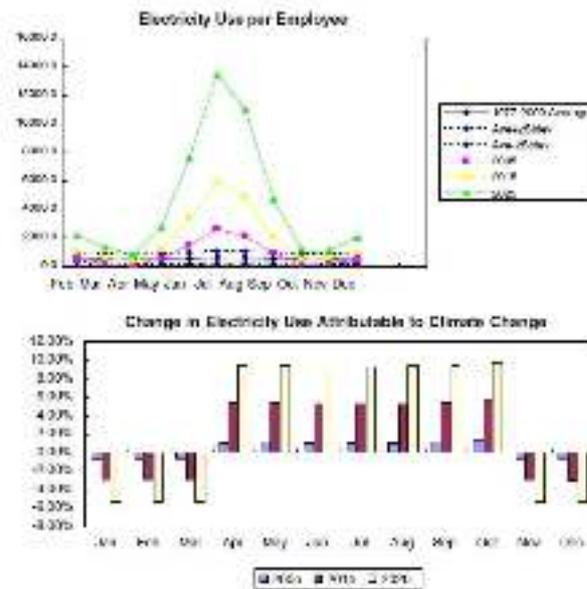


Figura 61: Cambio en el consumo de electricidad (empleado). Estado de Maryland

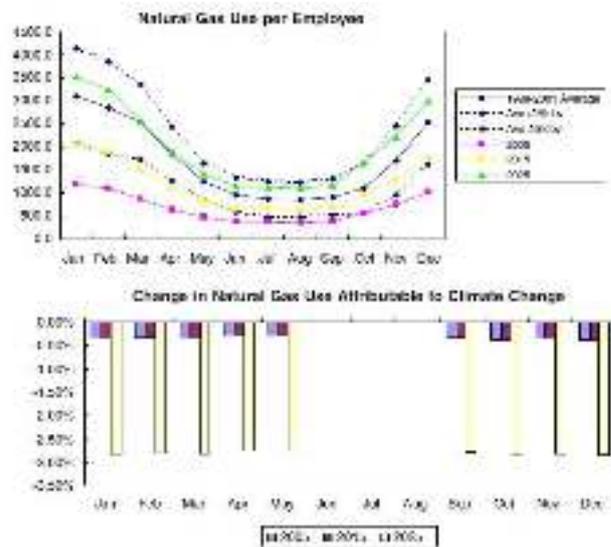


Figura 62: Cambio en el consumo de gas natural (empleado). Estado de Maryland

4.3.1.1.2. Refrigeración

Durante el siglo XXI, se espera que la penetración de aire acondicionado aumentará muy rápidamente en la mayoría de las regiones desarrolladas, impulsado por un aumento en los niveles de ingresos. Se prevé que su UEC¹⁰ aumentará de 1.900 kWh en 2000 hasta 4.800 kWh al final del siglo, debido sobre todo al cambio climático. En la India y el sudeste de Asia la UEC se prevé que aumente a niveles mucho más altos, en torno a 13.000 kWh debido al clima cálido. A nivel mundial, la tasa de aumento tendrá su apogeo entre 2020 y 2030, con un 7% por año, a partir de ahí se reducirá al 1% hasta fin de siglo. El resultado será una demanda de energía para refrigeración 40 veces mayor en 2100 que en 2000, una demanda aproximadamente un 70% mayor que la demanda proyectada sin cambio climático. La Figura 63 presenta las tendencias para el futuro de la demanda de refrigeración para algunos países o regiones específicas.

¹⁰ Unit Energy Consumption: la cantidad de energía usada por el dispositivo durante un año.

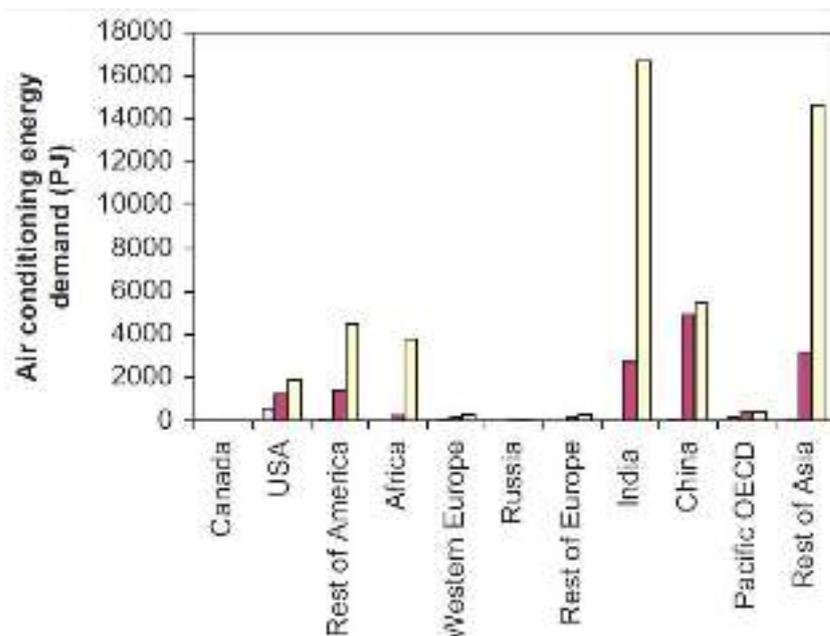


Figura 63: Evolución esperada de la demanda de refrigeración

4.3.1.2. Demanda de la industria

En términos generales, se considera que la demanda de energía industrial no es particularmente sensible a los cambios climáticos. Las instalaciones industriales dedican sólo un 6% de su consumo de energía al acondicionamiento térmico. Pero esto no significa que la industria no sea sensible en absoluto al clima. Gran parte de la energía utilizada en la industria se utiliza para calentar agua, por lo que el uso de energía probablemente disminuiría en la industria con el aumento de la temperatura global.

En el informe (Wilbanks et al., 2008) se cita el estudio de Considine (2000) en el que el autor realiza una investigación econométrica acerca de los usos energéticos en la industria de Estados Unidos, basado en Grados-día de calefacción y Grados-día de enfriamiento (en grados Fahrenheit). El estudio pronostica que en los Estados Unidos el consumo de energía por unidad de producción industrial aumentaría en 0.0127% para un aumento de 1 Grados-día de calefacción (HDD) o un 0.0032% para un incremento de 1 Grados-día de enfriamiento (CDD). Sobre una base anual de un 1 ° C de incremento de temperatura (1,8 ° F) habría un máximo de 657 menos HDD por año y 657 más CDD (en base Fahrenheit). Esto se traduciría en un 6,2% menos de demanda de energía neta en la industria, o un ahorro de 0,0422 EJ.

Por tanto, si bien la influencia de los cambios de temperatura en la demanda de calefacción residencial se ha comprobado que es importante, en el caso de la industria se observa que no lo es tanto (Scott y Huang, 2007, citado en Ebinger and World Bank, 2011). Las diferencias de temperatura con las que se trabaja en los procesos industriales son a menudo mucho más grandes que las fluctuaciones de temperatura al aire libre. Muchos procesos continuos operan a temperaturas

circundantes relativamente estables y, por lo tanto, tienen una demanda relativamente estable. Sin embargo, los procesos continuos relacionados con el procesamiento y almacenamiento de alimentos, por ejemplo, presentan diferencias relativamente pequeñas de temperatura y son posiblemente más sensible a las variaciones de temperatura. Por otra parte, el uso industrial del agua varía con el cambio climático. Se pueden encontrar algunas proyecciones en (MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2014).

4.3.1.3. *Demanda Agricultura*

Como ya se mencionó en secciones precedentes, los usos energéticos en agricultura se dividen en cinco categorías principales: operaciones de equipos de bombeo, riego, energía incorporada en los fertilizantes y productos químicos, transporte del producto y el secado y procesamiento. Un clima más cálido implica incrementos no solo en la demanda de agua en la agricultura de regadío, sino también en el uso de la energía para el bombeo. Sin embargo, no hay estimaciones precisas de estos efectos en la literatura.

4.3.2. *Impactos de los cambios de agua sobre la demanda de energía*

El sistema de agua está constituido por elementos variados. Las consecuencias del cambio climático podrían notarse en los océanos y la criósfera, como se ha explicado en secciones anteriores, pero también en recursos de agua dulce, que podemos localizar en la superficie (lagos, ríos, etc.) y en el subsuelo (en los acuíferos). Las aguas superficiales y subterráneas se transforman en un alto porcentaje en escorrentía, y la parte restante se evapora o se consume para satisfacer algunas necesidades, como el riego o las necesidades industriales. El agua utilizada para estas necesidades se define como el agua extraída. En (MIT, 2014), los expertos de recursos hídricos estiman que solo el 10% del suministro total de agua (como el flujo de agua dulce) está realmente disponible para ser extraído. El suministro de agua total mundial actual se estima en 46.398 millones de metros cúbicos, de los que 2.662 millones de metros cúbicos corresponden a extracciones y 1.544 millones de metros cúbicos a evaporación y consumo (ver Figura 64).



Figura 64: Diagrama Sankey de recursos de agua a escala global (2014)

La comparación de la Figura 64 con la Figura 65, que muestra las fuentes de agua y su uso a nivel mundial en 2100, prevé que el suministro mundial de agua dulce aumentará en un 17%, desde 46.398 millones de metros cúbicos a 54.454 millones de metros cúbicos, como resultado directo del aumento medio estimado de las precipitaciones. Por el lado de la demanda, se espera que las extracciones totales de agua aumenten a partir de los niveles actuales, de 2.700 millones de metros cúbicos a 3.200 millones de metros cúbicos en 2100 (19% de incremento). En cuanto al uso doméstico del agua, este se duplicará, pasando de 348 millones de metros cúbicos a 698 millones de metros cúbicos en 2100. También se puede distinguir entre el consumo de agua (la cantidad perdida por evaporación o consumida que no regresa a la cuenca) y las extracciones, que incluyen el consumo más el flujo de retorno. Quedarnos solo con las cifras de extracción y de consumo de los flujos anuales totales puede proporcionar una imagen engañosa de la adecuación de los recursos hídricos, ya que la ubicación y el calendario de los flujos también es importante. Del mismo modo, la estacionalidad de la precipitación a menudo pone de manifiesto que el calendario de los flujos no coincide con las necesidades.



Figura 65: Diagrama Sankey de recursos de agua a escala global (2100)

La demanda de agua para uso doméstico, la agricultura y la industria va a modificarse en el futuro debido al cambio climático, como hemos visto. El suministro de los recursos de agua dulce requiere una cierta cantidad de energía, y si el sistema de agua se prevé que sea modificado por el cambio climático, en consecuencia, también la demanda de energía variará para poder abastecerla. Para los escenarios de 2100 del MIT, y a pesar de la abundante oferta global, se muestra un mayor estrés hídrico en algunas partes de la India, China, Pakistán, Turquía, África del Norte, África del Sur y EE.UU. Garantizar el suministro necesario de agua dulce en estas regiones tendrá un gran costo económico y energético. Algunas regiones de todo el mundo ya están sufriendo este problema, como las Islas Canarias, la cuenca del río Indo y California.

Por otro lado, algunas áreas, como de nuevo la cuenca del río Indo en la India o Pakistán, pueden sufrir escasez sustancial de aguas superficiales. En esta zona, las necesidades de extracción superan la cantidad de agua superficial disponible para el año 2100, lo que supone una situación insostenible que requiere de una estrategia de adaptación compleja.

Actualmente no hay disponibles proyecciones específicas sobre este tema a nivel mundial, y tampoco a escala regional. Este problema es innegable y supone un ámbito de investigación al que hay que prestar especial atención.

4.4. Impactos esperados en la oferta energética

Una vez más, el marco de la Figura 32, será el que nos guíe en el análisis de esta parte del sistema energético: la oferta (ver Figura 66).

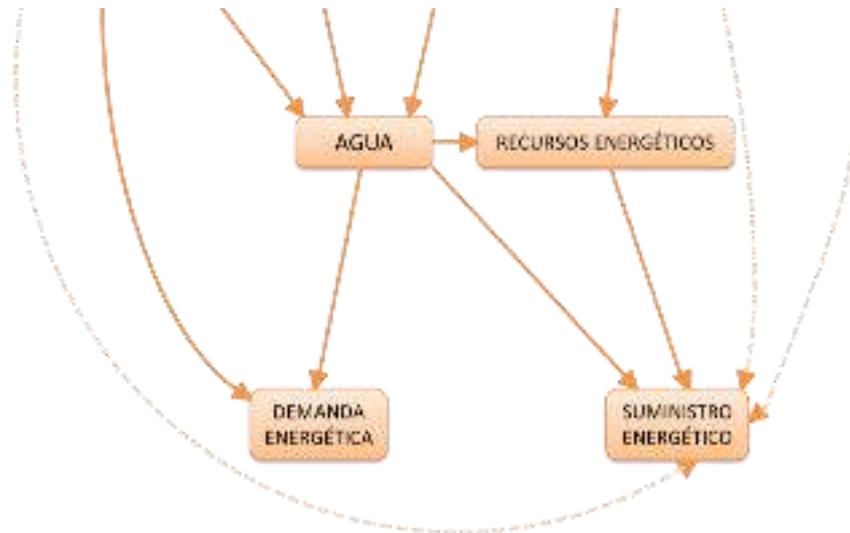


Figura 66: Marco de análisis. Oferta y demanda

En principio, todos los impactos deben ser atribuidos al cambio climático, aunque hay algunas matizaciones. La flecha del marco correspondiente a la temperatura hace referencia a la influencia de la temperatura en el análisis de la eficiencia de las centrales generadores, mientras que la flecha correspondiente al agua indica la dependencia de este recurso por parte de los sistemas de refrigeración de las instalaciones. Finalmente, la flecha de “cambio climático” recoge, como veremos, las proyecciones de mitigación.

4.4.1. Impactos de los cambios de temperatura en la generación de energía

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
<p>Eficiencia</p> <ul style="list-style-type: none"> Fotovoltaica 	<p>El aumento de las temperaturas puede modificar la eficiencia de las células fotovoltaicas (la energía producida depende de la temperatura de la célula) y reducir la generación eléctrica PV.</p>	<p>Crook et al., 2011</p>
<ul style="list-style-type: none"> Centrales térmicas 	<p>Para un aumento de temperatura de 1 ° C, hay una reducción en la generación en las centrales nucleares del 0,8%, y en centrales de gas y de un 0,6%, debido a la pérdida de eficiencia térmica Un aumento del 1 ° C en la temperatura ambiente reduce la generación en plantas térmicas aproximadamente un 0,45%.</p>	<p>Linnerud et al., 2011</p>
<ul style="list-style-type: none"> Transmisión y distribución 	<p>Podría haber un aumento en las pérdidas en la transmisión debido a una mayor temperatura. Las altas temperaturas también puede reducir la eficiencia de los transformadores.</p>	<p>Linnerud et al., 2011</p>

Tabla 18: Impactos de la temperatura sobre la oferta

4.4.1.1. Fotovoltaica

El cambio climático puede afectar al rendimiento de una célula solar de dos maneras principales. En primer lugar, la corriente suministrada por una célula solar es dependiente de la irradiancia de la luz solar entrante. Y en segundo lugar, las células solares son muy sensibles a cualquier cambio en la temperatura. Estos cambios o bien pueden ser causados por cambios en la irradiancia o en la cantidad de viento que refrigera por convección el panel solar, o por los cambios en la temperatura

ambiente en general. Por todo lo anterior, el aumento de la temperatura del aire puede modificar la eficiencia de las células fotovoltaicas y en última instancia reducir la generación eléctrica fotovoltaica.

4.4.1.2. Centrales térmicas

Un montón de diferentes efectos asociados al cambio climático global pueden afectar a la producción de electricidad en una planta de energía térmica, aunque pueden reducirse principalmente a dos: el aumento de la temperatura y los cambios en las características del agua. Las tecnologías que podrían verse afectadas son el carbón, el gas natural, la nuclear, la geotérmica y las plantas de biomasa. Todas estas plantas tienen en común que se basan en un ciclo termodinámico para la producción de energía, básicamente dos, el de Rankine o el ciclo Brayton-Joule:

- Ciclos Brayton-Joule. En este tipo de ciclos, la salida de potencia y la eficiencia de la turbina pueden verse afectadas por variaciones en la temperatura ambiente y la humedad. Un aumento de la temperatura eleva el volumen específico del aire, aumentando el consumo de energía en el compresor y por lo tanto reduciendo la cantidad de energía neta generada en el ciclo. Esta modificación induce una disminución de la generación de electricidad o un mayor consumo de combustible. Además, en el caso de los ciclos combinados, la temperatura del agua y su disponibilidad afectan de manera especial a la etapa de vapor del ciclo.
- Ciclo de Rankine. Diferentes plantas de energía utilizan este tipo de ciclo de energía para generar electricidad: carbón, petróleo, nuclear, geotérmica, biomasa y residuos. Todos ellos tienen en común la necesidad de refrigeración, que podría verse afectada por las modificaciones de la temperatura del aire y, especialmente, por las alteraciones de agua. Un ciclo de vapor requiere mucha agua (Wilbanks et al, 2008, en Schaeffer et al, 2012, p. 6). Cada kWh de electricidad generada requiere alrededor de 100 litros de agua, calculado promediando los diferentes sistemas de refrigeración existentes. Los cambios proyectados en la disponibilidad de agua hacen que las centrales entren a competir cada vez más con otros usuarios del agua, como la agricultura y las necesidades públicas, especialmente en zonas con escasez. Las alteraciones en la cantidad y calidad del agua sugieren que los sistemas de refrigeración de circuito cerrado son menos vulnerables que los sistemas sin recirculación. Por lo anterior, un aumento de la temperatura del agua puede afectar la eficiencia de enfriamiento del ciclo de generación y aumentar así la demanda de agua.

En el artículo de Mideksa y Kallbekken (2010), los autores presentan los resultados de dos estudios diferentes (Linnerud et al., 2011) y (U.S. Climate Change Science Program, 2007), que analizaban la correlación entre la temperatura del aire y la potencia de salida de las centrales. El primero llegó a la conclusión de que para un incremento de temperatura de 1 ° C se produciría una reducción en generación de un 0,8% en las centrales nucleares, y en las del carbón y gas disminuirían un 0,6%, debido a la pérdida de eficiencia térmica. El segundo predijo, en el caso de EE.UU., que una reducción del 1% en la generación de electricidad debida al aumento de las temperaturas equivaldría a una caída en el suministro de 25 millones de kWh. Estos datos ponen de relieve que, incluso si la pérdida

de eficiencia es pequeña en términos porcentuales, los efectos globales podrían ser sustanciales, ya que afectan a la mayor parte de la producción de energía.

4.4.2. Impactos de los cambios de temperatura en la transmisión y distribución de energía

La eficiencia en la transmisión y distribución de energía eléctrica depende de la temperatura ambiente. Mideksa y Kallbekken (2010) citaron el estudio de Linnerud et al. (2011) en el que se analiza esta influencia.

4.4.3. Impactos de los cambios de agua en el suministro de energía

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Refrigeración (plantas térmicas)	Necesidad de agua dulce para la generación termoeléctrica en 2035: + 20% extracción de agua dulce en comparación con 2010 + 85% consumo de agua dulce en comparación con 2010	Feeley et al., 2008

Tabla 19: Impactos del agua sobre la oferta

Las centrales térmicas requieren cantidades significativas de agua para su refrigeración, haciéndolas vulnerables a fluctuaciones en el suministro de agua. Por unidad de energía producida, las centrales térmicas son los actores más intensivos en agua del sector energético (Feeley et al., 2008).

Respecto a la demanda de agua para la generación, la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2012) predijo que las extracciones aumentarían un 20% entre 2010 y 2035, mientras que el consumo se incrementaría un 85%. Esto se debe a la nueva generación de centrales térmicas que utilizan métodos de refrigeración más sofisticados que reducen las extracciones, pero aumentan el consumo por unidad de electricidad producida (IEA, 2012).

4.4.4. Impactos de los eventos extremos en el suministro de energía

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Reducción/interrupción del suministro	El aumento esperado en los eventos extremos (como los huracanes) tendrá un impacto significativo en el sector energético. Los huracanes (vientos fuertes y olas altas) pueden tener un impacto debilitante en el suministro de energía. Los eventos extremos afectan a todos los tipos de oferta de generación de energía. Afectan a las centrales térmicas y nucleares, la infraestructura, plantas hidroeléctricas, parques eólicos, tuberías de petróleo y gas y la red eléctrica. Todos estos impactos pueden causar interrupciones de suministro.	Kopitko y Perkins, 2011

Tabla 20: Impactos de los eventos extremos sobre la oferta

Como ya se introdujo en secciones anteriores, el término evento extremo se utiliza para referirse a todos los fenómenos meteorológicos y climáticos que manifiestan una gravedad mayor que los fenómenos meteorológicos y climáticos comunes. Los episodios a los que nos referimos son las olas de calor, fuertes precipitaciones, ciclones, huracanes y eventos extremos al nivel del mar.

Los episodios graves pueden debilitar o incluso interrumpir el suministro. Estos eventos afectan a todas las instalaciones de suministro de energía: centrales hidroeléctricas, aerogeneradores, producción de biocombustibles, centrales térmicas y nucleares, tuberías de petróleo y gas, y la red eléctrica.

Las zonas más expuestas a estos eventos extremos son las zonas de costa. En España, el estudio de referencia sobre impactos de cambio climático en costa es el C3E, desarrollado por la Universidad de

Cantabria para la OECC. Dentro de la zona costera, el proyecto se centra sobre los riesgos de inundación y erosión y la incidencia sobre las infraestructuras; centrándose en los impactos y adaptación en grandes ciudades costeras y en el sector turístico.

4.4.4.1. *Centrales hidroeléctricas*

Normalmente, el evento extremo que más afecta a la generación de energía hidroeléctrica es la inundación. Las centrales hidroeléctricas son capaces de soportar eventos de inundaciones mediante la apertura de compuertas y el cierre de la operación de la turbina. Sin embargo, en casos raros plantas y represas hidroeléctricas pueden ser dañadas o destruidas por las inundaciones.

4.4.4.2. *Energía eólica*

La generación de energía eólica se puede ver afectada principalmente por dos eventos diferentes. Los aerogeneradores hoy en día sólo operan hasta velocidades de viento de 25 m/s. A mayores velocidades del viento la tensión en la turbina sería demasiado alta, lo que podría provocar daños graves. En casos de presencia de vientos extremos, la producción de electricidad se corta. La producción podría también verse obstaculizada por el hielo: la eficiencia es más baja cuando la energía eólica se produce en condiciones bajo cero. Precipitaciones extremas asociadas con bajas temperaturas en latitudes norte podrían causar la formación de hielo y reducir el rendimiento de los aerogeneradores.

4.4.4.3. *Centrales térmicas y nucleares*

Los impactos causados por los fenómenos extremos a las centrales térmicas y nucleares han sido analizados en detalle por la comunidad investigadora, debido a su carácter esencial para el suministro de electricidad a las industrias y población, así como su alta peligrosidad. Los accidentes graves en las centrales térmicas y nucleares se deben evitar para no provocar graves problemas para el medio ambiente y la población, debido a que los combustibles utilizados y los procesos son muy contaminantes. Kopytko y Perkins (2011) analizaron el dilema de adaptación-mitigación de las plantas de energía nuclear, centrándose en cuestiones de seguridad y en los problemas de interrupción de estas estructuras relacionados con el cambio climático. Sin embargo, la mayor parte de su análisis es directamente aplicable a otro tipo de plantas, como las de carbón, petróleo, gas, plantas solares y de biomasa; básicamente a todas aquellas plantas que utilizan un ciclo termodinámico para generar electricidad. Los autores centraron su atención en las centrales nucleares costeras y de interior, tanto en Francia (donde el 75% de la electricidad es generada por plantas nucleares, contando con 44 reactores) como en EE.UU. (con 104 reactores, de los cuales 15 se encuentran a 2 millas de la costa). La Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha creado pautas para adaptar el diseño de plantas de energía nuclear al cambio climático. Los autores estudiaron las centrales teniendo en cuenta los principales riesgos elaborados por el OIEA, que son la temperatura del aire y el mar, los patrones, la frecuencia y la fuerza de los vientos, las características de las precipitaciones, los caudales de los ríos y los aumentos y las anomalías de los niveles del mar. Los reactores continentales están sujetos a las olas de calor, que reducen la generación de energía, y también a las inundaciones tierra adentro, lo que podría dañar las instalaciones auxiliares y poner en riesgo la estabilidad de las plantas. Por otro lado, los reactores costeros están sujetos a la subida del nivel del mar que puede inundar los emplazamientos de los reactores, así como a la erosión y la inestabilidad de las líneas de la playa, y a las tormentas intensas combinadas con el aumento del

nivel del mar que pueden producir episodios más graves de inundaciones y daños. En la memoria de todos está, por ejemplo, la catástrofe de Fukushima en 2011.

4.4.4.4. Impactos en la red eléctrica

Finalmente, los fenómenos meteorológicos extremos podrían también afectar al suministro de electricidad a través de la interrupción de la infraestructura de **red eléctrica**. Los fenómenos meteorológicos causantes podrían ser los vientos extremos y la carga de hielo. Por último, también la descongelación del permafrost se considera como un riesgo, dado que gran parte de la infraestructura existente en las regiones del norte se encuentra en zonas de alto potencial de riesgo y podría verse afectadas por este deshielo.

4.4.5. Impactos de los cambios en los recursos energéticos sobre el suministro de energía

IMPACTOS	PROYECCIÓN	REFERENCIA
Hidroeléctricidad	La producción de energía hidroeléctrica con base en el río Colorado podría disminuir hasta en un 40% a mediados de este siglo. La energía hidroeléctrica en Central Valley podría disminuir entre un 10% y un 12%. Europa del Norte: las afluencias a los ríos se incrementaría en un 11% entre 2001 y 2040. Esto aumentaría el suministro de energía en un 1,8% con respecto a 2001. Cambios en la generación de energía hidroeléctrica en 2050: 2931TWh generación +2.46TWh, cambio de +0,08% del total	Mideksa y Kallbekken
Viento	-10 a -15% de la velocidad media del viento en los EE.UU. continental, que se corresponden con una reducción en la generación de energía eólica en el orden de 30 a 40%	Breslow y Sailor, 2002
Fotovoltaica	-6% de producción eléctrica en las células solares debido a -2% de la radiación solar (Norte de Europa)	Fidje y Martinsen, 2006

Tabla 21: Impactos de los recursos energéticos sobre la oferta

El suministro de electricidad a partir de recursos renovables depende fuertemente de la disponibilidad de los propios recursos. En el futuro se prevé que el suministro de energía a partir de energías renovables sea cada vez más esencial; por ello es esencial investigar sobre los cambios en la oferta energética debidos a los cambios en los recursos energéticos.

4.4.5.1. Generación hidroeléctrica

La cantidad de electricidad que se puede generar a partir de plantas de energía hidroeléctrica depende de la capacidad de generación instalada y en especial de la variación de los flujos de agua a los embalses de la planta, y ahí entran los cambios provocados por el clima. La variabilidad climática natural ya tiene gran influencia en la planificación y el funcionamiento de los sistemas de energía hidroeléctrica. Las condiciones cambiantes del clima puede afectar el funcionamiento del sistema hidroeléctrico existente e incluso poner en peligro la viabilidad de nuevos proyectos. De ahí, el cambio climático global puede añadir una cantidad significativa de incertidumbre a la gestión ya de por sí difícil de los sistemas de energía hidroeléctrica.

El Centro para el Cambio Climático en California (2006) realizó un estudio sobre la materia que aportó un hallazgo interesante: el cambio en la sincronización de las entradas tendrá un impacto negativo más pequeño de lo esperado en la generación de energía hidroeléctrica en el sistema.

Otro trabajo de referencia es el de Mideksa y Kallbekken (2010). En él, los autores recopilaron varios trabajos que hasta la fecha se habían realizado sobre esta temática:

- Barnett et al. (2004). Llegaron a la conclusión que la producción de energía hidroeléctrica con base en el río Colorado podría disminuir hasta en un 40% a mediados del siglo XXI.
- Van Rheene et al. (2003). La energía hidroeléctrica en el Central Valley podría disminuir entre un 8% y un 11% en el Lago Shasta y entre 10% y 12% para el conjunto.
- Adiós (2008). El autor analizó el efecto del cambio climático sobre la oferta de energía hidráulica y eólica en el norte de Europa. Pronosticó que el suministro de energía se elevaría un 1,8% en 2040 con respecto a 2001. Señaló también posibles riesgos de seguridad en las presas. La mayoría de las presas actuales están construidas sin tener en cuenta el posible impacto del cambio climático y pueden tener una capacidad de depósito insuficiente para manejar los eventos extremos frecuentes asociados con el aumento del caudal del río por el derretimiento de la nieve.

Finalmente, Hamududu y Killingtveit (2012) presentaron recientemente una evaluación de los cambios en la generación de energía hidroeléctrica mundial motivada por los cambios previstos en el clima. El estudio utilizó un conjunto de simulaciones de modelos regionales de escorrentía, calculadas a partir de los modelos de circulación global (GCM). Hicieron simulaciones con 12 modelos diferentes. Los resultados indicaron que no se esperan grandes variaciones netas en la generación de energía hidroeléctrica. A nivel mundial, la generación de energía hidroeléctrica se prevé que cambie muy poco para el año 2050. Hay muchas regiones en las que la generación de escorrentía y la energía hidroeléctrica crecerían debido al aumento de las precipitaciones, y al mismo tiempo también hay regiones donde habría una disminución. Este patrón global se repite en África, donde habría algunos países con aumento de generación de energía hidroeléctrica y otros con disminución. En Asia, sin embargo, las tendencias son casi todas hacia un aumento generalizado en la producción hidroeléctrica, con la excepción de Oriente Medio. América experimentaría un incremento neto continental con grandes aumentos (sur y norte) y sólo algunos decrementos (centro). Europa Oriental Occidental y Europa del sur experimentarían reducciones, mientras que parte del norte sufriría aumentos. Como los grandes productores están en la región norte, los cambios continentales serían positivos en la generación de energía hidroeléctrica. En resumen, el cambio global en la futura generación de energía hidroeléctrica debido al cambio climático mostraría un ligero aumento con respecto a la actual generación de energía hidroeléctrica mundial de 2,46 TWh, lo que supone un aumento neto estimado del 0,08%.

4.4.5.2. *Generación eólica*

La cantidad de electricidad que podemos generar a partir de fuentes eólicas depende del contenido energético del viento. Una propiedad importante del contenido de energía es que aumenta proporcionalmente con la velocidad del viento elevada al cubo. Una velocidad del viento de 3 m/s puede producir 16 W/m² de energía eólica, mientras que una velocidad del viento de 12 m/s puede producir 1.305 W/m². Así, cambios relativamente pequeños en la velocidad del viento pueden tener grandes efectos sobre la generación de energía eólica. Además, otro parámetro climático importante para el suministro de energía eólica es la frecuencia de fenómenos de velocidades de viento extremas que tienen un impacto negativo dada la imposibilidad de que los aerogeneradores trabajen a esos regímenes.

En el artículo de Mideksa y Kallbekken (2010), los autores citan el estudio de Sood y Durance que presenta la investigación realizada en 2006 sobre el potencial eólico en el Mar del Norte. En ese estudio los autores pronostican que la energía eólica de los parques eólicos marinos es probable que aumentara en un 3-9% en todo el Mar del Norte debido al aumento de la velocidad del viento bajo un escenario tendencial.

Por su parte, Breslow y Sailor (2002) calcularon el impacto de los cambios de velocidad del viento sobre la producción eólica basándose en dos modelos climáticos: el Hadley y el modelo CCC. El modelo de Hadley predijo un impacto mínimo del cambio climático, mientras que el CCC, que estima una reducción en la velocidad media de viento en el orden de 10 a 15%, predijo reducciones potenciales en generación de energía eólica en el orden del 30 al 40%.

Aparte de estos informes ya citados, no hay una literatura demasiado extensa sobre este tema, aunque sí la hay sobre la evaluación de los cambios en los patrones de viento. Sería interesante utilizar estos resultados para obtener evaluaciones parciales del impacto de estos cambios en los patrones de viento sobre la producción de energía eólica, basándonos en su relación de proporcionalidad cúbica. El trabajo de Santos et al. (2014) para la Península Ibérica, que analizamos en el caso de estudio, es un buen ejemplo.

4.4.5.3. Generación de biocombustibles

La vulnerabilidad de la producción de biocombustibles líquidos puede relacionarse con impactos en el rendimiento de los cultivos causados por modificaciones en el clima, específicamente por la influencia en la concentración atmosférica de CO₂. Niveles altos de CO₂, hasta un límite de saturación, aumentan la tasa fotosintética, lo que lleva a una mayor productividad. Este efecto puede ser compensado por un aumento en la temperatura, ya que las temperaturas más altas reducen la actividad fotosintética. Otros fenómenos que también influyen son los cambios en los patrones de precipitaciones y la frecuencia de los fenómenos extremos, como las sequías y las heladas. Por otro lado, la baja disponibilidad de agua, causada por el aumento de la evapotranspiración y la reducción de las precipitaciones, puede afectar negativamente a la productividad de los cultivos.

4.4.5.4. Generación fotovoltaica

La generación de energía solar es especialmente vulnerable al aumento de las temperaturas, que modifican la eficiencia de las células fotovoltaicas, aunque también un cambio en la radiación global altera la producción de electricidad de los paneles solares. Dos investigadores, Fidje y Martinsen, estudiaron los efectos sobre las modificaciones de radiación solar en los paneles en la región nórdica europea (Fidje y Martinsen, 2006). Los autores analizaron cómo una determinada reducción de la radiación solar podría afectar a la generación fotovoltaica en Oslo. Uno de sus resultados fue que, cuando una la radiación solar global se reduce en un 2%, la producción eléctrica de las células solares disminuiría un 6%. Estos resultados se calcularon utilizando los escenarios del IPCC A2 y B2 para el período 2071-2100. Es importante destacar que estos dos escenarios suponen una disminución de la radiación solar global y un aumento en la temperatura, así que en ese 6% de reducción hay dos factores actuando: la disminución de la radiación y el aumento de la temperatura.

4.4.6. Interacciones entre políticas de mitigación y de adaptación

Esta última sección se centra en evaluar el impacto de las políticas de mitigación sobre el suministro energético. Aunque el presente informe se dedique a abordar posibles estrategias de adaptación para el sector energético, consideramos relevante hacer una mención a cómo estas políticas pueden verse complementadas con estrategias de mitigación globales.

Adaptación y mitigación son dos técnicas utilizadas de forma diferente para evaluar el cambio climático en el sector energético. La opinión convencional es que la adaptación y la mitigación son incompatibles, pero en la realidad una no excluye a la otra. Estos dos métodos pueden trabajar juntos de manera óptima y dar beneficios mutuos.

Los efectos de las estrategias de mitigación en el sector energético son muy fáciles de observar. La mitigación consiste en una intervención humana para reducir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que reduce la generación de éstos o promueve la creación de sumideros específicos donde podamos almacenarlos. Los impactos de la mitigación en el sistema de suministro de energía son simples: para reducir la generación de electricidad a partir de plantas de combustibles fósiles y aumentar la producción a partir de tecnologías descarbonizadas, es necesario poner en práctica una transición (descarbonización) del modelo energético.

Algunos hitos de esta senda de descarbonización se han establecido a nivel mundial, otros a nivel regional y la mayoría a nivel nacional. La Unión Europea aprobó en 2009 los llamados "objetivos 20-20-20" en la Directiva 2009/29/CE. Los objetivos suponían alcanzar una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero del 20% en 2020 con respecto al nivel de 1990, alcanzar un 20% de consumo de energía final con fuentes renovables, y aumentar la eficiencia energética en un 20%. Más recientemente, el Consejo Europeo aprobó el 24 de octubre de 2014 la EUCO 169/14 (Consejo Europeo, 2014), en la que hizo suyo un objetivo vinculante de la UE de una reducción doméstica al menos el 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero para 2030 en comparación con 1990 y un 27% (media entre todos los países) de renovables en usos finales.

El WG3 del IPCC estudió para el IE5 las futuras emisiones del sector energético, dando como resultado la estimación de que estas se duplicarán o incluso se triplicarán en 2050 con respecto al nivel de 2010, a menos que las mejoras de intensidad energética¹¹ se puedan acelerar significativamente. Descarbonizar la generación de electricidad es un componente clave de las estrategias de mitigación para alcanzar los niveles de concentración admisibles. Así, el WG3 (IPCC, 2015) destacó que las emisiones de GEI del sector energético pueden reducirse significativamente mediante la sustitución de las plantas eléctricas de carbón por otras más modernas, de alta eficiencia, como las centrales de ciclo combinado de gas natural o plantas de cogeneración.

Hay varios escenarios con una gama de opciones tecnológicas y de comportamiento, con diferentes características e implicaciones para el desarrollo sostenible, que son consistentes con los diferentes niveles de la mitigación. Para el AR5, alrededor de 900 escenarios de mitigación fueron recogidos en una base de datos. Se mueven en niveles de concentración atmosférica en 2100 de 430 ppm CO₂eq a más de 720 ppm CO₂eq, algo comparable a los 210 niveles de RCPs entre RCP2.6 y RCP6.0. Los escenarios de mitigación en los que es probable que el cambio de temperatura causado por las emisiones de GEI antropogénicas se mantengan en menos de 2 ° C con respecto a los niveles

¹¹ Consumo energético por unidad de PIB

preindustriales, se caracterizan por presentar concentraciones atmosféricas en 2100 de alrededor de 450 ppm CO₂eq. Escenarios que superan las 650 ppm CO₂eq en 2100 es poco probable que mantengan los incrementos de temperatura en niveles por debajo de 2 ° C en relación con los niveles preindustriales.

Para llegar a los escenarios que alcanzan niveles de concentración atmosférica de alrededor de 450 ppm de CO₂eq en 2100 (que mantiene el cambio de temperatura por debajo de 2 ° C con respecto a los niveles preindustriales) se exigen recortes sustanciales en las emisiones de GEI antropogénicas para mediados de siglo, lo que pide cambios a gran escala en el sector energético y, potencialmente, en el uso del suelo. Se estima que para llegar a estos escenarios en 2100, es necesario alcanzar una reducción del 40% a 70% en las emisiones en 2050, y alcanzar prácticamente un nivel 0 de emisiones en 2100. Estos escenarios que alcanzan alrededor de 450 ppm de CO₂eq también se caracterizan por fuertes inversiones en eficiencia energética, la generalización (cuadruplicándolas) de las energías renovables y el desarrollo de las tecnologías de captura de CO₂ ya en 2050. Estos escenarios describen también una amplia gama de cambios de uso del suelo, lo que refleja diferentes supuestos acerca de la escala de la producción de bioenergía y la reducción de la deforestación.

5. Vulnerabilidades del sector energético al cambio climático

Tras haber presentado los impactos del cambio climático en los sistemas naturales y energéticos, el siguiente paso natural es presentar, a la luz de los mismos, las vulnerabilidades de los sistemas de energía debidas al cambio climático. Este será el paso definitivo para poder definir políticas de adaptación adecuadas. La base científica que sustenta este capítulo está tomada principalmente de la contribución del WGII al AR5 (IPCC, 2014).

La sección comienza presentando el concepto de vulnerabilidad y describiendo el debate acerca de su uso, para concluir presentando las métricas y los indicadores propuestos para medirla.

5.1. Definición de vulnerabilidad

La vulnerabilidad es un concepto central en la investigación del cambio climático, aunque su importancia trasciende este ámbito. Otros grupos de investigación, tales como los relacionados con la gestión de desastres, la salud pública o la seguridad, encuentran en la vulnerabilidad uno de sus conceptos claves de estudio. Fruto de esta diversidad de enfoques, encontramos definiciones muy diversas de la vulnerabilidad. Una de estas definiciones, proveniente del ámbito energético que nos ocupa, es la que aporta HELIO Internacional (Williamson et al., 2009):

“La vulnerabilidad es el grado en que es probable que una unidad o un sistema (como un grupo humano o un lugar) experimente un daño debido a la exposición a riesgos, peligros, golpes o a tensiones”.

Uno de los autores que ha abordado la cuestión de las múltiples definiciones de la vulnerabilidad es Füssel (2005), quien señala el desacuerdo generalizado existente, lo que causa frecuentes malentendidos en la investigación interdisciplinar sobre la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático. Su propósito es tratar de aliviar la confusión mediante la presentación de un marco conceptual global y coherente de la vulnerabilidad.

Por su parte, el IPCC elaboró una definición de la vulnerabilidad relacionada con el cambio climático que es la que más consenso ha generado, aunque para su plena comprensión precisa de un marco como el de Füssel donde encuadrarla.

5.1.1. Definición de vulnerabilidad para el IPCC

El IPCC define vulnerabilidad como: “El grado en que un sistema es susceptible e incapaz de afrontar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad del clima y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad es función de la magnitud y la rapidez del cambio climático a la que un sistema está expuesto, de su sensibilidad y de su capacidad de adaptación”.

La Figura 67 propone una definición gráfica de esta definición.

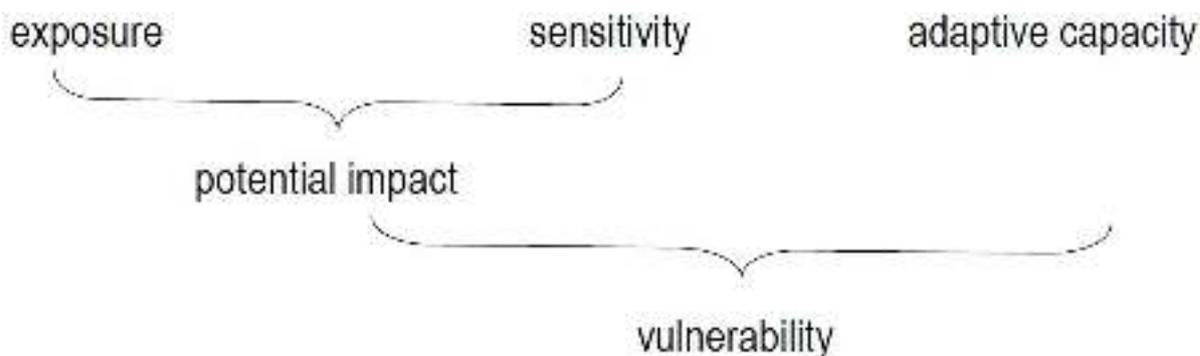


Figura 67: Definición gráfica de vulnerabilidad

La vulnerabilidad, de acuerdo con la definición IPCC, es una medida integrada de la magnitud esperada de los efectos adversos a un sistema causado por un nivel dado de ciertos factores de estrés externos. La vulnerabilidad incluye, por un lado, una dimensión externa, que está representada por la exposición (*exposure*) de un sistema a las variaciones climáticas, y por otro lado, de una dimensión interna, que comprende su sensibilidad (*sensitivity*) y su capacidad de adaptación (*adaptive capacity*) a estos factores de estrés. Es interesante analizar cada uno de estos elementos de la Figura 67 a partir del trabajo de Füssel y Klein (2006).

- **Exposure** (Exposición): Hace referencia a la naturaleza y al grado en que un sistema está expuesto a las variaciones climáticas significativas. La exposición de un sistema a estímulos climáticos depende del nivel de cambio climático global y, debido a la heterogeneidad espacial del cambio climático antropogénico, también de la ubicación del sistema.
- **Sensitivity** (Sensibilidad): Se refiere al grado en que se ve afectado un sistema, ya sea adversa o beneficiosamente, por la variabilidad climática. Los efectos pueden ser directos (por ejemplo, un cambio en el rendimiento del cultivo en respuesta a un cambio en la media, el rango o la variabilidad de la temperatura) o indirectos (por ejemplo, los daños causados por un aumento en la frecuencia de inundaciones costeras debido a la subida del nivel del mar). La sensibilidad de un sistema denota la relación dosis-respuesta entre la exposición a los estímulos climáticos y el impacto resultante.
- **Adaptive capacity** (La capacidad de adaptación): Es la capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad del clima y los fenómenos extremos), para moderar los daños potenciales, para aprovechar las oportunidades o para hacer frente a las consecuencias. La capacidad de adaptación de un sistema o de la sociedad describe su capacidad para modificar sus características o comportamientos con el fin de hacer frente mejor a los cambios en las condiciones externas. Dalziell y McManus (2004) definen la capacidad de adaptación como "el grado en que un sistema puede modificar sus circunstancias para pasar a una condición menos vulnerable". Adicionalmente, la capacidad de adaptación refleja la capacidad del sistema para responder a los cambios en su entorno externo, y para recuperarse de los daños a sus estructuras.

Como se puede ver, la vulnerabilidad al cambio climático, tal y como queda conceptualizada por el IPCC, es un concepto más amplio que los impactos potenciales del cambio climático. Las evaluaciones

de vulnerabilidad tienden a incluir factores adicionales que aumentan su relevancia para los decisores. Esto se logra mediante una representación más amplia de los principales factores de estrés que afectan a un sistema, incluyendo los no climáticos, especialmente los factores socioeconómicos que determinan el potencial diferencial de las comunidades para adaptarse a las condiciones cambiantes. En ese sentido, es importante tener presente que al analizar la vulnerabilidad se debe ser consciente de que no todo el mundo sufre de la misma manera en respuesta al mismo evento.

Por otro lado, aunque impacto potencial y vulnerabilidad no son el mismo concepto, sí están correlacionados. Los impactos potenciales del cambio climático en un sistema en particular (de acuerdo con su capacidad de adaptación) determinan la vulnerabilidad de ese sistema al cambio climático. Sin embargo, esto no quiere decir que los impactos *causen* vulnerabilidad. Este es un punto crucial del análisis de la vulnerabilidad que siempre hay que tener en cuenta.

Como se comentó anteriormente, la definición de la vulnerabilidad de un sistema al cambio climático según el IPCC es la más aceptada, aunque eso no elimina que también sea criticada o matizada por algunos autores. Para ayudar a situar el debate, Füssel (2005) presentó un marco conceptual capaz de reconciliar a la gran variedad de conceptos de vulnerabilidad presentes en la literatura. En el Anexo II se recoge una reflexión amplia en torno al mismo.

5.2. La evaluación de vulnerabilidades

El análisis de la vulnerabilidad al cambio climático según lo entiende el IPCC (heredado del planteamiento de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático), tiene en cuenta tres factores fundamentales: la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación. Este método ha sido utilizado en varias investigaciones, como la del Banco Mundial (Ebinger and World Bank, 2011), y la de Endesa (2013). En este último informe se subraya claramente que se necesitan dos tipos de datos para la evaluación de la vulnerabilidad: técnicos (tipo de tecnología y procesos) y climáticos (proyecciones presentes y futuras). Los impactos del cambio climático que puedan afectar a las instalaciones (exposición) y los posibles efectos de estos impactos (sensibilidad), junto con la capacidad de adaptación, son los pilares de este tipo de análisis.

Dentro de la literatura dedicada a esta problemática, diferentes documentos se centran en diferentes aspectos del sistema energético. Por ejemplo, el ya mencionado informe de Endesa analizó sus propias plantas de generación eléctrica (combustibles fósiles, nuclear, hidroeléctrica y eólica) y su infraestructura de distribución; el Banco Mundial (Ebinger and World Bank, 2011) tomó en consideración todo el sistema energético, centrando la atención en el suministro y en la dotación de recursos; Paskal (2009) trató de identificar algunos de los nodos más susceptibles en la infraestructura energética mundial; el Programa de Investigación del Cambio Global en los Estados Unidos (U.S. Global Change Research Program, 2014) abordó varios temas, incluyendo el suministro de energía y el uso; finalmente, Kopytko y Perkins (2011) se centraron en las centrales nucleares.

A diferencia de la sección dedicada a los impactos, el foco de esta sección se situará en la oferta energética. El análisis de las vulnerabilidades se tomará desde el punto de vista de las infraestructuras, y no desde el punto de vista del cambio climático. Esto supone un cambio

importante pues por primera vez nos separamos del marco general que guiaba todo el proceso; en esta ocasión nos centraremos únicamente en analizar uno de sus nodos, y no las relaciones entre ellos. La siguiente evaluación de las vulnerabilidades del sistema energético, por tanto, se centrará sobre todo en la parte de la oferta, y estará compuesta por un análisis pormenorizado de las diversas tecnologías energéticas que la constituyen.

En lo que respecta a los indicadores de vulnerabilidad para el sector energético, se trata de una tarea aun poco desarrollada. En el Anexo II.6 se presentan algunas propuestas preliminares presentes en la literatura.

5.2.1. Hidráulica

La cantidad de electricidad que puede ser generada a partir de plantas de energía hidroeléctrica depende de dos factores: el primero de ellos es la capacidad de generación instalada; el segundo y más importante es la cantidad de agua disponible. La variabilidad natural del clima tiene una gran influencia en la planificación y operación de sistemas de energía hidroeléctrica, por eso es esencial conocer el "ritmo" del recurso hídrico. La mayoría de los sistemas están diseñados teniendo en cuenta los datos históricos para determinar la cantidad y variabilidad de la energía producida durante todos los días o las fluctuaciones estacionales, pero el cambio de las condiciones climáticas, en la medida en que los modifican, acaba afectando al funcionamiento de los sistemas hidroeléctricos existentes.

Si lo tuviéramos que resumir en una sola frase, se podría decir que dado que la generación de energía hidroeléctrica depende en gran medida de la disponibilidad de los recursos hídricos, ahí está la principal vulnerabilidad del sistema. El cambio climático global añadirá una cantidad significativa de incertidumbre al ya de por sí incierto diseño y operación; es en esta incertidumbre añadida donde se encuentra la raíz de su vulnerabilidad.

Como ya se ha mencionado en secciones anteriores, el cambio climático está alterando las corrientes de cuencas hidrográficas, algo que se había considerado hasta la fecha estable dentro de su estacionalidad propia; sin embargo, los cambios climáticos las están convirtiendo en variables. Esto genera problemas para el almacenamiento de agua, lo que representa una segunda vulnerabilidad del sistema de energía hidroeléctrica. Por ejemplo, en el estudio sobre California (CCC, 2006), los autores destacan que la hidrología del estado puede experimentar un anticipo de la escorrentía lo que en global podría conducir a una menor generación total de energía hidráulica en el ciclo anual.

Otro estudio que aborda el tema de la vulnerabilidad hidrográfica es el de Paskal (2009). En él se distinguen las vulnerabilidades de los dos tipos diferentes de plantas de energía hidroeléctrica, la "glaciar-dependiente" y la "precipitación-dependiente". Las primeras son aquellas instalaciones hidroeléctricas que dependen principalmente del deshielo de los glaciares, como algunas en el Himalaya, los Alpes y los Andes. En este tipo de plantas, las vulnerabilidades surgen en los embalses. Al principio hay una vulnerabilidad correlacionada con el tamaño de los depósitos debido a que los flujos de agua pueden ser demasiado grandes y superar la capacidad de los embalses. Al final, una

vez que los flujos alcanzan un grado mínimo, nos encontramos con una disminución de la producción hidroeléctrica y una vulnerabilidad por tanto por el lado de la oferta.

El segundo tipo de centrales hidroeléctricas son aquellas instalaciones que dependen principalmente de la precipitación estacional. En éstas el principal problema es la dificultad creciente para anticipar el flujo. Las presas a menudo sirven para tres propósitos: control de inundaciones, riego y generación de energía. Si las precipitaciones son insuficientes, habrá una pérdida en generación, aunque la situación puede ser igualmente problemática cuando hay demasiada. Si el depósito se llena en la temporada de lluvias y, a continuación, debido a cambios en los patrones de precipitación, la lluvia sigue cayendo en lo que debería ser la estación seca, el depósito puede generar problemas en la zona de aguas arriba. Si con el fin de evitar este daño, se libera agua, las zonas aguas abajo podrían inundarse, y además una cierta cantidad de energía almacenada se desperdiciaría.

Además de los dos tipos de centrales ya descritos, hay también pequeños sistemas hidráulicos, que resultan ser los más vulnerables de todos. Estas plantas dependen directamente del caudal del río, muy variable a través de las estaciones y los años, y que con el cambio climático pueden acentuar este aspecto. La capacidad de almacenamiento del depósito puede compensar estas variaciones en el flujo de agua, ya que actúa como almacenamiento de energía, y por lo tanto hace frente a los cambios climáticos. Por otro lado, en algunas regiones los deshielos son parte del ciclo hidrológico. La capa de nieve actúa como un reservorio natural durante el invierno. Si el cambio climático aumenta el caudal del río en primavera y lo reduce en verano, y los embalses construidos no están diseñados para gestionar estos nuevos flujos, una gran cantidad de energía puede ser desperdiciada.

Una tercera vulnerabilidad de las centrales hidráulicas está relacionada con la seguridad de las infraestructuras. Los eventos extremos como inundaciones y sequías pueden conducir a daños físicos y cambios en las operaciones de las centrales hidroeléctricas y de las presas. Como se pone de manifiesto en (CCC, 2006), la mayoría de las presas actuales se construyen sin tener en cuenta el posible impacto del cambio climático y puede que tengan una capacidad de depósito inferior a la necesaria para manejar los eventos extremos vinculados con el cambio en el caudal del río y el régimen de deshielo.

Finalmente, si la central hidráulica es la principal fuente de suministro eléctrico en una región, podríamos encontrarnos con otro tipo de vulnerabilidad. Futuros cambios en la disponibilidad de agua podrían dar lugar a inseguridad de suministro.

5.2.2. Energía eólica

La energía producida por los aerogeneradores depende en gran medida de las características del **viento**: velocidad del viento, distribución de frecuencia, valor promedio, cambios de dirección y densidad. Dado que el cambio climático afectará en gran medida a estas características, aumenta a su vez la incertidumbre sobre la producción de energía eólica. De ahí que la principal vulnerabilidad de suministro de energía eólica es su dependencia total de los patrones de viento.

Otra gran debilidad, que se puede asociar a la vulnerabilidad anterior, es que la energía eólica no puede ser almacenada. Sí es posible hasta cierto punto almacenar la energía eléctrica producida por los aerogeneradores, pero no es posible almacenar el recurso primario: el viento.

Una posible solución a estos problemas sería perfeccionar predicciones de los patrones de viento futuros. Sin embargo, es muy difícil elaborar proyecciones fiables mundiales y regionales de los cambios de viento, lo que supone otra vulnerabilidad más.

Por otro lado, en el sector de generación de energía eólica también hay una vulnerabilidad correlacionada con la estructura de las instalaciones. Los **eventos extremos** como huracanes podrían dañar seriamente a los aerogeneradores. Además, en el caso de sistemas off-shore, también aparece una vulnerabilidad al aumento del nivel del mar.

Otra vulnerabilidad de la generación eólica, aunque no tan crítica, la encontramos en posibles **precipitaciones extremas** asociadas con bajas temperaturas, especialmente en latitudes del norte. Estas precipitaciones podrían causar la formación de hielo, lo que reduciría el rendimiento de los aerogeneradores e incluso la interrupción de la producción.

Finalmente, la **temperatura del aire** también afecta a la generación, debido a que un aumento de la misma conduce a una disminución de la densidad del aire, con un descenso por tanto en la densidad de energía.

5.2.3. Energía solar

La célula fotovoltaica es el componente principal de un panel solar y es muy sensible a cualquier cambio en la **temperatura**. Estos cambios pueden ser causados por cambios en la irradiancia, en la cantidad de viento o, especialmente, por los cambios en la temperatura ambiente. Se puede decir de manera general por tanto que la principal vulnerabilidad de los paneles fotovoltaicos está relacionada con la temperatura del aire.

Adicionalmente, el cambio climático, además de elevar la temperatura del aire, también va a cambiar la composición de la atmósfera, alterando el contenido de agua y la nubosidad, y modificando así la cantidad de la radiación incidente. De todo lo anterior vemos como emerge una nueva vulnerabilidad, pero esta vez en relación con la dotación de los recursos (sol) y no con la producción de energía.

5.2.4. Biomasa y biocombustibles

La biomasa se puede utilizar directamente a través de su combustión para producir calor, o indirectamente después de ser transformada. Estas dos variedades de utilización presentan algunos tipos de vulnerabilidades diferentes, aunque compartan la mayoría de ellas, que serán las que se presentan a continuación.

La biomasa que se utiliza en las centrales térmicas y en la producción de biocombustibles líquidos muestra una vulnerabilidad común relacionada con la disponibilidad de los recursos. Esta disponibilidad depende de varios parámetros relacionados con el cambio climático, como el aumento

de la temperatura, la disponibilidad de agua, la concentración atmosférica de CO₂, las precipitaciones extremas y la presencia de otros eventos extremos como sequías, heladas y huracanes. A diferencia de la energía hidroeléctrica, las vulnerabilidades del sistema de suministro de biomasa no están relacionadas solo con la disponibilidad de recursos (cultivos de biomasa y agua para la energía hidroeléctrica), sino también con los agentes que afectan a la producción de biomasa, es decir, todos esos procesos que contribuyen al desarrollo de los cultivos.

Además de las vulnerabilidades asociadas a los recursos, los cambios en la temperatura del aire y la disponibilidad de agua son otros dos elementos de vulnerabilidad de los biocombustibles. Por un lado, altas temperaturas reducen la eficiencia de la generación térmica. Así, plantas térmicas que utilizan la biomasa como combustible, son vulnerables a las altas temperaturas del aire. Por otro lado, la reducción de la eficiencia en la generación y en consecuencia la reducción de la energía generada, podría también venir causada por falta de disponibilidad de agua. Cantidades de agua menores pueden reducir la eficiencia del sistema de refrigeración y en consecuencia la eficiencia de toda la planta.

5.2.5. Olas y energía de las mareas

Las olas se crean ante la presencia de regímenes de viento concretos. En consecuencia, los impactos del cambio climático sobre la energía eólica también tienen un impacto directo sobre la formación de las olas. Por tanto se puede decir que todas las vulnerabilidades que se presentaron para la energía eólica son también aplicables a la energía de las olas.

En la literatura no hay referencias directas a los efectos del cambio climático en la energía de las mareas. Es posible que el aumento del nivel del mar pueda alterar las cuencas y afectar a la amplitud de las mareas, pero no hay certeza. En todo caso, se puede afirmar de manera genérica que la energía de las mareas muestra una vulnerabilidad clara a la elevación del nivel del mar.

5.2.6. Las centrales termoeléctricas

Cuando hablamos de las centrales termoeléctricas, nos referimos a todas aquellas plantas que utilizan vapor y/o gas para generar electricidad. Estas centrales utilizan carbón, gas natural, petróleo, combustible nuclear, energía geotérmica, energía solar o biomasa como combustibles para producir el vapor o gas para generar electricidad a continuación. Dos son los ciclos termodinámicos principales que se usan en estas plantas: el ciclo Rankine y el ciclo Brayton-Joule.

Son varios los estudios que han analizado esta cuestión. Se destacan aquí el trabajo del Banco Mundial (Ebinger y World Bank, 2011), el trabajo de Paskal (2009), el informe de Endesa (2013), el artículo de Kopytko y Perkins (2011) y el trabajo del Departamento de Energía de EEUU (U.S. Department of Energy, 2013).

En esta sección se presentan las vulnerabilidades de las centrales termoeléctricas centrándose en tres elementos principales: la eficiencia de ciclo térmico, el sistema de enfriamiento y la infraestructura. Las vulnerabilidades relacionadas con estos elementos son originadas por los

cambios en la temperatura del aire y el agua, los cambios en la disponibilidad de agua y los fenómenos extremos.

La eficiencia del ciclo térmico

La eficiencia del ciclo térmico de las plantas termoeléctricas se ve afectada principalmente por el aumento de la temperatura del aire y del agua. Por un lado, el aumento de la temperatura del aire elevará las temperaturas de condensación de vapor y de la turbina a contrapresión, lo que reduce la eficiencia de generación (US Energy Department, 2013, pg. 10). Por otro lado, el aumento de la temperatura del agua plantea otros riesgos para las centrales termoeléctricas y podrían reducir la capacidad de generación disponible. Además, el aumento de la temperatura del agua pone a las plantas de energía en riesgo de exceder los límites de descarga térmica establecidas para proteger los ecosistemas acuáticos.

Varios factores más influyen en la vulnerabilidad a la temperatura del agua de estas centrales. Estos factores incluyen la ubicación de la toma de agua, la ubicación de la toma de corriente, las velocidades del fluido de la entrada y salida, la turbulencia y los cambios de presión y de las distribuciones de las temperaturas naturales. Un ejemplo de medida de adaptación relacionada con estas cuestiones lo encontramos en (US Energy Department, 2013, pg. 10), donde se describe cómo la Unidad 2 de la Central Nuclear de Millstone, fue apagada en agosto de 2012 después de que las temperaturas en Long Island superaran la temperatura máxima a la que se permite que la central nuclear extraiga agua de refrigeración. Sin embargo, la Unidad 3, que utilizaba aguas más profundas y más frías, siguió funcionando.

Sistema de refrigeración

Las instalaciones termoeléctricas utilizan los recursos hídricos para satisfacer sus necesidades de refrigeración, y por lo tanto son vulnerables a las características del agua. La intensidad del uso del agua y el impacto de la disminución de la disponibilidad de la misma depende del tipo de planta, del sistema de refrigeración empleado, de la ubicación geográfica de la planta y de la fuente de agua para refrigeración que emplea.

Los sistemas de refrigeración abiertos son particularmente vulnerables a condiciones de bajo caudal debido a los grandes volúmenes de agua retirados. En contraste, los sistemas de refrigeración por recirculación potencian la reutilización y son menos vulnerables. En los sistemas de recirculación que utilizan torres de refrigeración, parte del agua se evapora mientras que el resto se reutiliza y se envía de vuelta al condensador en la planta. Esta agua perdida por evaporación en las torres de refrigeración debe ser reemplazada, lo que resulta en un consumo de agua mayor. De todas formas, estos sistemas de recirculación, aunque retiran cantidades notablemente menores de agua de la fuente, pueden ser también afectados por condiciones de bajo caudal.

Los sistemas abiertos consumen menos agua aunque retiren mayores cantidades, lo que resulta en un mayor potencial de arrastre de los organismos acuáticos. Debido a esto, el aumento de las temperaturas del agua pone a las plantas termoeléctricas en riesgo de exceder los límites de descarga

térmica establecidos para proteger los ecosistemas acuáticos, resultando también en una mayor sensibilidad a condiciones de poca agua.

Otra vulnerabilidad asociada a la disminución de la disponibilidad de agua se puede percibir en la colocación o la ubicación de las estructuras de toma de agua de refrigeración de las centrales termoeléctricas. Las alturas de admisión de agua de refrigeración influirán directamente en el grado de exposición. Durante las épocas de sequía, los ríos, los lagos o los niveles de agua del yacimiento pueden caer cerca o por debajo del nivel de las tomas de agua utilizados para sacar agua para el enfriamiento, lo que provoca que la producción de energía en algunas plantas de energía se disminuya o incluso se interrumpa.

Terminamos esta sección hablando de las tecnologías de captura de carbono (CCS). Las tasas de extracción y consumo de agua de las centrales termoeléctricas con captura de carbono se estima que son aproximadamente dos veces las de las centrales sin CCS. Por lo tanto, las plantas que utilizan tecnologías de CCS son ciertamente más vulnerables a la disminución de la disponibilidad de agua. En el capítulo dedicado al caso de estudio de España se presenta un ejemplo (Fundación Canal, 2014) de cómo esta tecnología se ha tenido en cuenta en un análisis de adaptación al cambio climático en el sector energético.

Infraestructuras

Normalmente, las plantas termoeléctricas se colocan en las regiones donde hay una gran disponibilidad de agua, para así poder satisfacer la gran cantidad de agua que requieren para su refrigeración. Como resultado, estas plantas generalmente se sitúan en áreas que son especialmente susceptibles a los cambios ambientales. Numerosas plantas de energía se alinean en las costas y muchas otras están situadas en el interior cerca de los ríos o lagos, en zonas bajas o llanuras de inundación. Todas estas infraestructuras son por ello vulnerables a eventos correlacionados con agua.

El aumento de la intensidad de las tormentas, el aumento del nivel del mar y las mareas de tempestad, representan un riesgo para las instalaciones termoeléctricas costeras, mientras que el aumento de la intensidad y la frecuencia de las inundaciones plantea un riesgo para las instalaciones térmicas del interior. Por otro lado, las vulnerabilidades específicas a los huracanes y a las inundaciones varían de un sitio a otro.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (OIEA) enumeró los principales peligros de las centrales nucleares: la temperatura del aire y del mar, patrones, la frecuencia y la fuerza de los vientos, la característica de las precipitaciones, los caudales de los ríos y los aumentos y las anomalías de los niveles del mar.

Por un lado, los reactores continentales están sujetos a las olas de calor, que reducen la generación de energía y provocan inundaciones tierra adentro, lo que podría dañar las instalaciones auxiliares y poner en riesgo la estabilidad de las plantas. Por otro lado, los reactores costeros están sujetos a la subida del nivel del mar, que puede inundar los emplazamientos de los reactores y aumentar la erosión y la inestabilidad de las líneas de la playa; mientras que las tormentas intensas combinadas

con el aumento del nivel del mar, puede producir episodios más graves de inundaciones y daños por el viento. Kopytko y Perkins (2011) estudiaron el funcionamiento de las centrales nucleares de Estados Unidos durante la temporada de huracanes. En su estudio insisten en que las estructuras actuales son extremadamente vulnerables al cambio climático y a eventos extremos.

5.2.7. Extracción, producción y refino de combustibles fósiles

Las vulnerabilidades de estas instalaciones se pueden dividir en dos grandes grupos: aquellas relacionados con la instalación en sí y el mantenimiento de las infraestructuras, y aquellas relacionadas con la eficiencia de los procesos.

Burkett (2011) planteó siete elementos clave a tener en cuenta para las instalaciones en costa y en alta mar: (1) la subida del nivel del mar, (2) la intensidad de las tormentas, (3) el régimen de olas, (4) la temperatura del aire y del agua, (5) los patrones de precipitaciones, (6) los cambios en el CO₂ y (7) la acidez del océano. Los huracanes, por ejemplo, pueden interrumpir el suministro de petróleo y el suministro de gas; mientras que otros fenómenos extremos, como las inundaciones por el aumento del nivel del mar y las mareas de tormenta, pueden causar daños por erosión.

El artículo de Burkett (2011) junto con el de Paskal (2009) destacan que el calentamiento global puede tener diversos efectos sobre el desarrollo de los recursos en el Ártico. La disminución de la capa de hielo puede requerir cambios en el diseño de las infraestructuras para contrarrestar los efectos del aumento de la acción de las olas y de las mareas de tormenta. Sin embargo, el mayor problema puede ser la descongelación del permafrost, que tiene el potencial de afectar gravemente a las instalaciones ubicadas en climas fríos. Esta es una gran vulnerabilidad para el sector de la extracción. Con el cambio climático, los problemas de infraestructura en los climas fríos tienden a ser más comunes.

Con respecto a la eficiencia de los equipos, dado que el cambio climático puede provocar una menor disponibilidad de agua, de nuevo nos podríamos encontrar con dificultades en los procesos, especialmente en el refino, una actividad muy intensiva en agua. También la extracción de petróleo y la producción de gas son vulnerables a la disminución de la disponibilidad de agua, pues ésta es esencial en ambos procesos, especialmente los que utilizan fractura hidráulica.

5.2.8. Transmisión y distribución de energía

En esta sección nos concentraremos en las vulnerabilidades de los sistemas de transporte de energía diferenciando las vulnerabilidades relacionadas con la red eléctrica de las relacionadas con el transporte de combustible.

Respecto a la transmisión y distribución de energía eléctrica, el aumento de las temperaturas podría aumentar las pérdidas, reducir la capacidad y aumentar las tensiones en el sistema de distribución (US Energy Department, 2013). Pero no solo las líneas de transmisión sufren con altas temperaturas, también los transformadores de energía eléctrica se ven afectados por ellas, pudiendo causar incluso interrupciones del suministro de energía eléctrica.

Por otro lado, temperaturas cada vez más altas junto a sequías, podrían exacerbar el riesgo de incendios forestales, lo que supone también un riesgo para la transmisión de electricidad, ocasionando daños físicos a las torres de alta tensión.

Otros fenómenos meteorológicos como vientos extremos y carga de hielo, las avalanchas, los deslizamientos de tierra y las inundaciones, podrían del mismo modo afectar el suministro de electricidad. Además, el deshielo del permafrost, causado por el calentamiento global, se considera como otro riesgo importante, especialmente para las infraestructuras existentes en las regiones del norte.

En resumen, las líneas de transmisión, y en general toda la red eléctrica, son altamente vulnerables al aumento de las temperaturas, a las sequías, a las inundaciones, a los vientos extremos, a la formación de hielo y al deshielo del permafrost.

En referencia a la vulnerabilidad de la infraestructura de transporte a los cambios ambientales, los oleoductos y gasoductos podrían dañarse por varios eventos, como inundaciones, tormentas, huracanes y otros fenómenos extremos (Paskal, 2009). Aunque la mayoría de las tuberías están enterradas, y por lo tanto aparentemente aisladas de los efectos del mal tiempo, los nodos tales como estaciones de bombeo y las válvulas sí son vulnerables a los fenómenos climáticos. Además, no está claro cómo los cambios en los niveles freáticos, la estructura del suelo, la erosión y el hundimiento podrían afectar a los oleoductos. Es posible que algunas tuberías existentes precisaran ser reevaluadas, especialmente aquellas afectadas por el deshielo del permafrost.

6. Propuestas de adaptación del sector energético al cambio climático

El recorrido del presente informe nos ha llevado, de la mano del marco de la Figura 32, por un análisis de la realidad del cambio climático y su influencia en el sector energético, siempre desde una perspectiva de adaptación. En primer lugar se presentó el marco de trabajo, a continuación profundizamos en los impactos físicos del cambio climático (temperaturas, precipitaciones y eventos extremos), posteriormente describimos los impactos esperados propiamente en los sistemas energéticos (oferta y demanda), y concluimos hasta el momento con el capítulo anterior dedicado a analizar las vulnerabilidades del sector. Llegados a este punto, estamos en condiciones de presentar ya propiamente algunas de las medidas de adaptación al cambio climático en el sector energético que se pueden encontrar en la literatura internacional. Sin embargo, antes de ello, conviene describir algunos conceptos asociados a todo proceso de adaptación que nos permitan situar estas propuestas.

Como se pone de manifiesto en el AR5 del IPCC, en el contexto mundial sobre el cambio climático, la adaptación requiere una combinación de elementos que incluyen la disponibilidad de recursos económicos y naturales, el acceso a la tecnología, la información, la infraestructura y las instituciones. Las medidas de adaptación pueden ser formuladas y se pueden tomar en tres vías diferentes: (1) pueden ser una respuesta al cambio climático por sí solo, (2) pueden ser parte de un conjunto más amplio de iniciativas, o, finalmente, (3) pueden ser una adición a las inversiones iniciales con el fin de aumentar la capacidad de recuperación.

Hay similitudes entre la adaptación, en el contexto del cambio climático y las medidas tomadas por los individuos, las empresas o los gobiernos para hacer frente a la variabilidad natural del clima y la variabilidad creada por el cambio climático global. Por lo tanto, disociar la adaptación al cambio climático de la política energética puede ser complicado, sobre un escenario tan entrelazado.

Además, en los sistemas energéticos, ya se tienen en cuenta algunos riesgos climáticos tanto en su funcionamiento como en su planificación. No obstante, las medidas de adaptación pueden reducir aún más la vulnerabilidad del sistema a los cambios ambientales, mediante la creación de capacidad, la mejora de la información y la integración de los riesgos climáticos en la gestión y toma de decisiones operativas.

Para profundizar en todas estas cuestiones, a continuación se explora el concepto de adaptación y sus diversos atributos en el contexto del sector energético. Concretamente se analizarán la capacidad de adaptación, las medidas de adaptación, las necesidades y las opciones de adaptación.

6.1. Capacidad de adaptación

Según el AR5 del IPCC, “la capacidad de adaptación es la capacidad de los sistemas, las instituciones, los seres humanos y otros organismos para adaptarse a posibles daños, aprovechar las oportunidades y responder a las consecuencias”. Más específicamente, la capacidad de adaptación es la capacidad o potencial de un sistema para responder con éxito a la variabilidad climática.

La implementación de la capacidad de adaptación necesita fundamentalmente dos condiciones: (1) la mejora del conocimiento (investigación y recopilación de datos) y (2) proporcionar un marco de apoyo a la acción por parte de gobiernos, asociaciones e instituciones.

Mejorar el sistema de conocimiento

La generación de los datos y el conocimiento es una condición necesaria para una acción eficaz. Hay algunas necesidades generales como:

- Proporcionar modelos de alta resolución para la evaluación de impacto regional local.
- La investigación de las tecnologías y prácticas de ahorro y eficiencia energética.
- Investigar el impacto de los cambios en los patrones regionales de uso de la energía.
- Comprender mejor el efecto de los cambios en las condiciones climáticas en el desarrollo de las energías renovables y de origen fósil.

Luego, hay otras necesidades relacionadas con áreas tecnológicas:

- Mejorar la información sobre la interacción entre la demanda de agua y su uso.
- Mejora en la gestión de las curvas de demanda eléctrica.
- Mejorar la comprensión del impacto del cambio climático y la variabilidad local en el potencial del viento y la producción de energía solar.
- Desarrollar estrategias y mejorar el potencial tecnológico de los sistemas de suministro de energía.
- Entender el papel de las interconexiones regionales y la generación distribuida en la mejora de la resistencia de los sistemas de suministro de electricidad.
- Comprender el impacto de fenómenos meteorológicos severos en los sistemas de tuberías submarinas.

Además, la monitorización de datos también es un elemento importante en una estrategia de creación de capacidad de adaptación, y es que no se puede gestionar lo que no se puede medir. En este sentido, los trabajos de la AEMET para España suponen una magnífica base sobre la que asentar los estudios de adaptación sectoriales.

Por último, y aunque no se haya mencionado anteriormente, es necesario aumentar la concienciación colectiva. Mientras que las prácticas de gestión de riesgos se manejan profesionalmente en la mayoría de los casos, la cuestión de la adaptación al cambio climático sigue siendo minoritaria, y la principal explicación a este fenómeno proviene de una conciencia insuficiente sobre la importancia de adaptarnos al cambio climático. Es necesario hacer un esfuerzo en este sentido.

Marco de apoyo para la acción

Una adaptación exitosa implica la colaboración de multitud de socios interesados: instituciones internacionales, gobiernos nacionales y locales, el sector privado, organizaciones no gubernamentales y grupos comunitarios, entre otros.

Los gobiernos nacionales y las instituciones internacionales deben proporcionar un marco político claro para guiar la adaptación efectiva en el medio y largo plazo. Por su parte, los gobiernos locales, las instituciones de la sociedad civil (organizaciones de productores) y las instituciones privadas (empresas privadas) tienen un papel operativo importante porque las medidas de adaptación han de implementarse en su mayoría en el ámbito local.

El WGII del IPCC reforzó esta tesis al comentar que la planificación de la adaptación requiere la participación de instituciones privadas a través de las interacciones entre las partes interesadas de acuerdo a las condiciones culturales, sociales y políticas de cada entorno. El IPCC identifica cinco elementos facilitadores de estas interacciones:

1. La importancia de la coordinación institucional a varios niveles entre los distintos niveles políticos y administrativos en la sociedad.
2. La identificación de actores clave, decisivos para el inicio, la integración y el mantenimiento del impulso para la planificación y ejecución de la adaptación climática en diferentes contextos nacionales. Estos actores clave pueden ser particularmente importantes en ausencia de políticas y estrategias sólidas a nivel nacional.
3. La interacción horizontal entre actores y políticas que operan en los diferentes niveles administrativos.
4. La necesidad de reconocer las dimensiones políticas en la planificación. Se constata que, en general, la clase política no ha reconocido la adaptación al clima como prioridad que deba ser elevada en la agenda política.
5. Mejora de la coordinación entre los grupos de interés gubernamentales y privados.

6.2. Diversificación en las medidas de adaptación

El objetivo principal de la adaptación en el caso del sistema energético podría ser interpretado como garantizar el suministro de energía y el equilibrio de la producción y el consumo tanto en el tiempo como en el espacio. Este proceso de adaptación al cambio climático es complejo y consiste en una multitud de ajustes conductuales, estructurales y tecnológicos. Para profundizar en estos aspectos, en este apartado diferenciamos las medidas de adaptación en base a un conjunto de atributos que destaca la obra de referencia del Banco Mundial (Ebinger and World Bank, 2011).

El tiempo de la acción

Las medidas de adaptación pueden ser proactivas o reactivas. Un enfoque proactivo en sistemas de energía tiene como objetivo reducir la exposición a los riesgos futuros. Un enfoque reactivo, por el contrario, tiene como objetivo aliviar los impactos sobre las tecnologías instaladas o los sistemas de suministro.

Ámbito temporal

Las medidas de adaptación pueden ser a corto plazo o a largo plazo. La distinción entre la adaptación a corto plazo y la adaptación a largo plazo tiene que ver con el ritmo y la flexibilidad de las medidas a adoptar.

Capacidad para hacer frente a las incertidumbres

- Medidas 'no-regret': Son medidas de adaptación cuyos beneficios socioeconómicos superan sus costos.
- Medidas 'low-regret': Se trata de medidas de adaptación cuyos costes asociados son relativamente bajos y para las que los beneficios futuros pueden ser relativamente grandes.
- Medias 'win-win': Estas medidas de adaptación reducen al mínimo el riesgo social y explotan las oportunidades potenciales, al mismo tiempo que presentan otros beneficios sociales, ambientales y económicos.

Localización

Las medidas de adaptación pueden ser localizadas o sistémicas. Los impactos del cambio climático son con frecuencia locales, pero también hay casos en que estos impactos son sistémicos, como cuando afectan a la dotación de recursos.

La naturaleza de los agentes que intervienen en la toma de decisiones

Las medidas de adaptación pueden ser privadas o públicas, es decir, impulsadas por el mercado o basadas en políticas. La mayor parte de la infraestructura energética en los países desarrollados es de propiedad privada. Sin embargo, dado que estas economías dependen en gran medida de un suministro fiable de energía, los gobiernos tienen que garantizar que esta infraestructura energética sea resistente al cambio climático. Por todo ello, para planificar una estrategia adecuada de adaptación al cambio climático en el sector de la energía es necesario tener en cuenta los puntos de vista público y privado. Tal y como reconoce la Corporación Financiera Internacional (IFC): "Se espera que sea el sector privado el que financie la mayor parte de las medidas necesarias para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y la adaptación a los efectos del cambio climático." (IFC, 2010, citado en Ebinger y Banco Mundial, 2011, pag. 69).

Abundando en este punto, la adaptación privada es aquella iniciada y ejecutada por individuos, hogares o empresas privadas en su propio beneficio como actor económico racional. En cambio, la adaptación pública es iniciada y ejecutada por el gobierno en todos los niveles, y por lo general se dirige a las necesidades colectivas. Ese comportamiento racional enfocado al propio beneficio de los actores privados, normalmente se extiende a acuerdos público-privados. El peligro es que la duración de estos acuerdos sea inferior al plazo necesario para que las empresas descuenten los costes de adaptación. Si, o bien esto no se da, o bien la concienciación sobre el problema del cambio climático no es la adecuada, proyectos costosos como los que involucran grandes infraestructuras nunca serán llevados a cabo por el sector privado, e incluso tampoco por el público. Habilitar políticas gubernamentales es un aspecto clave para garantizar vínculos público-privados eficaces, incluyendo la atención a la adaptación en todos los países. Sin embargo, no podemos obviar que, incluso con las mejores políticas gubernamentales, el rédito económico seguirá siendo el principal motivador para las inversiones.

6.3. Necesidades y opciones de adaptación

La contribución del WP11 al AR5 del IPCC incluye, en su capítulo 14, una descripción muy detallada de cómo ha de planificarse cualquier proceso de adaptación al cambio climático en un sector determinado. El informe describe una serie de necesidades, opciones, evaluaciones y medidas. Centrándonos en las dos primeras, a continuación enumeramos los puntos que se destacan en el informe:

Necesidades de adaptación:

- Biofísicas y ambientales
- Sociales
- Institucionales
- Involucración del sector privado
- Información, capacitación y recursos

Opciones de adaptación:

- Física y estructurales: Ingenieriles, tecnológicas, basadas en los ecosistemas y de servicios
- Sociales
- Institucionales
- Sector público-privado

La siguiente tabla recoge esta organización y una primera aplicación al caso de la energía:

Categorías de adaptación		Ejemplos aplicables al sistema energético
Estructurales físicas	Ingeniería	Diseño técnico de los cambios en las infraestructuras existentes
	Tecnología	Desarrollo de técnicas de monitorización climática que permita la adaptación en tiempo real de los sistemas de generación eléctrica
	Basadas en ecosistemas	Potenciar las interconexión en los sistemas agua-energía
	Servicios	Diseño de sistemas de apoyo a las infraestructuras de redes de suministro energético
Sociales	Educación	Potenciar las cuestiones de ahorro y eficiencia energética en la enseñanza reglada, especialmente en la secundaria
	Información	Mejorar los canales de comunicación entre administraciones públicas, empresas energéticas y ciudadanía mediante la organización de foros de diálogo tanto presenciales como a distancia
	Comportamiento	Desarrollar protocolos de respuesta rápida en infraestructuras energéticas claves ante eventos climáticos extremos

Categorías de adaptación		Ejemplos aplicables al sistema energético
Institucionales	Economía	Movilizar los recursos financieros necesarios para la adaptación de las infraestructuras energéticas existentes
	Leyes y regulaciones	Desarrollo de códigos de edificación y de gestión energética
	Políticas y programas gubernamentales	Implementación de los planes de acción vinculados a las directivas europeas y los acuerdos internacionales sobre cambio climático

Tabla 22: Categorización de medidas de adaptación basada en el AR5 del IPCC

Este planteamiento del WGII del IPCC será el que nos ayude a clasificar las distintas acciones de adaptación presentes en la literatura.

6.4. Acciones de adaptación

Aterrizando en la cuestión energética que nos ocupa, a continuación entramos en las propuestas concretas de adaptación obtenidas en la literatura. Comenzaremos con la adaptación de la oferta, que es el punto más analizado en la literatura, y continuaremos con la de la demanda. La estructura será la siguiente: analizaremos cada una de las tecnologías de generación así como las de refino y transmisión-distribución. En cada una de ellas, y siguiendo las opciones de adaptación sugeridas por el IPCC, las agruparemos en dos: ingenieriles y no ingenieriles, aunque en ocasiones veremos cómo algunas de ellas presentan cierto grado de solapamiento.

6.4.1. Adaptación de la oferta energética

La mayor parte de las medidas de adaptación que se presentan están sacadas de cuatro informes: “Climate risk and adaptation in the electric power sector” (Asian Development Bank, 2012), “Climate impacts on energy systems: key issues for energy sector adaptation” (Ebinger and World Bank, 2011), “Use of indicators to improve communication on energy systems vulnerability, resilience and adaptation to climate change” (Michaelowa et al., 2010) y “Climate-proofing energy systems (Williamson et al., 2009)”. Se podrá observar que las medidas son muy genéricas, entran poco al detalle. Esto pone de manifiesto la necesidad de ampliar los estudios de campo regionalizados sobre adaptación al cambio climático en el sector energético.

6.4.1.1. Hidráulica

Las centrales hidroeléctricas tienen un tiempo de vida de unos 50 o 100 años, por esta razón es fundamental evaluar todos los cambios en el clima que podrían afectar la producción y el funcionamiento de las mismas.

Los principales retos adaptativos a los que se enfrentan las centrales hidroeléctricas tienen que ver con el aumento de la frecuencia de eventos extremos como tormentas o ciclones, pero no son los únicos, también hay retos en la gestión de los sistemas debido a cambios en la dotación de energía.

- Medidas ingenieriles:

- Diseñar infraestructuras más robustas ante fenómenos extremos futuros más frecuentes.
- Aumentar la altura de la presa y ampliar las compuertas para soportar incrementos extremos en los caudales de los ríos (con especial atención al deshielo de los glaciares).
- Construir o aumentar los depósitos de almacenamiento de agua y adecuar su gestión.
- Restaurar y administrar mejor las tierras aguas arriba incluyendo la repoblación forestal para reducir las inundaciones, la erosión, la sedimentación y los deslizamientos de tierra.
- Construir pequeñas presas en las cuencas altas capaces de gestionar aumentos extremos de caudal.
- Ampliar la capacidad de generación instalada para aprovechar los incrementos de caudal y modificar las especificaciones de las turbinas.
- Modificar canales y / o túneles en función del cambio esperado en los caudales.
- Modificar la capacidad de los aliviaderos e instalar compuertas para eliminar depósitos colmatados.
- Fomentar la integración regional a través de conexiones de transmisión. Como exponen Soito y Freitas (2011), a partir del caso de Brasil, los sistemas hidráulicos con acumulación aportan flexibilidad al sistema de generación, especialmente cuando están interconectados. La Figura 68 muestra los intercambios de energía hidráulica entre las regiones de Brasil.

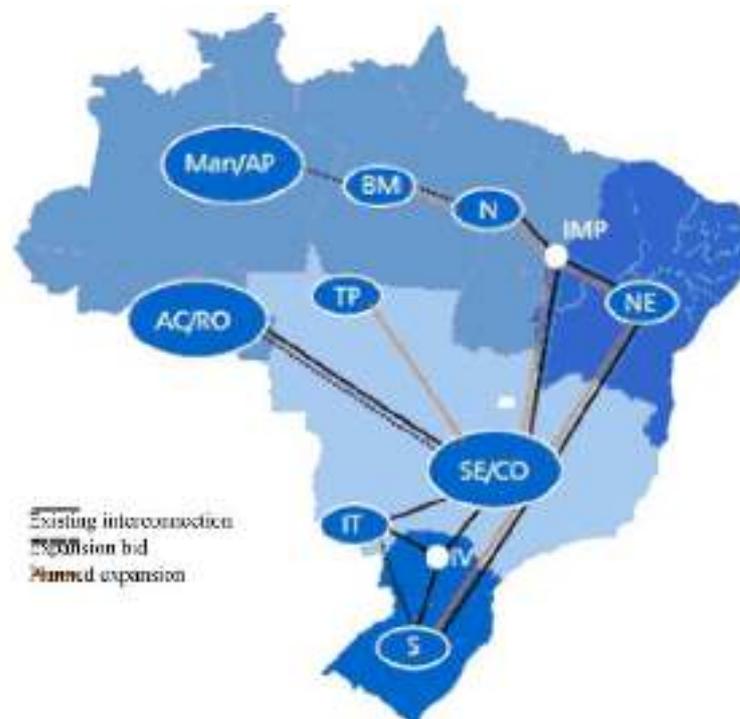


Figura 68: Conexiones hidráulicas en Brasil, 2011

- Situar las plantas en lugares no amenazados por inundaciones catastróficas, especialmente las debidas al deshielo de glaciares. Esta medida de adaptación es típica en regiones en el mundo donde hay centrales hidroeléctricas que dependen de los ciclos de los glaciares. En los trabajos de Agrawala et al. (2003) sobre Nepal, se recomienda trasladar las centrales hidroeléctricas a ubicaciones alternativas para reducir esta vulnerabilidad. Otra respuesta de adaptación a este riesgo es promover el desarrollo de plantas más pequeñas, lo que distribuye el riesgo de un evento de inundaciones catastróficas y evita daños a una gran planta con un costo hundido significativo.
- Medidas no ingenieriles:
 - Desarrollar estudios que estimen rangos probables de variaciones climáticas proyectadas durante la vida útil de la hidroeléctrica.
 - Identificar diseños rentables de nuevas plantas basados en coste-beneficio, y hacer los estudios económicos pertinentes que viabilizarían las adaptaciones de las ya existentes para hacer frente a los riesgos específicos para el sitio.
 - Adaptar e implementar los procesos de operación de la planta para dar cuenta de los cambios en los patrones de flujo de los ríos.
 - Optimizar la gestión de embalses y mejorar la producción de energía mediante la adaptación a los cambios en los patrones de precipitación o caudal de los ríos.
 - Desarrollar integraciones operacionales con otras fuentes (por ejemplo gas natural o energías renovables).
 - Desarrollar mejores técnicas de predicción hidrográfica y normas de funcionamiento de gestión adaptativa.
 - Desarrollar estrategias de gestión en toda la cuenca que tengan en cuenta toda la gama de los usos del agua.

6.4.1.2. *Energía eólica*

El sector eólico tiene retos adaptativos que tienen que ver tanto con el diseño de los propios aerogeneradores como con la gestión de los parques para optimizar la generación en circunstancias cambiantes. Al igual que en el caso de la hidráulica, identificamos las primeras medidas como ingenieriles y las segundas como no ingenieriles.

- Medidas ingenieriles:
 - Construir aerogeneradores que pueden operar en escenarios con velocidades de viento superiores, ráfagas más frecuentes e intensas y cambios de dirección.
 - En latitudes más altas, los cambios en las condiciones de permafrost han de tenerse en cuenta en el diseño de la cimentación de los aerogeneradores (Pryor y Barthelmie, 2010).
 - En el caso del diseño de turbinas offshore, hay que tener en cuenta los aumentos previstos en la altura de las olas y el nivel del mar.

- Considerar el desarrollo y comercialización de aerogeneradores de eje vertical, que son menos sensibles a los cambios rápidos en la dirección del viento.
 - Tomar en consideración en el diseño de los parques el impacto esperado por el aumento de las tormentas sobre los rendimientos energéticos.
 - Considerar las proyecciones de aumento de las temperaturas en el propio diseño de los aerogeneradores y demás componentes de los parques eólicos pues podrían afectar negativamente a materiales de construcción, fluidos refrigerantes, etc.
- Medidas no ingenieriles:
- Tener en cuenta los cambios esperados en la velocidad de viento, el aumento del nivel del mar y los cambios en las inundaciones fluviales en la toma de decisión sobre la ubicación de nuevos parques eólicos.
 - Crear equipos de reparación de emergencia para turbinas dañadas en eventos extremos.
 - Desarrollar sistemas de seguros ante los posibles daños o pérdidas de rendimiento futuros en parques eólicos debido a eventos extremos.
 - Aumentar los esfuerzos en investigación relacionada con predicciones meteorológicas, especialmente relacionadas con los regímenes de viento.

6.4.1.3. *Energía solar*

La energía solar, en sus dos principales variantes de aprovechamiento energético, a saber, fotovoltaica y termosolar, adolecen de las mismas vulnerabilidades ante el cambio climático: aumento de las temperaturas medias, aumento de la capa de nubes e incremento de los eventos extremos.

A continuación se presentan algunas medidas tanto ingenieriles como no ingenieriles para la adaptación de ambos tipos de tecnologías.

- Medidas ingenieriles:
- Reforzar las estructuras en los parques fotovoltaicos y termosolares para resistir los cambios esperados en la velocidad del viento.
 - Especificar y normativizar las nuevas estructuras de montaje.
 - Especificar y normativizar el cableado y los componentes a utilizar en condiciones de alta humedad.
 - Especificar los componentes de las células fotovoltaicas resistentes al calor y diseñar módulos que soporten picos de muy alta temperatura.
 - Usar diseños que mejoren el flujo de aire pasivo bajo las estructuras de montaje, lo que reduce la temperatura del panel y aumenta la producción de energía fotovoltaica.
 - En las zonas secas, considerar sistemas de limpieza de los paneles que eliminen el polvo y la arena.
 - En zonas donde se espere un incremento en las nevadas, usar estructuras que eviten la acumulación de nieve.

- En zonas donde se espere que la radiación solar sea más difusa, optar por paneles fotovoltaicos con células de superficie rugosa que permitan un ángulo de inclinación apropiado.
 - En zonas donde se esperen cambios rápidos en la cobertura de nubes, optar por instalaciones con micro-inversores en lugar de un único inversor para mejorar así la estabilidad e incrementar la potencia de salida.
 - En instalaciones de concentración solar (CSP) con seguimiento solar, los motores y su montaje deben ser especialmente robustos en zonas donde se esperen vientos más fuertes y mayor impacto y / o frecuencia de tormentas.
 - Evitar la instalación de sistemas de seguimiento solar donde se espere un aumento de eventos extremos.
 - En las CSP ubicadas en zonas donde se espere aumento de temperaturas, es conveniente considerar la instalación de sistemas de refrigeración por aire forzado o de refrigeración líquida (Patt et al., 2010).
 - Igualmente, en zonas donde se espere escasez de agua, considerar sistemas de enfriamiento por aire.
 - 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 (Patt et al., 2010).
- Medidas no ingenieriles
- Mejorar los sistemas de predicción meteorológica, especialmente aquellos relacionados con la radiación solar incidente.
 - Siempre que sea posible, planificar la instalación de sistemas fotovoltaicos o termosolares en zonas donde se espera que el cambio en la cobertura de nubes sea relativamente bajo.
 - Elegir ubicaciones menos expuestas a posibles incrementos en polvo, arena o nieve.
 - Crear equipos móviles de reparación disponibles para asegurar el funcionamiento de los sistemas después de fenómenos extremos.

6.4.1.4. Biomasa y biocombustibles

Las medidas de adaptación de los sistemas de bioenergía son similares a los de otras explotaciones agrícolas de alta intensidad. La Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO), por ejemplo, ha llevado a cabo numerosos estudios sobre la mejora de resiliencia al cambio climático en la agricultura (FAO, 2010). Estos estudios son igualmente aplicables a la bioenergía y los sistemas de producción mixtos de energía / alimentos.

A continuación se presentan una serie de medidas ingenieriles y no-ingenieriles asociadas a los biocombustibles. Adicionalmente, se presentan otras medidas basadas en los trabajos de la FAO.

- Medidas ingenieriles:

- Mejorar la eficiencia de los sistemas de riego existentes para contrarrestar efectos de la sequía.
 - Proteger las zonas de cultivo contra las inundaciones mediante la construcción de diques y mejoras en el drenaje.
 - Ampliar los sistemas de recogida de aguas pluviales, las técnicas de almacenamiento y conservación del agua, la reutilización del agua y la desalinización.
 - Mejorar los sistemas de captación de agua.
 - Mejorar la gestión del suelo.
 - Aumentar la robustez de las plantas de energía de biomasa.
- Medidas no ingenieriles
- Aumentar la explotación de plantas halófitas o cultivos robustos con mayor tolerancia al calor y al estrés de agua que los cultivos actuales.
 - Ajustar los sistemas de rotación de los cultivos.
 - Ajustar las fechas de siembra y cosecha.
 - Introducir prácticas de conservación de la humedad del suelo.
 - Reubicar los cultivos en las zonas con menor riesgo de inundaciones y tormentas.
 - Implementar sistemas de alerta temprana de las lluvias estacionales y de anomalías de temperatura.
 - Diseñar estrategias de recolección de emergencia de biomasa en caso de un evento extremo inminente.
 - Proporcionar sistemas de seguros para los cultivos.

Como se mencionó anteriormente, se añaden una serie de propuestas generales hechas por la FAO. Ellos abogan por una estrategia global de adaptación resiliente para los sistemas agrícolas. Las conclusiones son igualmente válidas para biomasa y para biocombustibles.

- Mejorar la captación, la eficiencia de retención y el uso del agua para aumentar la producción.
- Analizar la distribución, la incidencia y la intensidad de las plagas y enfermedades de plantas y animales derivadas del cambio climático.
- Mejorar la gestión de los ecosistemas y la biodiversidad para proporcionar una serie de servicios de conduzcan a sistemas más flexibles, productivos y sostenibles.
- Utilizar los recursos genéticos para determinar la tolerancia de los cultivos a las perturbaciones tales como temperaturas extremas, sequías, inundaciones, plagas y enfermedades.
- Implementar la recolección eficiente y la transformación inicial de los productos agrícolas para reducir las pérdidas posteriores a la cosecha y conservar la cantidad y la calidad de los cultivos.

6.4.1.5. *Olas y energía de las mareas*

El aprovechamiento energético del océano (mareomotriz, olas y aprovechamiento térmico) sigue siendo un campo poco desarrollado y escasamente comercializado. La energía de las mareas puede

considerarse comercial, pero es propiamente una tecnología de energía hidroeléctrica con nichos de aplicación práctica muy escasos. Sí existe sin embargo un considerable desarrollo de las tecnologías de las olas (especialmente en Reino Unido), algunos de los cuales se pueden considerar cerca de comercialización.

Se presentan a continuación las medidas ingenieriles y no-ingenieriles de adaptación para estas tecnologías. La principal referencia utilizada es el trabajo de Hayward y Osman (2011) acerca del potencial energético de las olas.

- Medidas ingenieriles:
 - Los dispositivos deben ser diseñados para resistir olas extremas.
 - En sistemas de boyas, considerar el diseño para una mayor frecuencia de olas gigantes (con una amplitud alrededor de 10 veces la ola media y 100 veces su energía).
 - Para los sistemas anclados, establecer diseños orientados en la dirección de las olas en lugar de a través del frente de ola para reducir la vulnerabilidad a tensiones elevadas.
 - Considerar mecanismos de protección contra las mareas de tormenta.
 - Elevar el nivel de las paredes de la cuenca de presa para los sistemas mareomotrices.
 - En los sistemas de aprovechamiento térmico (OTEC), construir tuberías más grandes para aumentar el volumen de agua a la superficie, y diseñar tubos de aguas profundas capaces de soportar tensiones superiores.

- Medidas no ingenieriles:
 - La principal es optar por implantar en lo posible las centrales de aprovechamiento energético marino más cerca de las costas, en zonas que permitan un mantenimiento y una vigilancia adecuada ante fenómenos extremos.

6.4.1.6. Plantas termoeléctricas (eficiencia de ciclo térmico, sistema de refrigeración, infraestructuras)

En el presente informe se han considerado como centrales termoeléctricas todas aquellas plantas que utilizan un ciclo de vapor (ciclo de Rankine) o una turbina de gas (ciclo Brayton-Joule) para producir electricidad a partir de una fuente de energía. Por lo tanto, en esta categoría se incluyen las centrales térmicas convencionales que utilizan carbón, petróleo o gas como combustible, las centrales nucleares y también las plantas de energía geotérmica. Todas estas centrales presentan un ciclo térmico, un sistema de refrigeración e infraestructuras auxiliares que deben realizar un esfuerzo de adaptación ante las consecuencias del cambio climático.

Este tipo de centrales suele tener una vida útil de 50 años o más, por lo que las medidas de adaptación deben tener en cuenta los cambios en el medio plazo y no sólo cambios más rápidos, así como los posibles cambios en los fenómenos extremos durante ese período.

- Medidas ingenieriles:
 - Desarrollar e implementar rigurosos estándares estructurales para edificios nuevos o renovaciones en las centrales.
 - Optar por estructuras de hormigón en lugar de metálicas en zonas expuestas a eventos extremos.
 - Elevar la altura de las estructuras.
 - Desarrollar técnicas de control de inundaciones, y construir elementos de contención: diques, presas, pólderes, estanques, barreras, mamparos y canales de mayor capacidad.
 - Mejorar el drenaje en las tuberías de agua.
 - Proteger los almacenes de combustible.
 - Optar por sistemas de refrigeración de circuito cerrado, que requieren menos agua de la fuente (Linnerud et al., 2011).
 - Rediseñar los sistemas de refrigeración: recuperar el agua de condensadores e intercambiadores de calor, reducir las pérdidas por evaporación, incrementar el uso secundario o de aguas residuales y potenciar la construcción de torres de enfriamiento en seco.
 - Aumentar la capacidad de los sistemas de tratamiento de aguas.
 - Instalar torres de refrigeración adicionales y modificar las entradas de agua de refrigeración en lugares costeros.
 - Optar por sistemas de refrigeración por aire donde se espere que la escasez de agua sea crítica.
 - Utilizar sistemas secos o de refrigeración híbrida.
 - Desarrollar bombas e intercambiadores de calor más eficientes.

- Medidas no ingenieriles
 - Incorporar las vulnerabilidades regionales al cambio climático en la toma de decisiones sobre la construcción de nuevas centrales térmicas (Linnerud et al., 2011).
 - Concentrar la inversión en aquellas zonas donde los cambios en la temperatura media se espera que sean menos significativos.
 - En general, optar por sistemas energéticos más descentralizados, fortaleciendo las redes de distribución (Linnerud et al, 2011).
 - Invertir en nuevas tecnologías de refrigeración (Linnerud et al, 2011).
 - Exigir medidas de seguridad más estrictas para las inversiones.
 - Desarrollar e implementar altos estándares estructurales para edificios nuevos o renovados.
 - Incorporar los fenómenos conocidos del aumento generalizado y gradual del nivel del mar y de eventos extremos en los criterios de diseño.
 - Formular estrategias a largo plazo para responder a las perturbaciones relacionadas con el clima.

6.4.1.7. *Extracción, producción y refino de combustibles fósiles*

En este punto nos referimos principalmente a los procesos de extracción y procesamiento de carbón, petróleo y gas, y a toda su infraestructura relacionada.

- Medidas ingenieriles
 - Construir o ampliar reservas de agua para reducir el riesgo de inundación en desarrollos mineros nuevos y existentes.
 - Construir o mejorar diques, bermas y vertederos terrestres.
 - Mejorar la robustez de los diseños, especialmente los situados en alta mar.
- Medidas no ingenieriles
 - Situar las futuras exploraciones mineras en zonas que tengan una exposición menor a las inundaciones o los riesgos de sequía.
 - Llevar a cabo evaluaciones de riesgo de inundación.

6.4.1.8. *Transmisión, distribución y transferencia de energía*

En este apartado confluyen dos elementos. Por un lado la transmisión y distribución, que se refiere fundamentalmente a la red eléctrica, y por otro la transferencia, que se refiere al transporte de combustible fósiles.

Las medidas para la transferencia se podrían resumir en pocas palabras: han de ir en la línea de hacer más robustos y flexibles estructuralmente los diseños de tuberías, así como aumentar la fiabilidad de los nodos de las tuberías, las válvulas y las estaciones de bombeo.

Con respecto a las redes eléctricas, los esfuerzos de adaptación deberían centrarse en aumentar la capacidad del sistema para volver a las operaciones normales rápidamente si se producen interrupciones debidas a eventos extremos. A continuación se exponen algunas medidas más específicas.

- Medidas ingenieriles
 - Reforzar las redes de T&D existentes y optar por líneas subterráneas en zonas especialmente vulnerables.
 - En zonas donde se esperen eventos de viento extremos, fortalecer los polos de distribución con cables de retención.
 - Incluir protecciones adicionales contra rayos en la red de distribución.
 - En zonas donde se espere un aumento significativo de las temperaturas medias, mejorar los sistemas de refrigeración en subestaciones transformadoras y distribuidoras.
 - Mejorar las medidas de protección contra inundaciones para las infraestructuras a nivel del suelo en subestaciones.
 - Aumentar la flexibilidad en el diseño y operación de las redes T&D, permitiendo mantener el servicio ante interrupciones provocadas por eventos extremos.

- En términos generales, fomentar una generación distribuida que reduzca la carga exigida a las grandes redes de T&D.
- Medidas no ingenieriles
 - Revisar los estándares de diseño de las torres de distribución que garanticen su estabilidad ante condiciones extremas derivadas del cambio climático.
 - Movilizar los recursos financieros para la construcción de un sistema de transmisión resistente, de capacidad adaptativa.
 - Mejorar la gestión del sistema eléctrico a través de la inversión en redes inteligentes.
 - Restringir la construcción de líneas de alta tensión cerca de diques.
 - Incorporar las proyecciones de cambio climático en los procesos de certificación de los componentes TIC presentes en los sistemas de T&D.

6.4.2. Adaptación de la demanda energética

A continuación se recogen algunas medidas generales de adaptación relacionadas con la demanda de energía, centrándonos en el aumento de la demanda eléctrica para refrigeración debida al aumento de temperatura. El esquema que se seguirá será el mismo: se plantean algunas medidas ingenieriles y no ingenieriles presentes en la bibliografía, especialmente en los cuatro informes ya mencionados.

Estas medidas de adaptación, como se podrá ver, se solapan en muchas ocasiones con medidas de mitigación, e incluso con medidas de gobernanza de más amplio espectro.

- Medidas ingenieriles:
 - Aumento de la generación (MWh) y la capacidad (MW) instalada para satisfacer el aumento de demanda (tradicional perspectiva empresarial).
 - Mejorar la eficiencia energética de todo el proceso de suministro de energía (generación, transmisión, mejoras en el sistema de distribución).
 - Mejorar la eficiencia del uso final de los edificios e instalaciones. Reducir la necesidad de refrigeración, aumentar la eficiencia de enfriamiento y disminuir las ganancias de calor internas.
 - Implementar tecnologías de almacenamiento de energía (condensadores, baterías, sistemas de aire comprimido y sistemas de calor sensible) que permitan aplanar picos de demanda.

El aumento de la generación y de la capacidad debe ser analizado con mucho detalle. El nivel de diversificación de un sistema energético tiene una profunda influencia en su capacidad de adaptación a los impactos climáticos. Depender de una sola fuente de energía hace un sistema de energía más vulnerable a impactos adversos del cambio climático. Por ello es importante ampliar la gama de tipos de plantas de energía y combustibles en el mix de generación y usar una mezcla de patrones de suministros centralizados y descentralizados que contribuyan a aumentar la flexibilidad del sistema y su capacidad de resistencia a condiciones climáticas más variables.

Por otro lado, hay una amplia gama de medidas de política energética que pueden reducir la demanda de energía y la necesidad de invertir en nueva capacidad. Muchas de ellas pueden requerir nuevas normativas y su impacto será más eficaz en la medida en que las compañías eléctricas asuman un papel proactivo en la gestión de la demanda. Algunas de estas medidas son las siguientes:

- Medidas no ingenieriles:
 - Desarrollar normativas y propuestas de ahorro energético
 - Perfeccionar los estándares mínimos de eficiencia energética de los nuevos edificios comerciales y los sistemas de etiquetado y certificación de electrodomésticos.
 - Desarrollar la legislación y el acceso a la financiación para las empresas de servicios energéticos, con remuneración basada en la energía realmente ahorrada por inversión, reducción de los riesgos de llevar a cabo iniciativas y medidas de eficiencia energética.
 - Establecer normas mínimas para los motores eléctricos industriales.
 - Considerar programas subvencionados para la sustitución masiva de las luces incandescentes por luces más eficientes (fluorescentes compactas o diodos emisores de luz), y la sustitución de viejos refrigeradores ineficientes por modelos más eficientes.
 - Adoptar estándares internacionales (IOS) de gestión de la energía.
 - Considerar la refrigeración por evaporación, que puede ser eficaz incluso en climas donde se espera un aumento de la temperatura, siempre que haya disponibilidad de recursos hídricos.

Además de este resumen de medidas obtenidas de los cuatro informes de referencia, el informe Adaptación/Mitigación del sector eléctrico de California para el cambio climático (Parra, 2008) propone una serie de estrategias de adaptación para California que merece la pena mencionar:

- Promulgación de políticas de mitigación que mejoran el potencial de adaptación.
En este punto han dado ejemplo; California ha sido líder mundial en la implementación de legislación energética y políticas en relación a la gestión pública y privada del cambio climático. Se espera, además, que continúen con este papel de liderazgo.
- Aumentar los fondos en I+D+i en el sector energético.
Este estado se encuentra inmerso en un ambicioso esfuerzo de I+D+i que busca proveer de una cartera de sólidas tecnologías de eficiencia energética para las necesidades energéticas futuras.

7. Caso de estudio: Impacto del cambio climático sobre el sistema energético en España

En 2005, en el marco del proyecto ECCE (Efectos del Cambio Climático en España) promovido por la Oficina Española de Cambio Climático a través de un convenio de colaboración con la Universidad de Castilla La Mancha, un amplio panel de expertos nacionales en energía, desarrollaron un informe sobre impactos en el sector debidos al cambio climático (Ministerio de Medio Ambiente, 2005). Aunque propiamente no era un informe de adaptación, sus propuestas pueden ser entendidas en esta clave. Se trata pues de un trabajo de referencia que en este último capítulo del presente informe trataremos de complementar con los avances que hasta la fecha se han ido dando en materia de adaptación al cambio climático en el sector energético.

Como punto de partida, incorporamos aquí una tabla resumen presente en el informe de 2005, la cual expone la escala de impactos que cada uno de los efectos asociados al cambio climático podía tener en las tecnologías y subsectores energéticos de nuestro país (Figura 69).

		Precipitaciones		Temperatura		Viento		Otros
		Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	
Electricidad	Generación	Positivo (solar térmica)	Negativo	Negativo*	Positivo*	Positivo en eólica	Negativo en eólica	Solar: insulación positiva
	Transporte y Distribución	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo si es muy elevado	Neutro	
	Comercialización/demanda	Neutro	Neutro	Negativo**	Negativo**	Neutro	Neutro	Combinación Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento: incremento conjunto provoca efecto negativo
Gas natural	Aprovisionamiento	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	Negativo (oleas)	Neutro	
	Regasificación	Neutro	Neutro	Positivo	Negativo	Neutro	Neutro	
	Transporte y distribución	Negativo	Positivo	Positivo (gasoductos descubiertos)	Negativo (gasoductos descubiertos)	Neutro	Neutro	
	Almacenamiento	Neutro	Neutro	Negativo (almacenamiento)	Neutro	Neutro	Neutro	
	Comercialización/Demanda	Neutro	Neutro	Negativo**	Negativo**	Neutro	Neutro	Combinación Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento: incremento conjunto provoca efecto negativo
Petróleo	Refino	Neutro	Neutro	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	
	Transporte y distribución	Negativo	Positivo	Negativo	Negativo	Neutro	Neutro	
	Demanda	Neutro	Neutro	Negativo**	Negativo**	Neutro	Neutro	
Carbón	Extracción	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Neutro	Neutro	
	Almacenamiento	Negativo	Positivo	Negativo	Positivo	Negativo	Neutro	
	Demanda	Negativo	Positivo	Negativo**	Negativo**	Neutro	Neutro	
Recorables uso no eléctrico	Producción	Positivo en geotérmica	Negativo en biomasa	Negativo en biomasa	Negativo en biomasa	Neutro	Neutro	Solar de baja intensidad: insulación positiva

Figura 69: Impactos del cambio climático en el sistema energético español

* Afecta al rendimiento de las centrales termoeléctricas, nucleares, cogeneración, biomasa, solar térmica, etc. Asimismo, la solar fotovoltaica disipa el calor con mayor dificultad.

** Se considera negativo al suponer una mayor demanda del recurso.

Esta tabla se complementa con la siguiente (Figura 70), que recoge el nivel de conocimiento (1 bajo, 2 medio, 3 alto, 0 desconocido) que a esa fecha de 2005 se disponía acerca de los diferentes impactos.

		Precipitaciones		Temperatura		Viento		Otros
		Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	Incremento	Disminución	
Electricidad	Generación	3	3	1	1	3 (abólica)	3 (eólica)	3 Insolación (solar)
	Transporte y Distribución	2	2	3	3	3	0	
	Comercialización/demanda	1	1	3	3	0	0	2 (Combinación Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento)
Gas natural	Abastecimiento	1	1	0	0	0	0	
	Regasificación	0	0	1	1	0	0	
	Transporte y distribución	1	1	1 (oleoductos descubiertos)	1 (oleoductos descubiertos)	0	0	
	Almacenamiento y Comercialización	1	1	2	2	0	0	2 (Combinación Temperatura/Humedad y Temperatura/Viento)
Petróleo	Refino	1	1	1	1	0	0	
	Transporte y distribución	2	2	2	2	0	0	
	Comercialización	1	1	2	2	2	0	
Carbón	Extracción	1	1	1	1	0	0	
	Almacenamiento	2	2	2	2	2	2	
	Comercialización	2	2	2	2	0	0	
Renovables no eléctricos	Producción	2 (biomasa)	2 (biomasa)	1	1	0	0	2 (Solar de baja intensidad)

Figura 70: Nivel de conocimiento sobre los diferentes impactos del cambio climático en el sector energético

Los siguientes apartados tratarán de actualizar la información recogida en esta primera aproximación a la cuestión de la adaptación al cambio climático en el sector energético español.

7.1. Los impactos físicos del cambio climático en España

Continuando con la estrategia que ha guiado en todo momento a este informe, es decir, desarrollar las interacciones presentes en el marco de trabajo de la Figura 32, este primer apartado se dedica a analizar los impactos físicos debidos al cambio climático esperados en nuestro país. Para ello se utilizarán como base los estudios de regionalización llevados a cabo por la AEMET.

7.1.1. Escenarios de cambio climático regionalizados

Por una parte, los cambios en la disponibilidad de agua inducidos por el cambio climático han sido principalmente analizados por el CEDEX (CEDEX, 2010 y 2012). En estos estudios se determinan, para distintos escenarios de cambio climático provenientes del IPCC, su impacto en los recursos hídricos en régimen natural por demarcación hidrográfica. Estos informes parten a su vez de los datos de precipitación y temperatura derivados de la selección de escenarios climáticos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2008), proporcionados por la Oficina Española de Cambio Climático (OECC) y cubren cuatro periodos temporales entre el s. XX, de 1961 a 1990, y otros tres en el s. XXI, comprendidos entre los años 2011 y 2040, 2041 y 2070 y 2071 y 2100. Los recursos hídricos en

régimen natural se simulan utilizando un modelo hidrológico distribuido de paso mensual con resolución de 1 km² para toda España, Península e islas.

Los datos de precipitación y temperatura, como se comentaba, proceden de los trabajos de regionalización en España elaborados por la AEMET en el marco del Plan Nacional de Adaptación (PNACC). Se trata de una completa colección de proyecciones regionalizadas de cambio climático para España a partir de los datos del IPCC, denominada Escenarios PNACC-Datos mensuales.

Cada proyección es determinada por la combinación de un escenario de emisiones, de un modelo climático de circulación global, MCG, y de una técnica de proyección regional. Del conjunto total disponible en España, AEMET seleccionó un subconjunto que, bajo la hipótesis de equiprobabilidad, representara la variabilidad del total de proyecciones.

7.1.2. Impactos en temperaturas y precipitaciones

Las siguientes figuras recogen algunas de estas proyecciones de incremento de temperatura y precipitaciones por parte de la AEMET. Se han seleccionado dos escenarios del AR5 del IPCC: RCP4.5 y RCP8.5; y dos periodos: 2046-2065 y 2081-2100. Todas ellas están disponibles en la [web](#) del organismo.

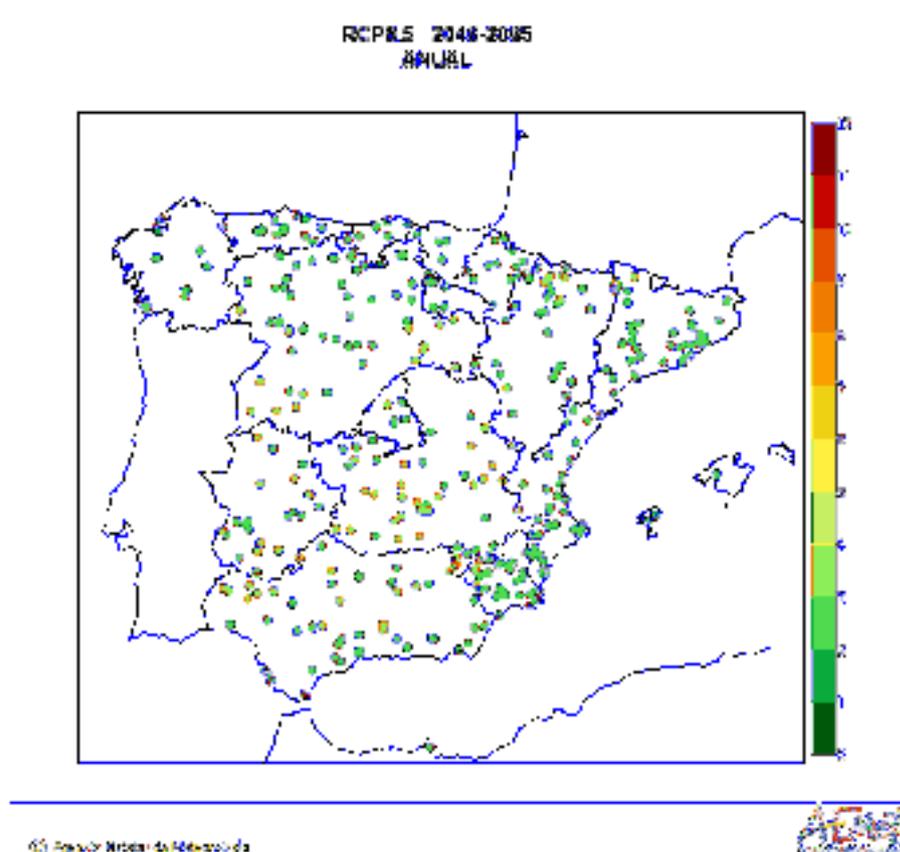


Figura 71: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura según el RCP8.5 en el periodo 2046-2065

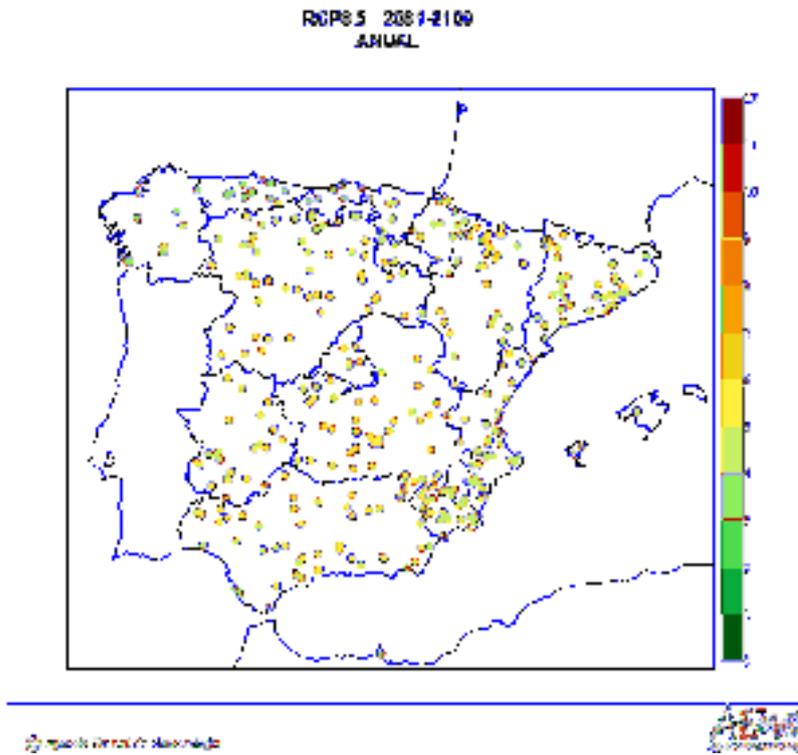


Figura 72: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura según el RCP8.5 en el periodo 2081-2100

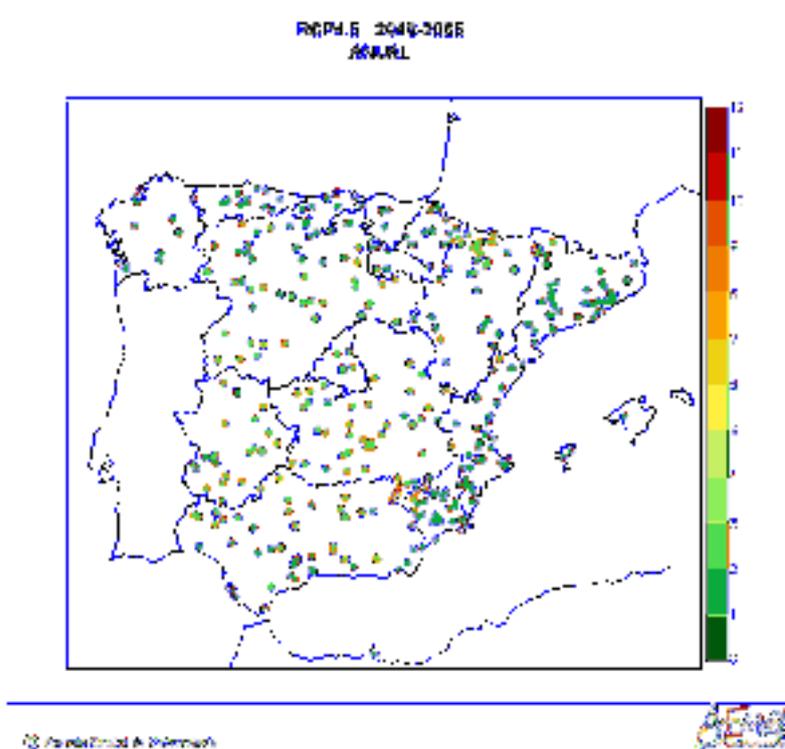


Figura 73: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura según el RCP4.5 en el periodo 2046-2080

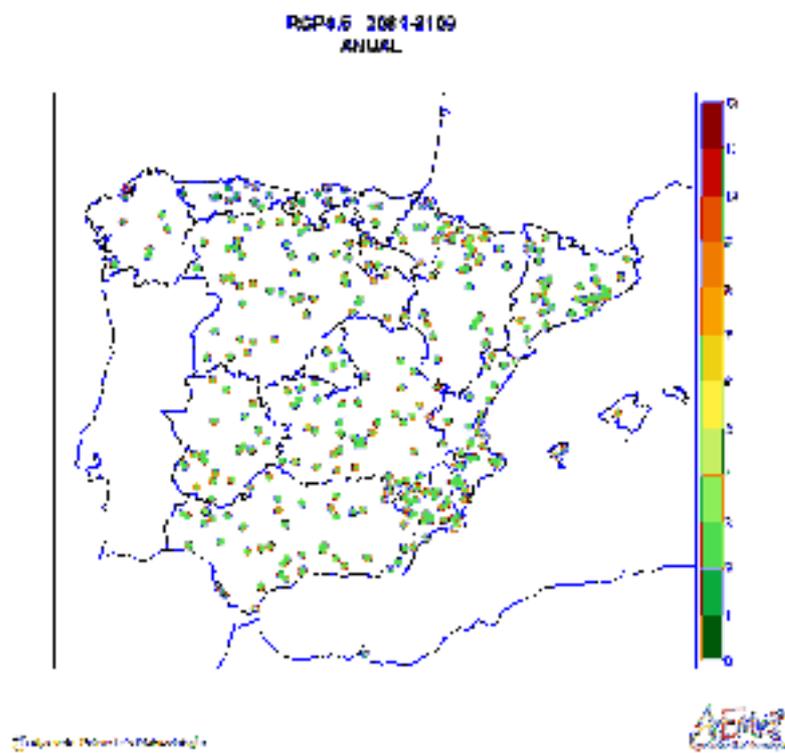


Figura 74: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Aumento de la temperatura según el RCP4.5 en el periodo 2081-2100

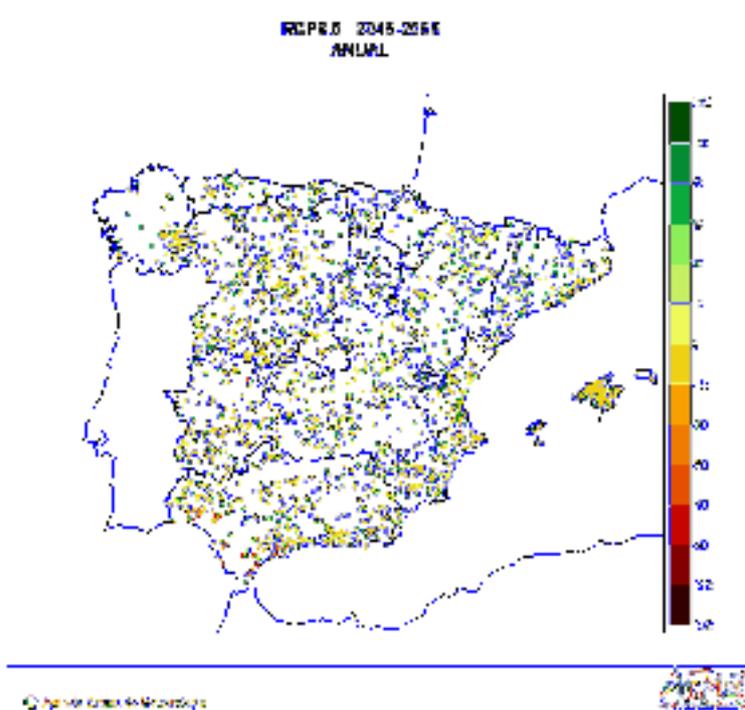


Figura 75: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP8.5 en el periodo 2046-2065

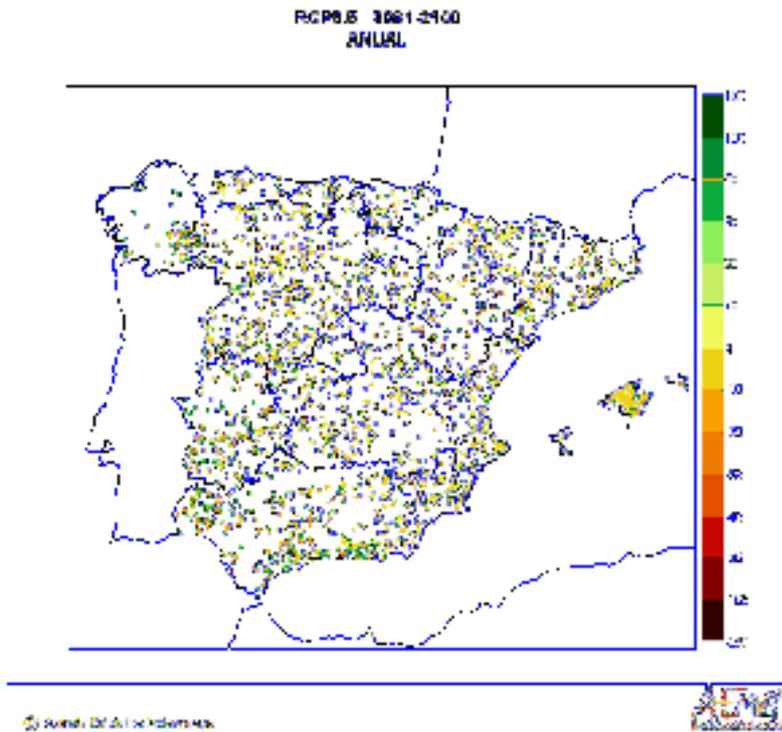


Figura 76: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP8.5 en el periodo 2081-2100

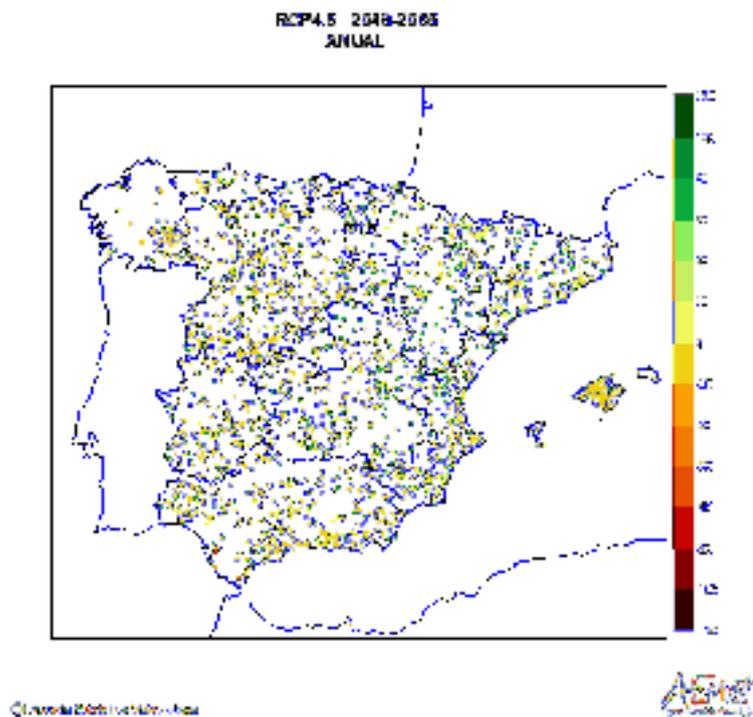


Figura 77: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP4.5 en el periodo 2046-2065

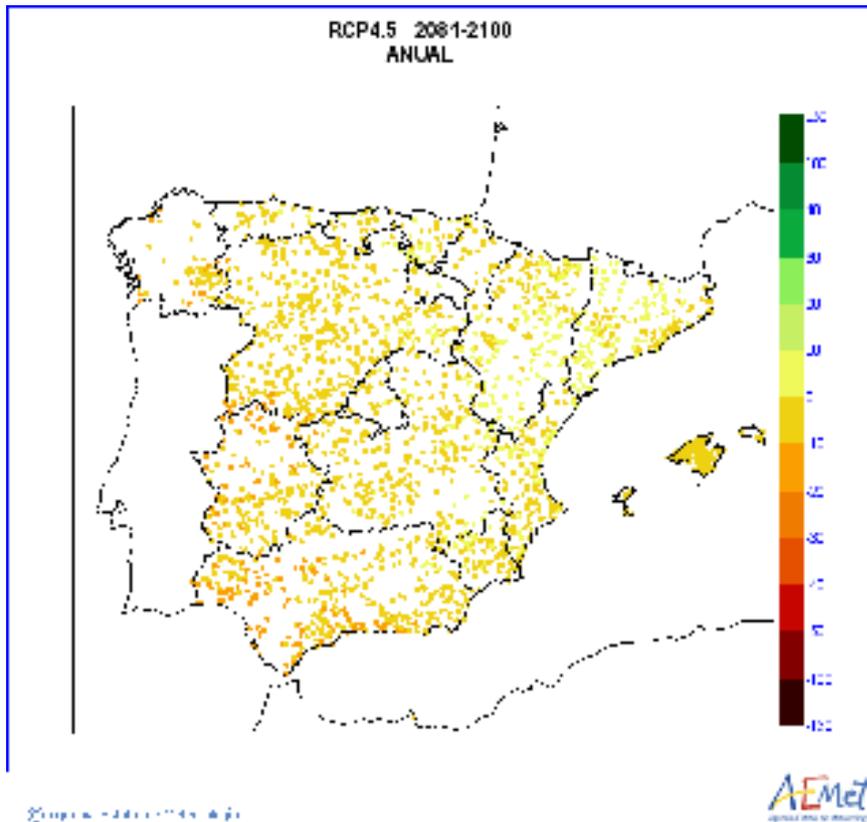


Figura 78: Proyecciones regionalizadas de la AEMET para España. Cambio en las precipitaciones según el RCP4.5 en el periodo 2081-2100

Se observa que, en el periodo de 2046 a 2065, el incremento de temperatura oscila entre los 2 y los 4 °C, una cifra que aumenta hasta los 3-5 °C en el periodo 2081-2100. Con respecto a las precipitaciones, en el periodo de 2046 a 2065 el descenso medio en las mismas rondaría el 10%, mientras que en 2081-2100 este descenso superaría el 15%. Estos datos de precipitación tienen un complemento más detallado en los estudios sobre escorrentía que se presentan a continuación.

7.1.3. Impactos en la escorrentía

Los resultados del trabajo del CEDEX más relevantes para nuestro ámbito energético son los porcentajes de variación en la escorrentía superficial y en el recurso hídrico disponible por demarcación hidrográfica, para el horizonte temporal 2041-2070. La Figura 79 muestra los cambios porcentuales en la escorrentía mientras que la Figura 80 recoge el cambio en el recurso, siempre según el estudio de la Fundación Canal (2014).

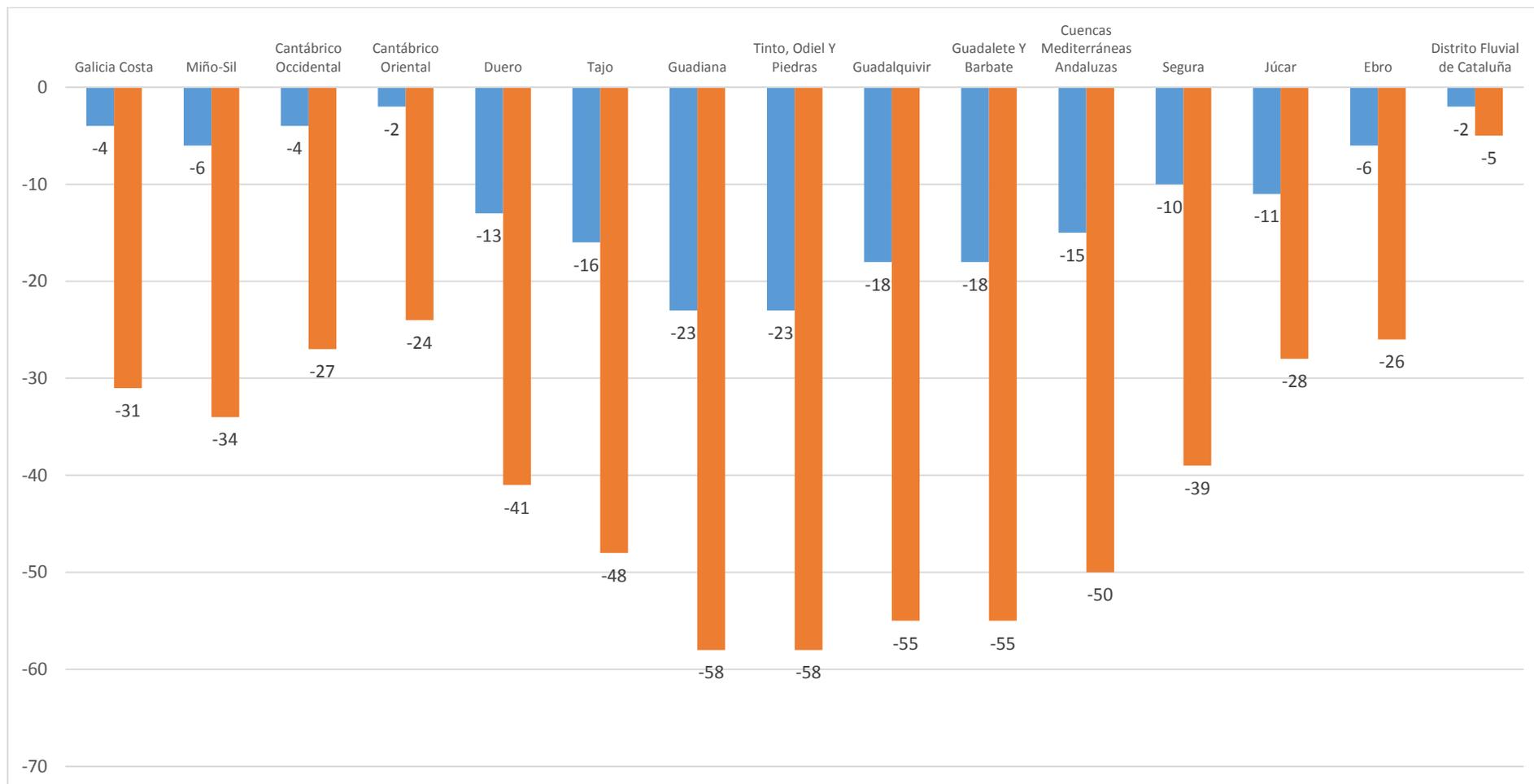


Figura 79: Variación de la escorrentía (%) 2041-2070

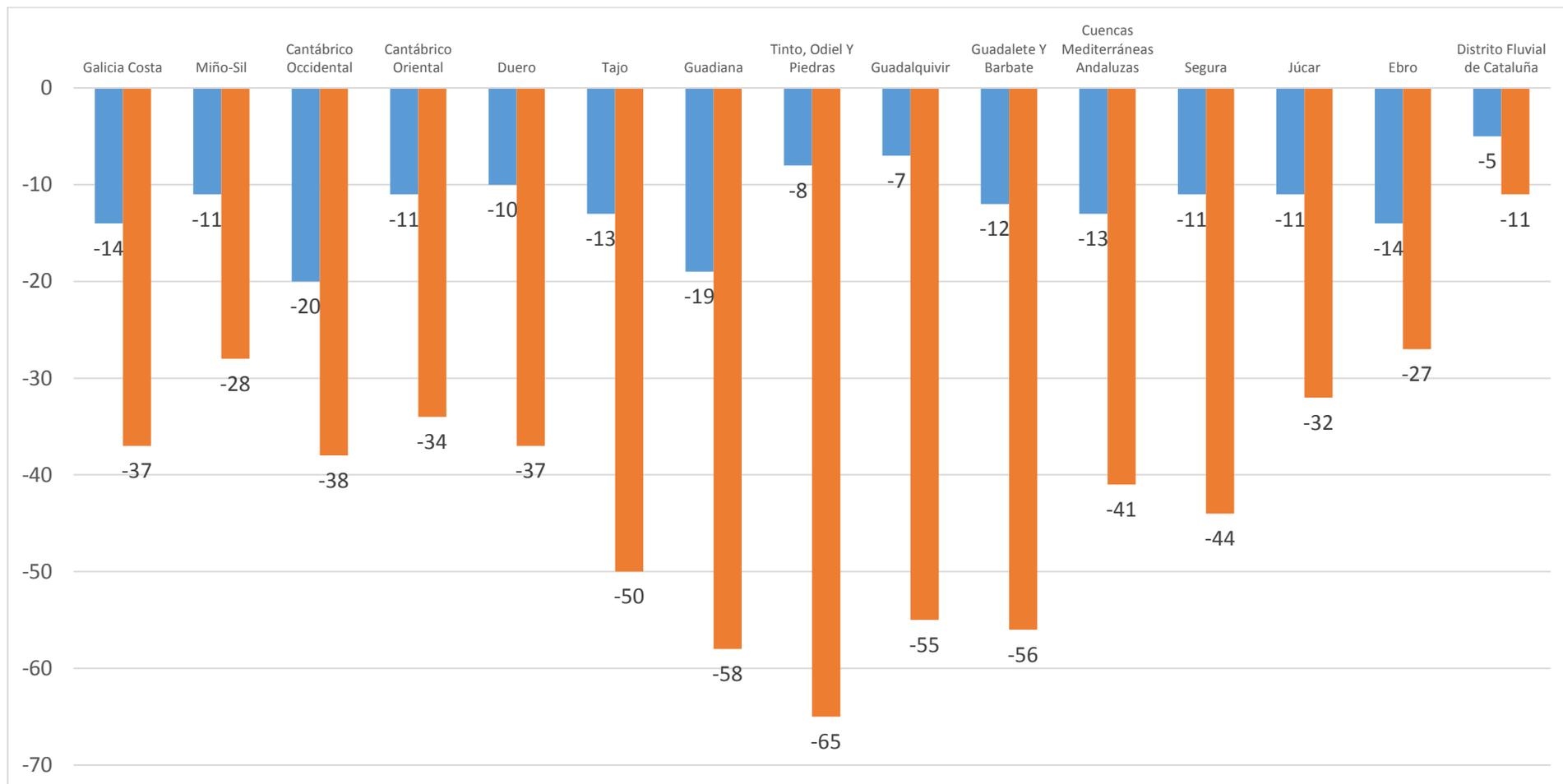


Figura 80: Variación del recurso disponible (%) 2041-2070

Este estudio de la Fundación Canal (2014), centrado en los nexos agua y energía, trabaja con dos escenarios. El escenario 1 de cambio climático corresponde al escenario A2i, CGCM2-FIC, mientras que el escenario 2 corresponde al escenario A2ii, ECHAM4-FIC, ambos del estudio del CEDEX. El primer término (A2i o A2ii) se refiere al escenario original de cambio climático procedente del AR4 del IPCC, y el segundo (CGCM2-FIC o ECHAM4-FIC) en función del modelo de circulación general de la atmósfera empleado para generar los resultados. Hay que señalar que estos escenarios se han escogido en función de sus resultados en términos de cambio climático. Así, el escenario 1 es un escenario de cambio climático medio, y el escenario 2 es un escenario severo.

Vemos que, en el escenario más desfavorable (2), la reducción de la escorrentía en la demarcación en algunas demarcaciones hidrográficas del suroeste alcanza el 58 %.

7.1.4. Impactos en las velocidades de viento

También es posible encontrar en los trabajos de la AEMET proyecciones para las velocidades de viento (a 10m) según los resultados de diferentes proyectos (ENSEMBLES, ESCENA y ESTCENA), basados en el AR4 del IPCC.

La Figura 81 recoge uno de estos resultados: el cambio medio mensual de velocidad de viento (%) proyectado para el período 2071-2100 respecto al clima actual (1961-1990) por el modelo global HadAM3H y regionalizado con el promedio de los RCM de PRUDENCE para el escenario de emisión A2.

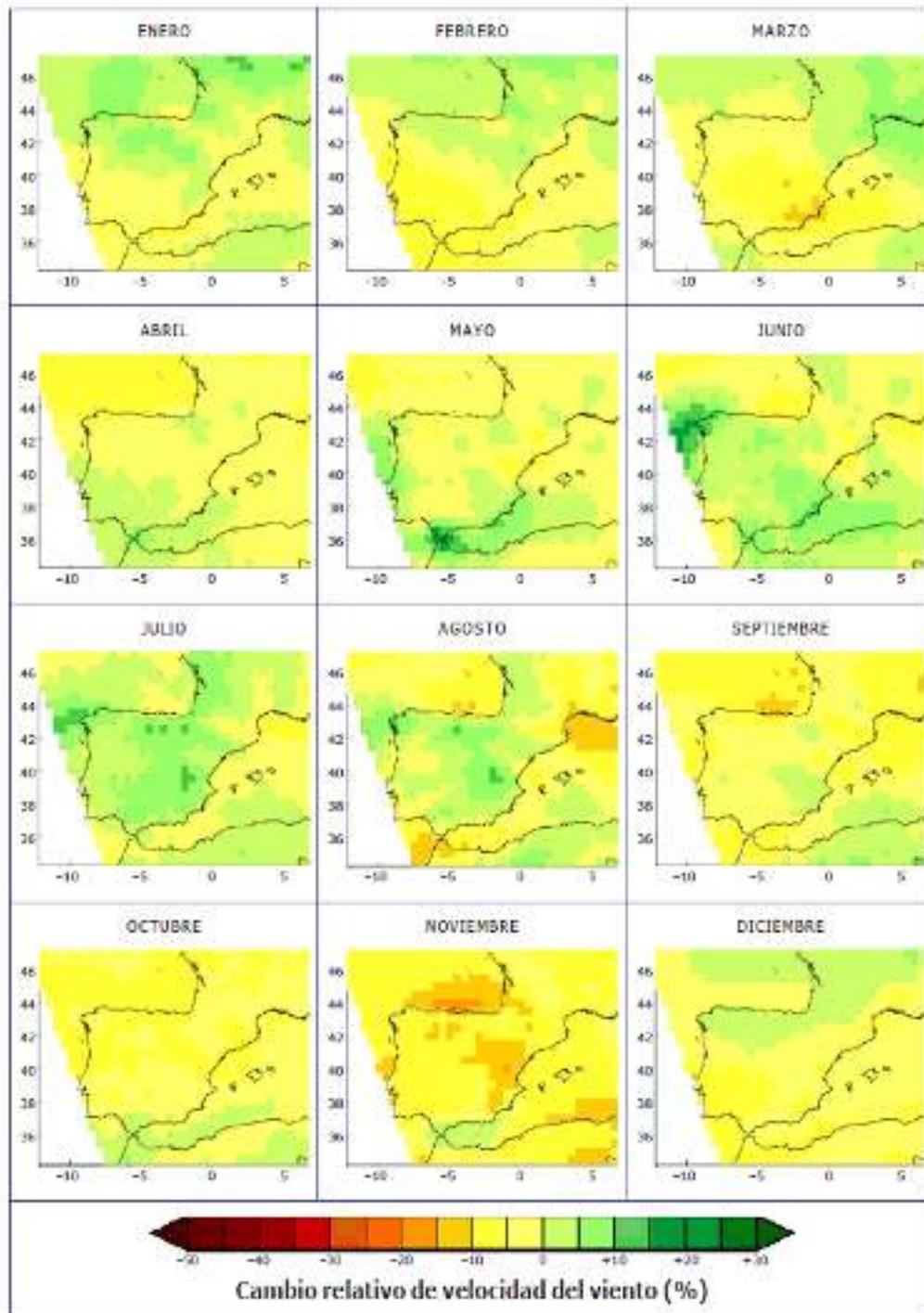


Figura 81: Cambio medio mensual de velocidad (%) proyectado para el período 2071-2100 respecto al clima actual. Escenario A2. (AEMET).

Se observa que la variación presenta sobre todo una tendencia descendente aunque de poca intensidad. Este hecho queda especialmente puesto de manifiesto en los resultados que se presentan en la Figura 82.

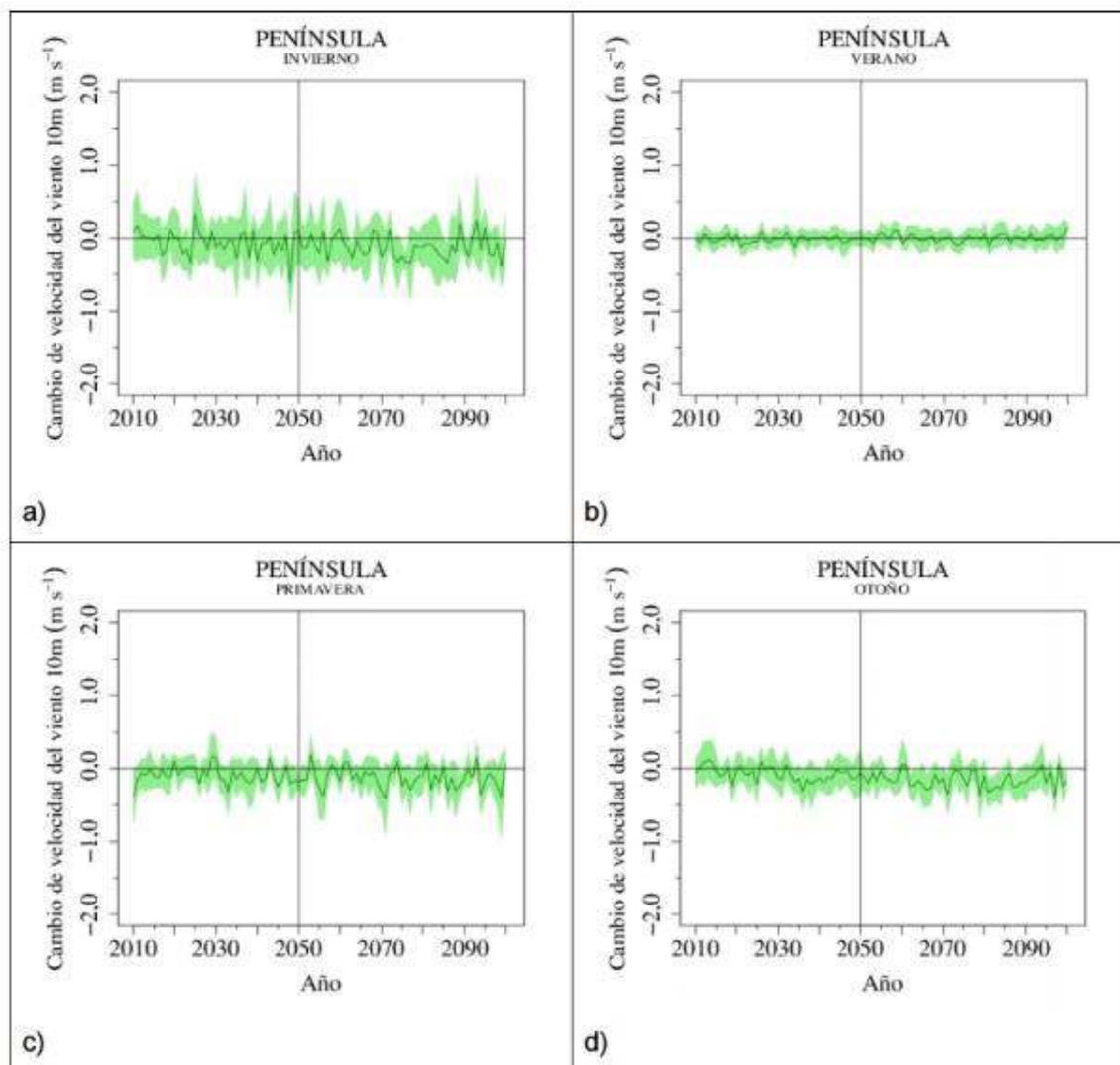


Figura 82: Cambios en el valor medio anual en España de: (a) componente U10 ($m s^{-1}$); (b) componente V10 ($m s^{-1}$); (c) velocidad W10 ($m s^{-1}$); (d) racha máxima R10 ($m s^{-1}$). Escenario A2. (AEMET)

La figura muestra los cambios en el valor medio de las componentes zonal (U10), meridiana (V10), velocidad media (W10) y racha máxima diaria (R10), respectivamente, promediados anualmente para todo el territorio peninsular. Como puede observarse, ambas series muestran oscilaciones muy similares, ligeramente por debajo de cero. Como destaca el informe de la AEMET (2014), en general, los resultados obtenidos de estudios de cambio climático para las variables de viento son poco concluyentes. Estos resultados son el reflejo de que la señal de cambio climático no es clara para el viento en superficie, ya que la variabilidad que muestran estas señales es notablemente mayor que las tendencias.

7.2. Impactos en la oferta energética

En esta sección analizamos, a partir de los impactos físicos presentados en la precedente, su influencia directa en el sector energético, concretamente en el lado de la oferta.

Al analizar los datos de impactos físicos presentados, se observa que los cambios más significativos se encuentran vinculados al agua como recurso energético, especialmente por los cambios esperados en las precipitaciones, las temperaturas y la escorrentía. El otro efecto del cambio climático que quedaría por cubrir, a saber, el impacto en la generación eólica y solar, a tenor de las proyecciones que maneja la AEMET, tendría un impacto comparativamente mucho menor a los anteriores. Por esta razón, nos centraremos especialmente en analizar el impacto sobre los sistemas de agua. El estudio que servirá de referencia para ello será el realizado por la Universidad Pontificia Comillas para la Fundación Canal (2014) sobre el nexo agua-energía en la perspectiva de adaptación al cambio climático.

7.2.1. Impactos vinculados a los usos del agua

7.2.1.1. *Demanda de agua por tecnologías*

Un primer paso para analizar el posible impacto del cambio climático en los usos del agua dentro del sector energético es identificar los consumos de agua por parte de las diferentes tecnologías de generación, tanto las asociadas con procesos de energía primaria como las de procesos de conversión. El rango de valores identificados en la literatura es muy amplio, y depende mucho de la localización y de las prácticas de gestión. El Informe de la Fundación Canal (2014) maneja ocho estudios distintos para obtener todos los coeficientes: Gleick (1994), World Energy Council (2010), Hill y Poole (2009), Mielke et al (2010), US DOE (2006), Water in the West (2013), Macknick et al (2011), y Hardy et al (2012). La Tabla 23 recoge los procesos de energía primaria y la Tabla 24 los de conversión. En esta última se incluye además la eficiencia de conversión (medida de forma inversa, como pérdidas) y las eficiencias de conversión para las distintas tecnologías de conversión energética, en función de la tecnología de refrigeración. Así, para cada una de las tecnologías de generación eléctrica con origen térmico (nuclear, fósiles o solar térmica) se consideran tres tecnologías de refrigeración: seca, refrigeración por torre y refrigeración por agua corriente. Las tecnologías seca y de torre suponen una mayor inversión, y también una menor eficiencia de conversión (mayores pérdidas). En el estudio se considera que la opción por defecto (salvo para la nuclear, en que se ha escogido torre) es la refrigeración por agua corriente.

Las tablas aludidas muestran valores medios, pero las variaciones de consumo de agua pueden ser muy grandes. En particular, en lo que respecta a los biocarburantes, debe señalarse que el consumo de agua puede ser muy variable. Es una cuestión complicada que, como pone de manifiesto el estudio requiere considerar numerosos parámetros y supuestos.

TECNOLOGÍA PARA PROCESOS DE ENERGÍA PRIMARIA (PE)	CONSUMO MEDIO (m ³ /GWh)	USO MEDIO (m ³ /GWh)
Nuclear	169,43	nd
Carbón Nacional	497,96	nd
Carbón Importado	235,55	nd
Gas Natural	156,63	nd
Gas Natural Licuado	0	nd
Petróleo Crudo	1.452,39	nd
Hidráulica Fluyente	0	nd
Hidráulica con Embalse	27.833,70	791.676,00
Minihidráulica		nd
Eólica terrestre	0	nd
Eólica marina	0	nd
Solar Fotovoltaica	0	nd
Solar Termoeléctrica	0	nd
Solar Térmica	0	nd
Biomasa Cultivos	86.976,00	nd
Biomasa Residuos Agrícolas	0	nd
Biomasa Residuos Forestales	0	nd
Residuos Sólidos Urbanos	0	nd
Inputs para Bioetanol	152.710,07	nd
Inputs para Biodiesel	533.894,09	nd
Biogas	0	nd
Energía Humana	0	nd

Tabla 23: Uso de aguas por tecnologías (procesos de energía primaria)

ÁMBITO	TECNOLOGÍA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA	USO (m ³ /GWh)	CONSUMO (m ³ /GWh)	PÉRDIDAS EN CONVERSIÓN
Nuclear	Nuclear (Refrigeración por agua corriente)	139000	1600	67%
	Nuclear (Refrigeración por torre)	3800	2600	70%
	Nuclear (Refrigeración seca)	0	0	77%
Carbón	Carbón nacional convencional (Refrigeración por agua corriente)	99900	1400	67%
	Carbón nacional convencional (Refrigeración por torre)	2500	2100	70%
	Carbón nacional convencional (Refrigeración seca)	100	0	77%
	Carbón importado convencional (Refrigeración por agua corriente)	99900	1400	67%
	Carbón importado convencional (Refrigeración por torre)	2500	2100	70%

ÁMBITO	TECNOLOGÍA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA	USO (m ³ /GWh)	CONSUMO (m ³ /GWh)	PÉRDIDAS EN CONVERSIÓN
Carbón	Carbón importado convencional (Refrigeración seca)	100	0	77%
	Carbón supercrítico importado (Refrigeración por agua corriente)	92600	400	50%
	Carbón supercrítico importado (Refrigeración por torre)	2300	1700	53%
	Carbón supercrítico importado (Refrigeración seca)	0	0	60%
	Carbón supercrítico con CCS, importado (Refrigeración por agua corriente)	114900	600	58%
	Carbón supercrítico con CCS, importado (Refrigeración torre)	2900	2800	61%
	Carbón supercrítico con CCS, importado (Refrigeración seca)	0	0	68%
Ciclo combinado	Ciclo combinado con gasificación de carbón importado (Refrigeración por agua corriente)	59500	800	48%
	Ciclo combinado con gasificación de carbón importado (Refrigeración por torre)	1500	1300	51%
	Ciclo combinado con gasificación de carbón importado (Refrigeración seca)	0	0	58%
	Ciclo combinado de gas convencional (Refrigeración por agua corriente)	39700	400	36%
	Ciclo combinado de gas convencional (Refrigeración por torre)	1000	700	39%
	Ciclo combinado de gas convencional (Refrigeración seca)	0	0	46%
	Ciclo combinado de gas con CCS (Refrigeración por agua corriente)	62500	500	46%
	Ciclo combinado de gas con CCS (Refrigeración por torre)	2300	1700	49%
	Ciclo combinado de gas con CCS (Refrigeración seca)	0	0	56%
Turbina de gas	Turbina de gas en ciclo abierto convencional (Refrigeración por agua corriente)	39700	400	55%
	Turbina de gas en ciclo abierto convencional (Refrigeración por torre)	1000	700	58%
	Turbina de gas en ciclo abierto convencional (Refrigeración seca)	0	0	65%
	Turbina de gas en ciclo abierto con CCS (Refrigeración por agua corriente)	62500	500	65%
	Turbina de gas en ciclo abierto con CCS (Refrigeración por torre)	2300	1700	68%
Turbina de gas	Turbina de gas en ciclo abierto con CCS (Refrigeración seca)	0	0	75%
Fuel oil	Fuel-oil convencional (Refrigeración por agua corriente)	94100	1300	62%
	Fuel-oil convencional (Refrigeración por torre)	2300	2100	65%
	Fuel-oil convencional (Refrigeración seca)	100	0	72%

ÁMBITO	TECNOLOGÍA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA	USO (m ³ /GWh)	CONSUMO (m ³ /GWh)	PÉRDIDAS EN CONVERSIÓN
Hidráulica - bombeo	Hidráulica fluyente	0	0	0%
	Hidráulica con embalse	791700	19600	0%
	Bombeo hidráulico	0	0	0%
	Minihidráulica	0	0	0%
Cogeneración	Cogeneración industrial (Refrigeración por agua corriente)	99900	1400	26%
	Cogeneración industrial (Refrigeración por torre)	2500	2100	29%
	Cogeneración industrial (Refrigeración seca)	100	0	36%
	Cogeneración otros usos (Refrigeración por agua corriente)	99900	1400	27%
	Cogeneración otros usos (Refrigeración por torre)	2500	2100	30%
	Cogeneración otros usos (Refrigeración seca)	100	0	37%
Eólica	Eólica terrestre tipo 1	0	0	0%
	Eólica terrestre tipo 2	0	0	0%
	Eólica terrestre tipo 3	0	0	0%
	Eólica marina	0	0	0%
Solar	Solar fotovoltaica centralizada	0	100	0%
	Solar fotovoltaica distribuida industrial	0	100	0%
	CE Solar fotovoltaica distribuida otros usos	0	100	0%
	Solar termoeléctrica centralizada (Refrigeración por agua corriente)	3600	3500	80%
	Solar termoeléctrica centralizada (Refrigeración por torre)	3000	3000	83%
	Solar termoeléctrica centralizada (Refrigeración seca)	0	100	90%
	Solar térmica distribuida industrial (Refrigeración por agua corriente)	3600	3500	45%
	Solar térmica distribuida industrial (Refrigeración por torre)	3000	3000	48%
	Solar térmica distribuida industrial (Refrigeración seca)	0	100	55%
	Solar térmica distribuida otros usos (Refrigeración por agua corriente)	3600	3500	45%
	Solar	Solar térmica distribuida otros usos (Refrigeración por torre)	3000	3000
Solar térmica distribuida otros usos (Refrigeración seca)		0	100	55%
Biomasa	Biomasa cultivos energéticos centralizada (Refrigeración por agua corriente)	102100	1300	68%
	Biomasa cultivos energéticos centralizada (Refrigeración por agua torre)	2100	1700	71%
	Biomasa cultivos energéticos centralizada (Refrigeración seca)	100	0	78%

ÁMBITO	TECNOLOGÍA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA	USO (m ³ /GWh)	CONSUMO (m ³ /GWh)	PÉRDIDAS EN CONVERSIÓN
	Biomasa residuos agrarios centralizada (Refrigeración por agua corriente)	89000	1000	68%
	Biomasa residuos agrarios centralizada (Refrigeración por torre)	1800	1600	71%
	Biomasa residuos agrarios centralizada (Refrigeración seca)	100	0	78%
	Biomasa residuos forestales centralizada (Refrigeración por agua corriente)	89000	1000	68%
	Biomasa residuos forestales centralizada (Refrigeración por torre)	1800	1600	71%
	Biomasa residuos forestales centralizada (Refrigeración seca)	100	0	78%
Residuos sólidos	Residuos sólidos industriales (Refrigeración por agua corriente)	89000	1000	78%
	Residuos sólidos industriales refrigeración por torre)	1800	1600	81%
	Residuos sólidos industriales refrigeración seca)	100	0	88%
Refinería	Refinería baja complejidad	200	200	5%
	Refinería alta complejidad	200	200	8%
	Refinería muy alta complejidad	300	300	11%
Regasificación	Terminal de regasificación	0	0	0%
Bioetanol	Producción bioetanol	300	1000	50%
	Producción biodiesel	300	600	40%

Tabla 24: Uno de agua y eficiencias de conversión por tecnologías de conversión energética

7.2.1.2. Disponibilidad de agua y capacidad de generación por demarcaciones hidrográficas

Mientras que la Figura 83 muestra las diferentes cuencas presentes en el territorio nacional, la Tabla 25 resume los recursos hídricos disponibles en España según el Plan Hidrológico Nacional.



Figura 83: Cuencas hidrográficas en España

DEMARCACIÓN	AGUA TOTAL	AGUA DISPONIBLE	DEMANDA REGULADA	USO URBANO	USO INDUSTRIAL	USO RIEGO	REFRIGERACIÓN	TOTAL
Galicia Costa	12.250	1.302	1.372	210	53	532	24	819
Miño-Sil	12.689	5.515	4.735	77	32	475	33	617
Cantábrico Occidental	13.881	1.518	2.180	214	280	55	40	589
Cantábrico Oriental	5.337	493	471	269	215	2	0	486
Duero	13.660	7.797	5.253	214	10	3.603	33	3.860
Tago	10.883	6.233	4.587	768	25	1.875	1.397	4.065
Guadiana	4.414	2.592	1.678	119	31	2.157	5	2.312
Guadalquivir	7.794	3.095	1.958	482	80	2.845	0	3.407
Tinto, Odiel y Piedras	1.061	371	188	38	53	128	0	219
Guadalete y Barbate	807	321	203	50	8	295	0	353
Cuencas mediterráneas andaluzas	2.351	1.109	284	248	32	1.070	0	1.350
Segura	803	1.125	519	172	23	1.639	0	1.834
Júcar	3.432	3.052	1.766	563	80	2.284	35	2.962
Ebro	17.967	10.727	10.145	313	415	6.310	3.340	10.378

DEMARCACIÓN	AGUA TOTAL	AGUA DISPONIBLE	DEMANDA REGULADA	USO URBANO	USO INDUSTRIAL	USO RIEGO	REFRIGERACIÓN	TOTAL
Distrito Fluvial de Cataluña	2.787	1.358	615	682	296	371	8	1.357
TOTAL	110.116	46.608	35.954	4.419	1.633	23.641	4.915	34.608

Tabla 25: Recursos hídricos disponibles por demarcación hidrográfica, en hm³ (Ministerio de Medio Ambiente, 2005)

En el estudio de la Fundación Canal (2014), se consideran disponibilidades y demandas hídricas fijas para el año, y distribuye el agua disponible por cuenca y mes de forma proporcional a la media de la distribución histórica de la escorrentía. La Figura 84 recoge esta información.

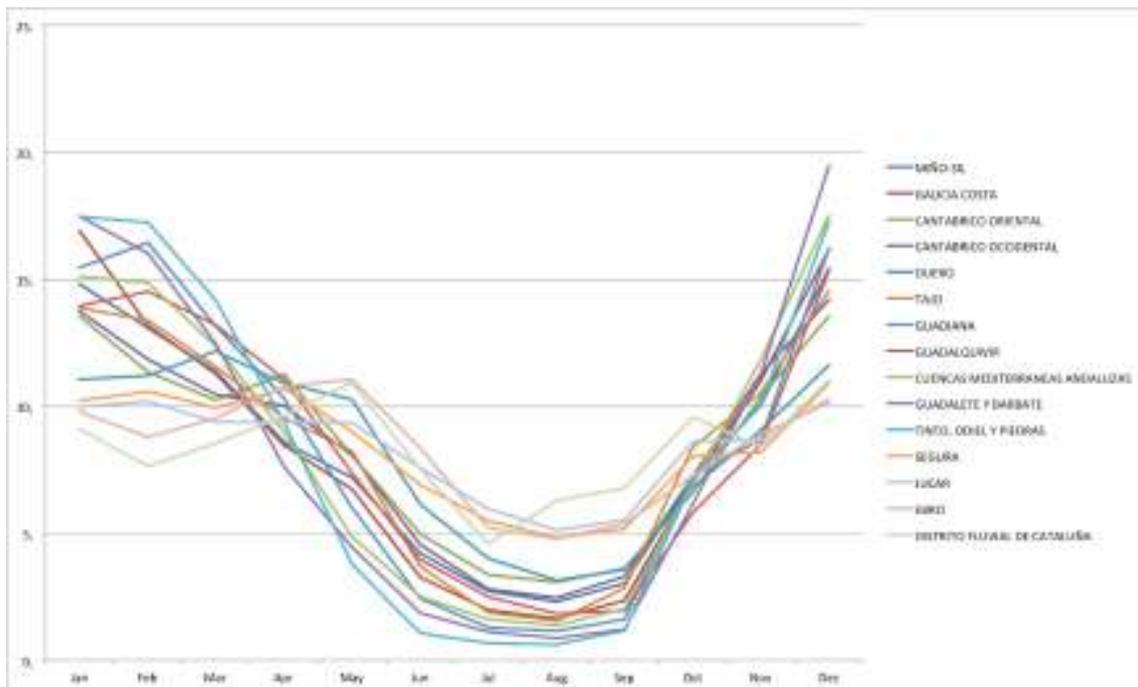


Figura 84: Distribución mensual de la escorrentía (medias de 1940-2008), expresada como % de la escorrentía total

Una vez conocida la disponibilidad de agua por demarcaciones, el siguiente paso es conocer la capacidad de generación por tecnologías en estas mismas demarcaciones hidrográficas, un trabajo que se encuentra desgranado en el Anexo IV. En él podemos observar que son las cuencas de Tago, Ebro y Duero las que cuentan con un mayor potencial de generación eléctrica.

7.2.1.3. Impacto en los usos y consumos de agua por los sistemas energéticos

Para estimar los impactos sobre los sistemas energéticos debido a las modificaciones en los sistemas de agua, el estudio de Fundación Canal (2014) utilizó el modelo “Nexus”, desarrollado en el Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas. Este modelo trabaja con 5 escenarios, uno de ellos a 2012 y el resto a 2050:

- **WC-2012:** utiliza la disponibilidad de agua actual, y por tanto supone que el resto de las demandas no varían (lo que, entre otras cosas, representa una estabilización de la población española). Es el escenario de referencia (REF).
- **WC1na:** escenario medio de cambio climático, sin adaptación.

- **WC1ca:** escenario medio de cambio climático, con adaptación.
- **WC2na:** escenario severo de cambio climático, sin adaptación.
- **WC2ca:** escenario severo de cambio climático, con adaptación.

El escenario 1 de cambio climático corresponde al escenario A2i, CGCM2-FIC del estudio del CEDEX, mientras que el escenario 2 corresponde al escenario A2ii, ECHAM4-FIC. El primer término (A2i o A2ii) se refiere al escenario original de cambio climático procedente del IPCC, y el segundo (CGCM2-FIC o ECHAM4-FIC) en función del modelo de circulación general de la atmósfera empleado para generar los resultados.

Por otro lado, los escenarios *na* consideran que no hay adaptación. Esta circunstancia se modela en el Nexus fijando la capacidad energética determinada por el modelo para el escenario WC2012. En cambio, en los escenarios con adaptación (*ca*) se permite que el modelo realice las inversiones necesarias (con respecto al WC2012) para adaptarse a una menor disponibilidad de agua.

A continuación se muestran los consumos y usos de agua asociados con la energía centrándonos en los escenarios sin adaptación del trabajo de Fundación Canal (2014), pues son estos los que nos dibujan los impactos esperados que una política de adaptación habría de evitar.

La Tabla 25 muestra el total del recurso natural disponible en España, así como los usos y consumos totales, como referencia. A continuación muestra el total de agua disponible para el sector energético, una vez que se han satisfecho los consumos más prioritarios, para cada escenario de cambio climático. Posteriormente se detallan los usos y consumos para la obtención de energía primaria y para su conversión en energía final (en centrales eléctricas, regasificadoras y plantas de refino de petróleo).

Evidentemente, el uso total está condicionado por el escenario de cambio climático. El escenario WC2, el más drástico, muestra unos consumos de agua menores por la menor disponibilidad. En todos los escenarios se reduce el uso de agua para la energía comparado con el escenario de referencia, y también con el escenario de disponibilidad hídrica actual.

	REF	WC-2012	WC1na	WC2na
Total de recurso natural disponible	110.116	110.116	99.934	70.985
Total de recurso natural disponible para energía	Ilimitada	19.699	17.247	12.651
Consumo de agua para Energía Primaria	1.413	1.383	1.413	1.413
Uso de agua para Energía Primaria	1.186	1.147	1.178	1.188
Consumo de agua para Conversión Energética	920	744	708	651
Uso de agua para Conversión Energética	39.379	38.569	37.123	33.788
Consumo de agua total para energía	2.332	2.284	2.279	2.199
Uso de agua total para energía	40.565	39.716	38.301	34.975

Tabla 26: Usos y consumos de agua (en hm³)

Los resultados del impacto del cambio climático en la disponibilidad y el uso de agua para fines energéticos, desagregados por demarcaciones hidrográficas para el escenario con estrés hídrico (WC2na) comparado con el de referencia (sin límite), se observa en la Figura 85. La principal lectura

que se puede hacer de esta gráfica es que hay cuatro demarcaciones hidrográficas (Guadalquivir, Guadalete, Sur y Segura) que, en el escenario con restricciones debidas al estrés hídrico fruto del cambio climático, carecen de agua para usos energéticos, trasladando por tanto ese impacto al sistema eléctrico.

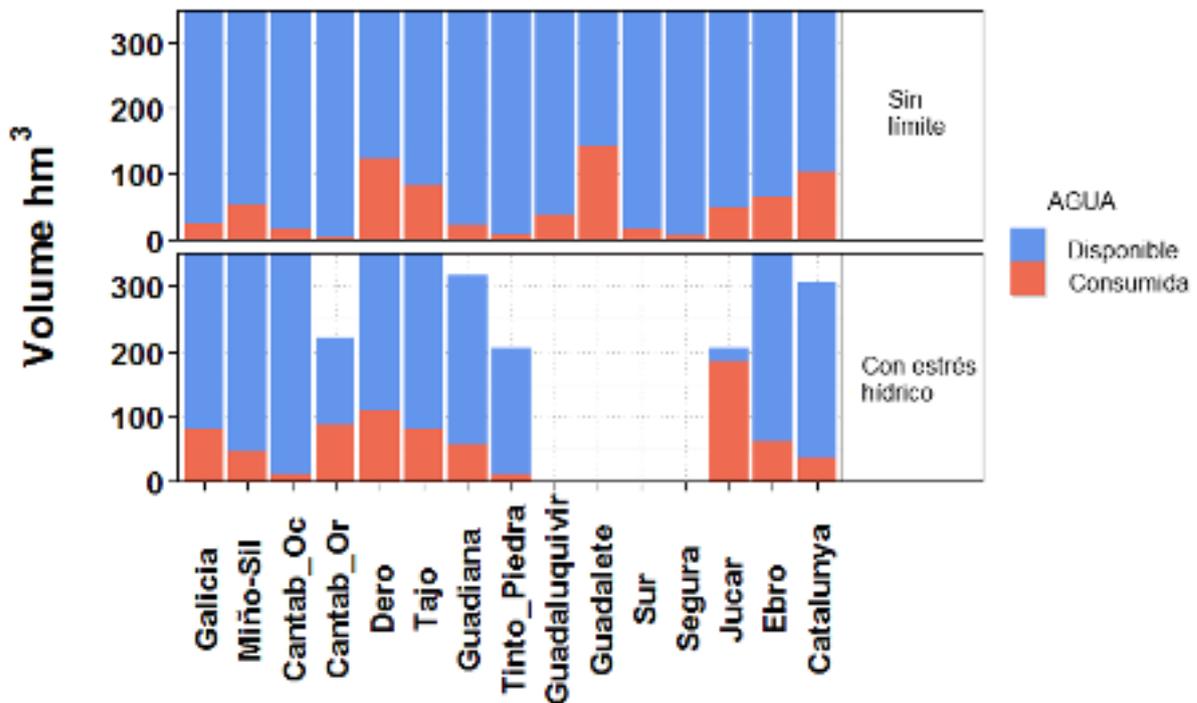


Figura 85: Impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua para energía por cuencas

Con respecto al impacto en los consumos energéticos que se obtiene en el trabajo de la Fundación Canal (2014), la Tabla 27 recoge las principales tendencias.

	REF	WC-2012	WC1na	WC2na
Electricidad generada	1,49	1,46	1,45	1,43
Electricidad renovable	0,77	0,74	0,73	0,71
Energía final total	5,63	5,64	5,64	5,62
Energía domestica	1,89	1,83	1,83	1,78
Dependencia energética (%)	74,84	75,43	75,39	75,89
Pérdidas en generación	1,71	1,65	1,65	1,63
Pérdidas en transporte	0,15	0,15	0,14	0,14

Tabla 27: Demandas y consumos energéticos (en EJ)

Se puede observar cómo en el escenario de cambio climático drástico sin adaptación se reduce el total de energía del sistema, ya que, como se explica en el informe, el modelo opta por soluciones de eficiencia energética antes que por asumir costes de adaptación que tienen que ver con el uso de

tecnologías que incorporan la variable adaptación en su diseño e implementación. Dicho de otra forma, la eficiencia energética es más barata para el sistema que las nuevas inversiones requeridas.

En este estudio no se han tenido en cuenta algunas interrelaciones del sistema, como son los posibles cambios en el coeficiente de aprovechamiento en función de los usos alternativos, por ejemplo en los cambios en los caudales ecológicos. Tampoco se ha tenido en cuenta el posible cambio en el aterramiento de los embalses debido a un aumento de las precipitaciones extremas, lo que tendría a su vez un reflejo en la disponibilidad del recurso agua.

Es importante dejar claro que estos interesantes resultados provenientes del informe de la Fundación Canal (2014) se centran solo en analizar los impactos del cambio climático en el sector energético debido a los cambios en la disponibilidad y los usos del agua. Para obtener una imagen completa del impacto total del cambio climático en el sistema energético español sería necesario emplear un modelo que recogiera todas las posibles influencias, no solo la debida al agua. Hasta la fecha, ese trabajo no ha sido realizado.

7.2.2. Impactos en la producción renovable

Aunque el impacto más significativo del cambio climático en nuestro país vendría por el lado de los nexos agua-energía, como se comentó anteriormente, también existen otros impactos principalmente relacionados con la modificación en el potencial eólico y solar que podría ser más significativo si la senda de implantación de potencia eléctrica renovable en las próximas décadas sigue la tendencia creciente presente en la mayoría de países de nuestro entorno.

7.2.2.1. Impactos en la producción fotovoltaica

Uno de los estudios de referencia en este campo fue el desarrollado por Crook et al. (2011), basándose en el escenario A1B del AR4. Se trata de un estudio internacional pero que tuvo una particularización para nuestro país. La Figura 86 presenta la variación en la potencia fotovoltaica en España según dos modelos de trabajo (HadGEM1 y HadCM3).

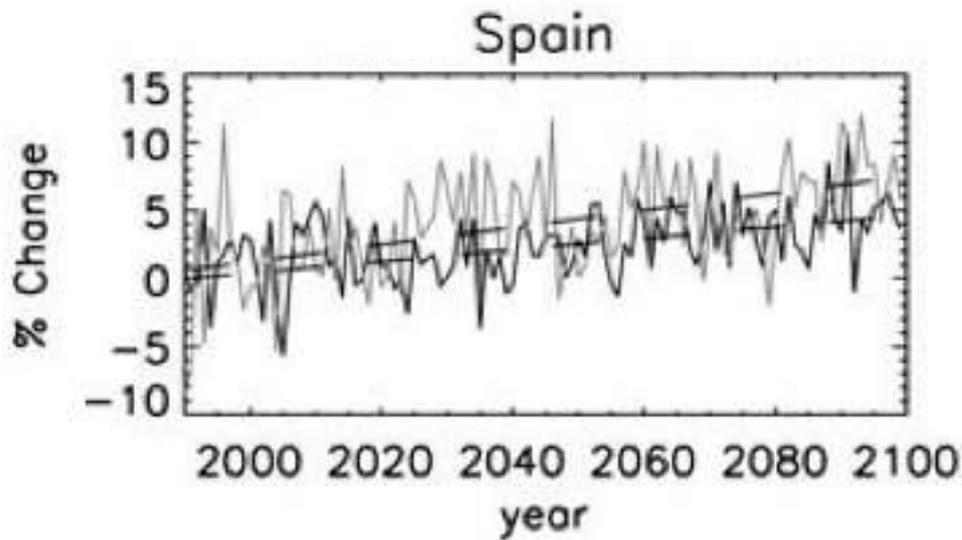


Figura 86: Cambio en la generación fotovoltaica en España (2000-2100). Escenario A1B.

Si observamos las rectas de regresión que marcan las tendencias de ambos modelos de trabajo, el impacto es bajo, apenas supera el 5% en los albores de final de siglo. Estos resultados se explican por la evolución de dos factores: temperatura e irradiancia. Mientras que un aumento de la temperatura disminuye la eficiencia de los paneles, una mejora de la irradiancia (debido principalmente a la reducción media de la cubierta de nubes) la aumenta.

Estos datos se han visto complementados por el trabajo más reciente de Wild et al. (2015) cuyas estimaciones, sobre el escenario RCP8.5 presentamos en la Figura 87.

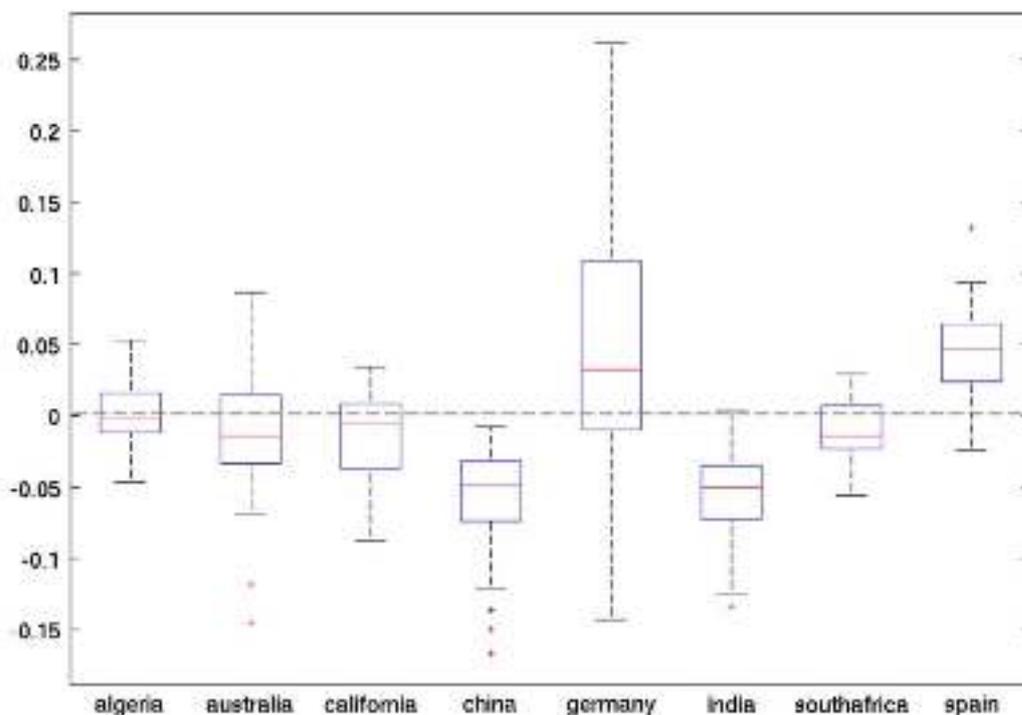


Figura 87: Cambios esperados en el potencial fotovoltaico en el periodo 2006-2049 en relación a la media del periodo 2006-2015. RCP8.5

En el margen derecho de la imagen encontramos a España, que presenta un escueto potencial de incremento en la generación fotovoltaica centrado en el 5% para el periodo de estudio.

7.2.2.2. Impactos en el potencial eólico

El trabajo más relevante en este aspecto es el de Santos et al. (2014), basado en el escenario A1B, para la Península Ibérica. La Figura 88 muestra los resultados más destacados.

	DJF	MAM	JJA	SON
1. Northern Galicia	-0.31 (-0.54)	-1.29 (-1.16)	0.41 (0.41)	-1.00 (-0.61)
2. Burgos	-0.02 (-0.97)	-1.19 (-1.32)	0.21 (0.19)	-0.55 (-0.63)
3. Ebro valley	-0.13 (-0.49)	0.79 (0.72)	1.47 (1.34)	0.56 (0.34)
4. Northern Portugal	-0.76 (-0.96)	-0.81 (-1.28)	-0.61 (-0.32)	-0.88 (-0.82)
5. Southern Cataluña	-1.46 (-1.42)	0.76 (0.06)	-0.11 (-0.34)	-0.94 (-1.31)
6. Oeste	-0.51 (-1.02)	-0.90 (-0.60)	0.26 (0.00)	-0.66 (-0.58)
7. Albacete	-0.56 (-1.16)	-1.02 (-0.83)	0.47 (0.63)	-0.51 (-0.61)
8. Southern Andalucía	3.05 (2.14)	1.38 (1.07)	1.78 (1.14)	3.60 (3.06)

Figura 88: Cambios esperados en el potencial eólico de la Península Ibérica (MWh/día) en el periodo 2041-2070. Santos et al. (2014). Escenario A1B.

Las proyecciones del cambio climático presentan una disminución significativa en la mayor parte de la Península Ibérica (<2 MWh / día). Aunque lo más destacable quizás sea el fuerte aumento de los potenciales en otoño en el sur de Andalucía (> 2 MWh / día). Esto se traduciría en una reducción

media del potencial eólico en la Península en el periodo considerado del 15%, llegando incluso a un 40% en invierno.

Es importante incidir en este punto sobre la necesidad de tomar estos resultados con prudencia, pues pueden cambiar mucho si el análisis se realiza teniendo en cuenta las distribuciones de viento en lugar de las velocidades medias. Este ejercicio es uno de los temas pendientes a abordar en el futuro.

7.3. Impactos en la demanda de energía

Nos centramos, tal y como hicimos en capítulos anteriores, en el efecto principal del cambio climático sobre la demanda energética, a saber, los cambios en las necesidades de calefacción y refrigeración debidos al esperado aumento de temperatura.

Ya el informe “Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático” elaborado para el Ministerio de Medio Ambiente en 2005 con el que abrimos esta sección, atendía dentro de la sección dedicada al sector energético a este tema. Suya es la autoría de la Figura 89.

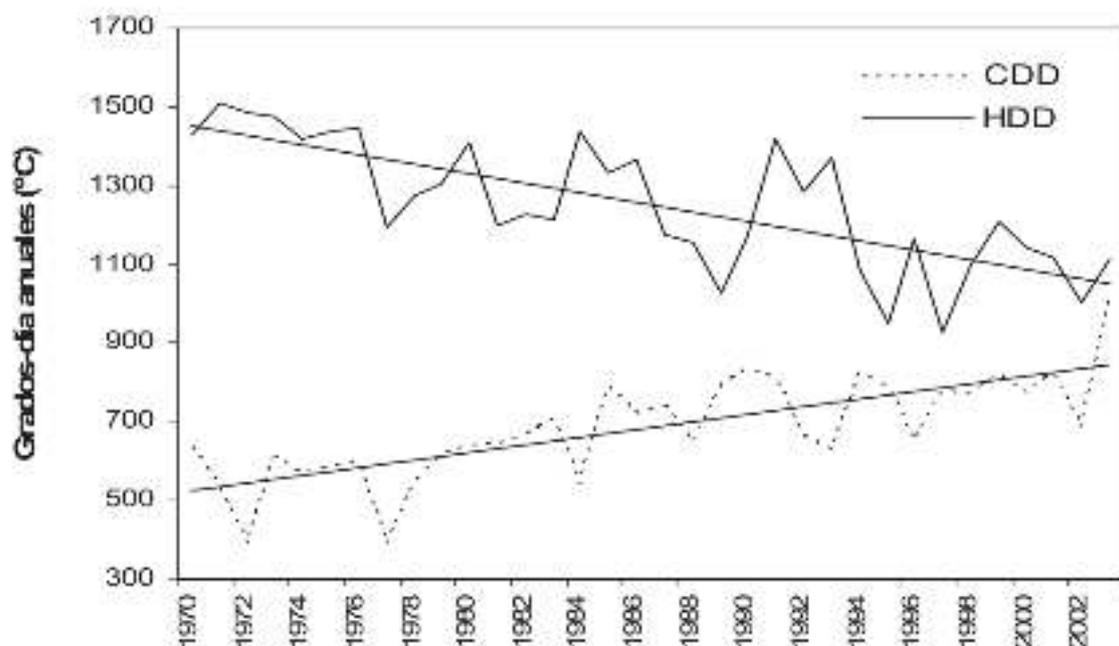


Figura 89: Evolución de los HDD y CDD en España en el periodo 1970-2002. Ministerio de Medio Ambiente (2005)

La figura presenta una clara tendencia decreciente de los grados día de calefacción anuales y asimismo una clara tendencia creciente de los grados día de refrigeración, ambas consecuencia de una elevación progresiva de la temperatura media en las tres décadas del estudio.

Estos datos se vieron confirmados por OrtizBeviá et al. (2012). En este trabajo se investigó la evolución de las necesidades de calefacción y refrigeración (HDD y CDD) en el caso de España en el periodo 1958-2005, y se plantearon proyecciones al medio plazo. La variabilidad observada se obtuvo de los registros de temperatura en 31 estaciones de toda España y de los datos de los censos

disponibles. Respecto a la evolución futura de los grados-día, estos se estimaron con cuatro simulaciones realizadas sobre el escenario A1B del AR4, para el período 2001-2050. Las tendencias encontradas para las necesidades de calefacción (grados-día) en invierno no fueron muy significativas. Sin embargo, las tendencias observadas para las necesidades de refrigeración en verano sí lo fueron.

Model	(1950–1989)	(2010–2049)
INGV	(5.49% ± 3.2%)	(10.61% ± 4.9%)
IPSL	(1.07% ± 8.1%)	(27.68% ± 6.4%)
MPIM	(7.25% ± 7.2%)	(12.07% ± 4.0%)
MeteoFrance	(9.42% ± 7.2%)	(16.47% ± 6.7%)
Observed	(4.92% ± 2.9%)	

Figura 90: Aumento de los grados día de refrigeración (CDD/década) en España según diferentes modelos. Escenario A1B.

En la Figura 90 se presentan los resultados del estudio en lo que a aumento de CDD en España se refiere. Las proyecciones medias de aumento de los CDD/década se sitúan en 14% +/- 5,3%, un aumento muy considerable que habría que trasladar a demanda efectiva de servicios finales de refrigeración para estimar el impacto real.

8. Propuestas de adaptación para el sector energético español

Finalmente, en este apartado se recogen algunas propuestas de medidas concretas de adaptación aplicables al sector energético español. Muchas de ellas fueron presentadas en el seminario con expertos que tuvo lugar en el contexto de la elaboración del presente informe.

En esta consulta con expertos, uno de los puntos en el que se vio necesario profundizar fue el relacionado con la investigación. Se consideró de vital importancia profundizar en el conocimiento de las dinámicas de cambio climático que permitieran mejorar la planificación por parte de los agentes del sistema energético. Algunos de los puntos que se percibieron como claves en las que profundizar se han organizado siguiendo la propuesta de marco de opciones de adaptación propuesta por el IPCC que se introdujo en la Tabla 28.

Adicionalmente a estas aportaciones de los expertos, en el Anexo V se incluyen unas tablas que resumen los contenidos del informe.

Categorías de adaptación		Medidas para el sector energético español
Estructurales	Información	<ol style="list-style-type: none"> 1) Afinar las estadísticas de viento proporcionando los cambios esperados no solo en las velocidades medias a una determinada elevación sino también las distribuciones, para de esta manera poder estimar mejor los cambios en los potenciales eólicos. Sería ideal particularizar este estudio, en la medida de lo posible, también por áreas geográficas en función de su potencial energético eólico. 2) De la misma manera que con el viento, sería muy provechoso estudiar los otros parámetros climáticos básicos: temperatura y régimen de lluvias, no solo en términos agregados sino en términos de distribución temporal y regional. Esto permitiría a su vez afinar en el estudio del impacto directo sobre la oferta y demanda energética. Tanto en este punto como el anterior, existen algunos trabajos ya realizados por parte de diferentes empresas energéticas (Endesa, Iberdrola, Gas Natural, Repsol, entre otras), que pueden servir de base para futuros trabajos. 3) Elaborar un histórico detallado de fenómenos extremos que permita proyectar, con una correcta base estadística, implicaciones a futuro. Sería positivo disponer de una base de datos, con criterios comunes, que incluya un histórico lo más amplio posible. Del análisis de esta información deberían alimentarse tanto en la Planificación Energética como las Especificaciones o Normas Técnicas constructivas del sector.
	Tecnología	<ol style="list-style-type: none"> 4) Desarrollar un análisis basado en modelos computacionales del impacto del cambio sobre el sistema energético nacional en su conjunto. En la actualidad existen algunos resultados para el nexo agua-energía que podrían servir de base para un estudio que integrara el resto de subsectores energéticos. 5) Hacer estimaciones por escenarios (tendenciales y disruptivos) para la demanda de calefacción y de refrigeración, mediante estudios <i>what-if</i>. 6) Realizar un análisis de los HDD y los CDD ponderados por población, incorporando además factores como la humedad que influyen de una manera muy relevante en la sensación térmica. Recoger también en estos análisis el impacto en la demanda de calefacción y refrigeración en la industria y en el tercer sector.
	Basadas en ecosistemas	<ol style="list-style-type: none"> 7) Prestar una especial atención a los impactos derivados de la subida del nivel del mar sobre todas las infraestructuras energéticas operativas en la costa española. Del mismo modo, incorporar estas consideraciones en el estudio de viabilidad de nuevas infraestructuras a construir en dichas zonas. En este

Categorías de adaptación		Medidas para el sector energético español
		punto, serán de mucha ayuda los resultados del proyecto C3E que elaboró la Universidad de Cantabria para la OECC en 2012.
Estructurales - físicas	Nexos	8) Profundizar en el análisis de las interrelaciones entre los sistemas energético y agropecuario, con especial atención a los biocombustibles y sus necesidades de agua.
Sociales	Información	9) Diseñar una política de comunicación y difusión de estos resultados que consiga trasladar eficazmente al conjunto de la sociedad la importancia y urgencia de abordar esta problemática de manera integrada.
	Comportamiento	10) Fomentar una cultura empresarial nueva que prime el largo plazo frente al corto plazo en su planificación estratégica.
	Economía	11) Sería conveniente realizar estudios económicos más precisos en relación a las necesidades de financiación futuras vinculadas a las políticas de adaptación, tanto desde el sector público como privado. La pregunta a responder en este punto sería cuáles son los costes reales de la adaptación.
Institucionales	Leyes y regulaciones	12) Facilitar una planificación estratégica conjunta, tanto a nivel público como privado, de los ámbitos energético y climático. 13) Incorporar los riesgos regulatorios y de precios de CO2 en la planificación de la adaptación de cambio climático en el sector.
	Políticas y programas gubernamentales	14) Estudiar en profundidad las sinergias entre mitigación y adaptación: Para ello se propuso plantear el trabajo basado en escenarios base (2012) y futuros (2050 y 2100). Se consideró importante valorar en términos económicos el ahorro que en las políticas de adaptación pueden tener determinadas políticas de mitigación. 15) Continuar con el trabajo de integración de las conclusiones obtenidas en los diferentes estudios de Adaptación en Cambio Climático que identifique las sinergias existentes entre ellos. Este punto fue identificado como uno de los más importantes por parte de los expertos consultados. Quedó patente la conveniencia de plantear un trabajo intersectorial sobre adaptación al cambio climático que integre los

Categorías de adaptación	Medidas para el sector energético español
	resultados parciales que ya se han obtenido y que ayude con ello a adecuar la Planificación Energética pública y privada a los requerimientos detectados.

Tabla 28: Propuestas de medidas de adaptación al cambio climático del sector energético español

Bibliografía

AEMET (2009). Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España.

AEMET (2015). Escenarios-PNACC Datos mensuales. Guía de Usuario.

Agrawala, S., Fankhauser, S., Organisation for Economic Co-operation and Development, SourceOECD (Online service) (Eds.), 2008. Economic aspects of adaptation to climate change: costs, benefits and policy instruments. OECD, Paris.

Agrawala, S., Raksakulthai, V., van Aalst, M., Larsen, P., Smith, J., Reynolds, J., 2003. Development and climate change in Nepal: focus on water resources and hydropower. Organisation for Economic Co-operation and Development.

Alcamo, J., Flörke, M., Märker, M., 2007. *Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes*. Hydrol. Sci. J. 52, 247–275. doi:10.1623/hysj.52.2.247

Arnell, N.W., 2004. *Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios*. Glob. Environ. Change 14, 31–52. doi:10.1016/j.gloenvcha.2003.10.006

Arnell, N.W., 2003. *Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: a global perspective*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 619–641.

Banco Asiático de Desarrollo, 2012. *Climate risk and adaptation in the electric power sector*. Asian Development Bank, Mandaluyong City, Metro Manila, Philippines.

Blesgraaf, R., Geilvoet, A., van der Hout, C., Smoorenburg, M., Sotthewes, W., 2006. *Salinity in the Casamance estuary. Occurrence and consequences*. Delft University of Technology.

Breslow, P.B., Sailor, D.J., 2002. *Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States*. Renew. ENergy 27, 585–598.

Burkett, V., 2011. *Global climate change implications for coastal and offshore oil and gas development*. Energy Policy 39, 7719–7725. doi:10.1016/j.enpol.2011.09.016

California Climate Change Center, 2006. *Climate change impacts on high-elevation hydropower generation in California's Sierra Nevada: a case study in the upper American river*.

Causes of Drought: What's the Climate Connection? [WWW Document], n.d. . Union Concerned Sci. URL http://www.ucsusa.org/global_warming/science_and_impacts/impacts/causes-of-drought-climate-change-connection.html (accessed 3.18.15).

CEDEX (2010). "Evaluación del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural". Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al CEDEX para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Clave CEDEX 42-407-1-001.

CEDEX (2012). "Efecto del cambio climático en los recursos hídricos disponibles en los sistemas de explotación". Encomienda de Gestión de la Dirección General del Agua (MARM) al CEDEX para el estudio del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Clave CEDEX 43-308-5-001.

Ciscar, J.-C., Soria, A., Goodess, C.M., Christensen, O.B., Iglesias, A., Garrote, L., Moneo, M., Quiroga, S., Feyen, L., Dankers, R., Nicholls, R., Richards, J., Bosello, F., Roson, R., Amelung, B., Moreno, A., Watkiss, P., Hunt, A., Pye, S., Horrocks, L., Szabó, L., van Regemorter, D., 2009. *Climate change impacts in Europe. Final report of the PESETA research project*. Publications Office of the European Union, Luxemburg.

Commission of the European Community, 2009a. White paper. *Adapting to climate change: towards a European framework for action*.

Commission of the European Community, 2009b. *Impact assessment accompanying the White Paper. adapting to climate change: towards a European framework for action*.

Crook, J. A., Jones, L. A., Forster, P. M., & Crook, R. (2011). *Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output*. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3101-3109.

Dalziell, E.P., McManus, S.T., 2004. Resilience, vulnerability, and adaptive capacity: implications for system performance.

De Lucena, A.F.P., Szklo, A.S., Schaeffer, R., 2009a. *Renewable energy in an unpredictable and changing climate*. *Mod. Energy Rev.* 1.

De Lucena, A.F.P., Szklo, A.S., Schaeffer, R., de Souza, R.R., Borba, B.S.M.C., da Costa, I.V.L., Júnior, A.O.P., da Cunha, S.H.F., 2009b. *The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil*. *Energy Policy* 37, 879–889. doi:10.1016/j.enpol.2008.10.029

Desalination Plant [WWW Document], n.d. . Carlsbad Desalination Proj. URL <http://carlsbaddesal.com/desalination-plant> (accessed 3.24.15).

Drought could shut down nuclear power plants [WWW Document], n.d. . msnbc.com. URL <http://www.nbcnews.com/id/22804065/ns/weather/t/drought-could-shut-down-nuclear-power-plants/> (accessed 3.27.15).

Durmayaz, A., Sogut, O. S., 2006. Influence of cooling water temperature on the efficiency of a pressurized-water reactor nuclear-power plant. *International Journal of Energy Research*, 30(10), 799-810.

Ebinger, J.O., World Bank, 2011. *Climate impacts on energy systems: key issues for energy sector adaptation*, a World Bank study. World Bank, Washington, D.C.

Emission Scenarios | WMO [WWW Document], n.d. URL http://www.wmo.int/pages/themes/climate/emission_scenarios.php (accessed 3.9.15).

Endesa, 2013. La gestión del cambio climático. Informe de adaptación.

European Commission, 2009a. White paper. Adapting to climate change: towards a European framework for action.

European Commission, 2009b. Impact assessment accompanying the White Paper. adapting to climate change: towards a European framework for action.

European Council, 2014. EUCO 169/14.

European Environment Agency, 2005. *Vulnerability and adaptation to climate change in Europe*. European Environment Agency, Copenhagen.

Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), 2010. *Climate-Smart Agriculture: Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation*.

Feeley, T.J., Skone, T.J., Stiegel, G.J., McNemar, A., Nemeth, M., Schimmoller, B., Murphy, J.T., Manfredo, L., 2008. *Water: A critical resource in the thermoelectric power industry*. *Energy* 33, 1–11. doi:10.1016/j.energy.2007.08.007

Fidje, A., Martinsen, T., 2006. *Effects of the climate change on the utilization of solar cells in the Nordic region*. Reykjavik, Iceland.

Füssel, H. M. (2005). *Vulnerability in climate change research: A comprehensive conceptual framework*.

Hamlet, A.F., Lee, S.-Y., Mickelson, K.E.B., Elsner, M.M., 2010. *Effects of projected climate change on energy supply and demand in the Pacific Northwest and Washington State*. *Clim. Change* 102, 103–128. doi:10.1007/s10584-010-9857-y

Hamududu, B., Killingtveit, A., 2012. *Assessing Climate Change Impacts on Global Hydropower*. *Energies* 5, 305–322. doi:10.3390/en5020305

Harrison, G.P., Wallace, A.R., 2005. *Climate sensitivity of marine energy*. *Renew. Energy* 30, 1801–1817. doi:10.1016/j.renene.2004.12.006

IDDR, 2009. *The future of the Mediterranean: From impacts of climate change to adaptation issues*.

IEA, 2012. *World Energy Outlook 2012*, World Energy Outlook. OECD Publishing.

Intergovernmental Panel on Climate Change, Edenhofer, O., Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, 2015. *Climate change 2014: mitigation of climate change : Working Group III contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, 2000. *Emissions scenarios. A special report of IPCC Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change*, [Geneva].

IPCC, 2014. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects.*

IPCC (Ed.), 2013. *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, New York.

Isaac, M., van Vuuren, D.P., 2009. *Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change.* Energy Policy 37, 507–521. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.051

Kopytko, N., Perkins, J., 2011. *Climate change, nuclear power, and the adaptation–mitigation dilemma.* Energy Policy 39, 318–333. doi:10.1016/j.enpol.2010.09.046

Linnerud, K., Mideksa, T.K., Eskeland, G.S., 2011. The impact of climate change on nuclear power supply. Energy J. 32.

Mansur, E.T., Mendelsohn, R., Morrison, W., 2005. *A discrete-continuous choice model of climate change impacts on energy.* J. Environ. Econ. Manag. 47.

Mideksa, T.K., Kallbekken, S., 2010. *The impact of climate change on the electricity market: A review.* Energy Policy 38, 3579–3585. doi:10.1016/j.enpol.2010.02.035

Milly, P.C.D., Dunne, K.A., Vecchia, A.V., 2005. *Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate.* Nature 438, 347–350. doi:10.1038/nature04312

Ministerio de Medio Ambiente, 2005. Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Proyecto ECCE. Informe Final

MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, 2014. *2014 Energy and climate outlook.*

Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kairuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J.-F., Manning, M.R., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S.K., Runci, P., Stouffer, R.J., van Vuuren, D.P., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., van Ypersele, J.-P., Zurek, M., 2007. *Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts, and response strategies.* IPCC Expert Meeting Report on New Scenarios.

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. *The next generation of scenarios for climate change research and assessment.* Nature 463, 747–756. doi:10.1038/nature08823

Neumann, J.E., Price, J.C., 2009. *Adapting to Climate Change: The Public Policy Response. Public Infrastructure.*

Observatorio cambio climático Canarias - Souss-Massa-Drâa, 2015. Climatique.

Observatorio de Energía y Sostenibilidad en España (OESE), 2014. Informe basado en Indicadores. Catedra BP de Energía y Sostenibilidad. Universidad Pontificia Comillas.

OECC (2005). Proyecto ECCE: Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático.

OECC (2012). Evidencias del cambio climático y sus efectos en España.

OrtizBeviá, M. J., Sánchez-López, G., Alvarez-García, F. J., & RuizdeElvira, A. (2012). *Evolution of heating and cooling degree-days in Spain: Trends and interannual variability*. *Global and Planetary Change*, 92, 236-247.

Paskal, C., 2009. The vulnerability of energy infrastructure to environmental change.

Patt, A., Pfenninger, S., Lilliestam, J., 2010. Vulnerability of solar energy infrastructure and output to extreme events: climate change implications.

Pereira de Lucena, A.F., Szklo, A.S., Schaeffer, R., Dutra, R.M., 2010. *The vulnerability of wind power to climate change in Brazil*. *Renew. Energy* 35, 904–912. doi:10.1016/j.renene.2009.10.022

Persson, T., Garcia y Garcia, A., Paz, J., Jones, J., Hoogenboom, G., 2009. *Maize ethanol feedstock production and net energy value as affected by climate variability and crop management practices*. *Agric. Syst.* 100, 11–21. doi:10.1016/j.agsy.2008.11.004

Piernavieja Izquierdo, G., 2015. *Round table: Water - Energy nexus in the context of Isolated Electric and Hydraulic Systems*.

Pryor, S.C., Barthelmie, R.J., 2010. *Climate change impacts on wind energy: A review*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 430–437. doi:10.1016/j.rser.2009.07.028

Ruth, M., Lin, A.-C., 2006. *Regional energy demand and adaptations to climate change: Methodology and application to the state of Maryland, USA*. *Energy Policy* 34, 2820–2833. doi:10.1016/j.enpol.2005.04.016

Sailor, D.J., Smith, M., Hart, M., 2008. *Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States*. *Renew. Energy* 33, 2393–2406. doi:10.1016/j.renene.2008.01.007

Santos, J. A., Rochinha, C., Liberato, M. L. R., Reyers, M., & Pinto, J. G. (2015). Projected changes in wind energy potentials over Iberia. *Renewable Energy*, 75, 68-80.

Schaeffer, R., Szklo, A.S., Pereira de Lucena, A.F., Moreira Cesar Borba, B.S., Pupo Nogueira, L.P., Fleming, F.P., Troccoli, A., Harrison, M., Boulahya, M.S., 2012. *Energy sector vulnerability to climate change: A review*. *Energy* 38, 1–12. doi:10.1016/j.energy.2011.11.056

Socio-Economic Data and Scenarios [WWW Document], 2014. URL http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/scenario_overview.html (accessed 3.9.15).

Soito, J.L. da S., Freitas, M.A.V., 2011. Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 3165–3177. doi:10.1016/j.rser.2011.04.006

The National Academy of Sciences, 2010. *Advancing the Science of Climate Change*.

U.S. Global Change Research Program, 2009. *Global climate change impacts in the United States: a state of knowledge report*. Cambridge University Press, Cambridge [England] ; New York.

Wang, H., Chen, Q., 2014. *Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States*. *Energy Build.* 82, 428–436.

Wilbanks, T.J., Bhatt, V., Bilello, D.E., Bull, S.R., Ekmann, J., Horak, W.C., Huang, Y.J., Levine, M.D., Sale, M.J., Schmalzer, D.K., Scott, M.J., 2008. *Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States*.

Wild, M., Folini, D., Henschel, F., Fischer, N., & Müller, B. (2015). *Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems*. *Solar Energy*, 116, 12-24.

Williamson, L.E., Connor, H., Moezzi, M., 2009. Climate-proofing energy systems. HELIO International.

ANEXO I. Cambio climático esperado, sus principales consecuencias y los impactos físicos

Este anexo presenta la aportación del WPI del IPCC al AR5 (IPCC, 2013) acerca de los impactos físicos esperados del cambio climático.

Para el AR5, tal y como se presentó en la sección 2, la comunidad científica identificó a partir de la literatura de revisión por pares un conjunto de cuatro escenarios de emisiones: los RCP. Por otro lado, las proyecciones de tendencias así como la evolución de los indicadores se obtuvieron a partir del CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*), que utilizó las RCP como escenarios de entrada. Por esta razón las diferentes proyecciones que se obtuvieron de la CMIP5 se distinguen unas de otras por referencia a los RCPs de entrada.

Siguiendo el marco general, a continuación se presentan los impactos esperados del cambio climático en la temperatura, las precipitaciones y los eventos extremos tal y como se analizó en el AR5. Para cada elemento se incluye una tabla resumen y a continuación se describe en detalle la misma.

1.1 Cambios esperados en la temperatura

IMPACTO	CORTO PLAZO	LARGO PLAZO	REFERENCIA
TEMPERATURA	Periodo proyectado: 2016-2035 Periodo de referencia: 1986-2005	Periodo proyectado: 2081-2100 Periodo de referencia: 1986-2005	IPCC WGI, 2013
<ul style="list-style-type: none"> ○ Temperatura media global del aire en superficie 	+0.47°C a + 1.00°C (CMIP5 bajo RCP4.5) +0.39°C a +0.87°C (ASK bajo RCP4.5)	+0.3°C a +1.7°C (CMIP5 bajo RCP2.6) +1.1°C a +2.6°C (CMIP5 bajo RCP4.5) +1.4°C a +3.1°C (CMIP5 bajo RCP6.0) +2.6°C a +4.8°C (CMIP5 bajo RCP8.5)	IPCC WGI, 2013
<ul style="list-style-type: none"> ○ Océanos 	Bajo todos los escenarios, se espera un aumento de la temperatura media.	Calentamiento de la superficie (top 100m): +1.0°C (RCP2.6) a +3.0°C (RCP8.5) 1 km profundidad: +0.5°C (RCP2.6) a +1.5°C (RCP8.5)	IPCC WGI, 2013

Tabla 29: Influencia del cambio climático en la temperatura

El aumento de temperatura será un fenómeno generalizado en todas las regiones de la tierra y los océanos durante el siglo XXI. Para ilustrar este hecho, el WGI del IPCC recogió gran cantidad de datos de la literatura. Todas las proyecciones aluden a un período de referencia específico, de los cuales se tienen observaciones precisas. El período en cuestión es el intervalo de 1986 a 2005. Las proyecciones son en relación con dos períodos de tiempo diferentes: corto plazo (2016-2035), y largo plazo (2081 a 2100). Las conclusiones a las que llegó el WGI son las siguientes:

Proyecciones a corto plazo de la temperatura media global del aire en superficie (GMST)

Las proyecciones climáticas están sujetas a varias fuentes de incertidumbre y, aunque el grado de acuerdo entre las proyecciones de CMIP5 proporciona una guía aproximada sobre la probabilidad de un resultado en particular, hay que tener muy en cuenta que la evolución real podría caer fuera del rango abarcado por estos modelos.

En el corto plazo las proyecciones son las siguientes (ver Figura 91):

- + 0,47 ° C a + 1,00 ° C, CMIP5 bajo RCP4.5
- + 0,39 ° C a + 0,87 ° C, CMIP5 bajo RCP4.5 (simulación ASK¹²)

¹² Modelos de ponderación basados en análisis de los errores bajo el supuesto de relación lineal entre ellos.

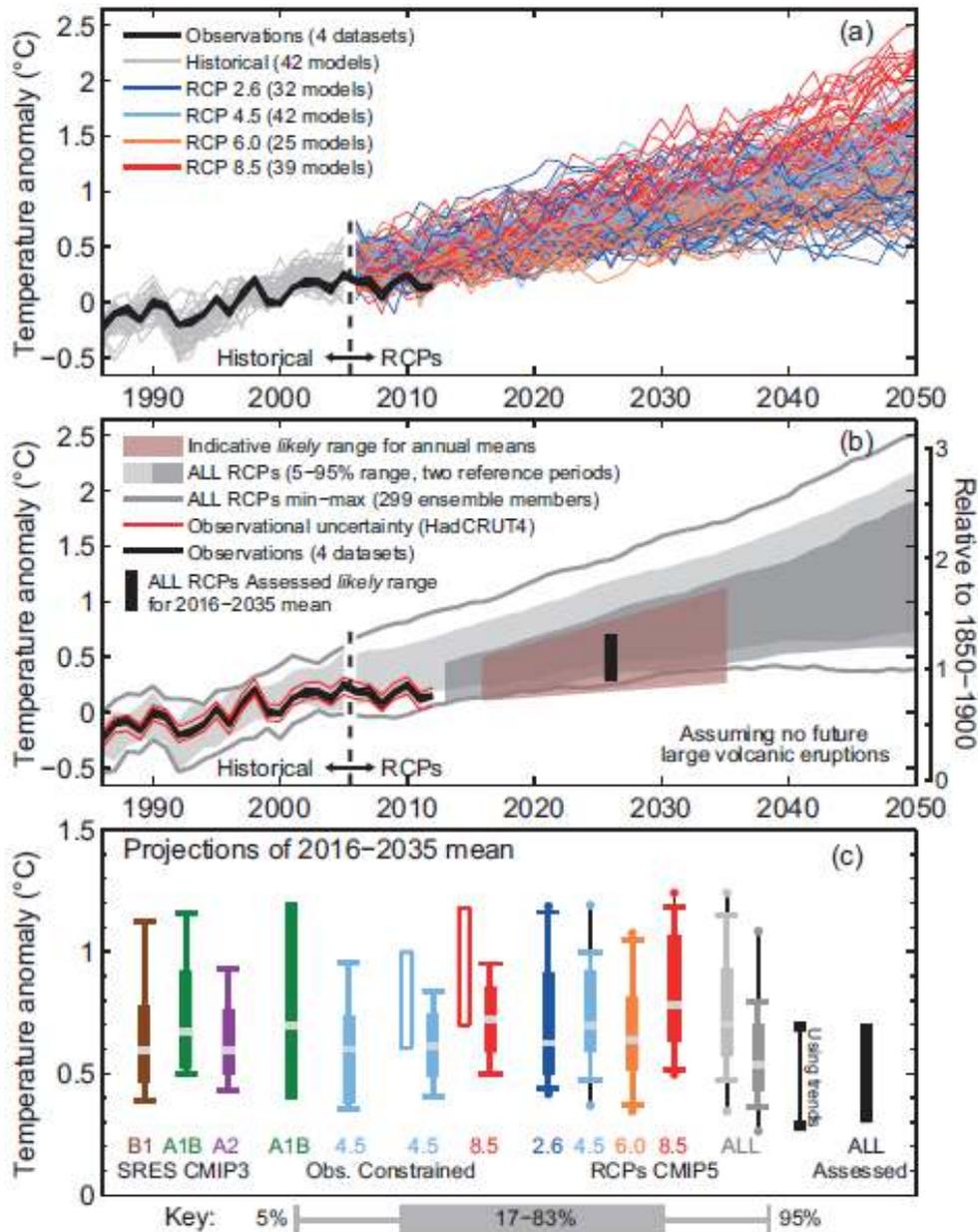


Figura 91: Evolución de la temperatura media global del aire en superficie en el corto plazo

Proyecciones a largo plazo de la temperatura media global del aire en superficie (GMST)

Uno de los resultados más robustos de los modelos climáticos es la coincidencia en las tendencias de calentamiento global en el siglo XXI para todos los escenarios RCP. Los aumentos de temperatura son casi los mismos para todos los escenarios RCP durante las dos primeras décadas a partir de 2005. En escalas de tiempo más largas, la tasa de calentamiento comienza a depender más del RCP específico, siendo más alta para el RCP8.5 y significativamente menor en el RCP2.6, sobre todo a partir de 2050 cuando la respuesta global de la temperatura superficial se estabiliza y comienza a disminuir posteriormente (véase la Figura 92).

- + 0.3 ° C a + 1,7 ° C, CMIP5 bajo RCP2.6
- + 1,1 ° C a + 2,6 ° C, CMIP5 bajo RCP4.5
- + 1.4 ° C a + 3,1 ° C, CMIP5 bajo RCP6.0
- + 2.6 ° C a + 4,8 ° C, CMIP5 bajo RCP8.5

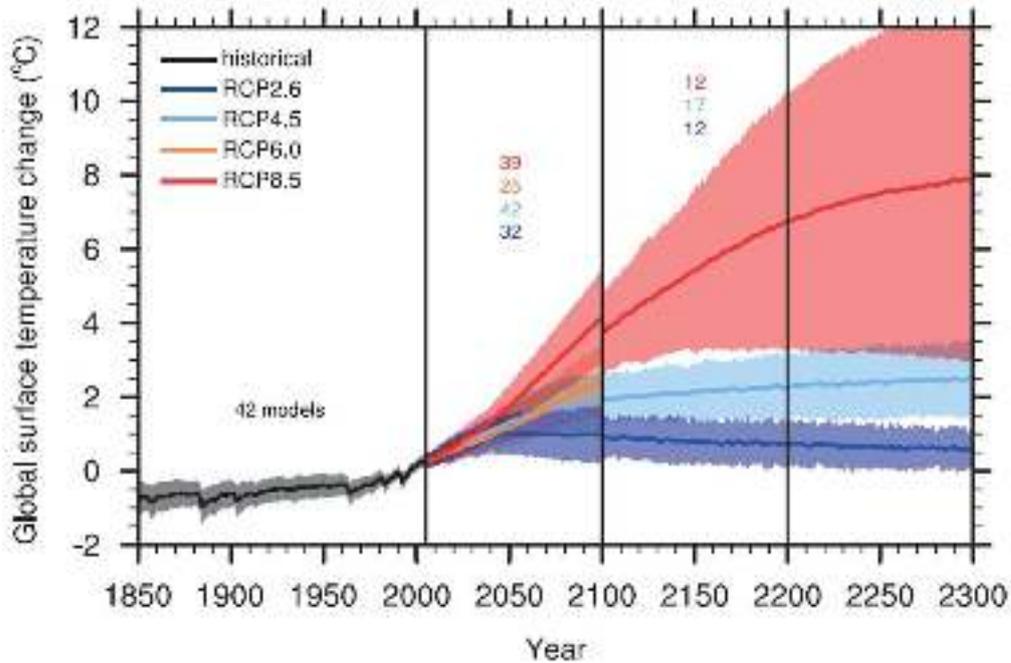


Figura 92: Evolución de la temperatura media global del aire en superficie en el largo plazo

Adicionalmente, la Figura 93 muestra los cambios en las temperaturas medias anuales en diferentes períodos de tiempo en el mundo.

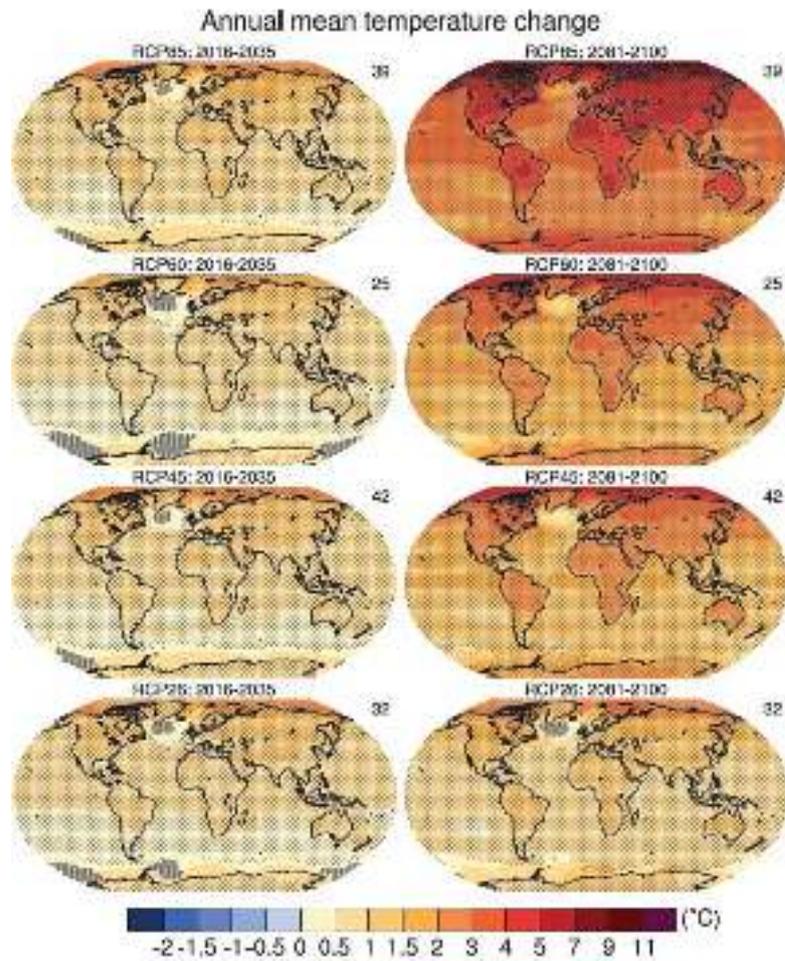


Figura 93: Evolución de las temperaturas en el corto y largo plazo por regiones

Proyección en el corto plazo de la temperatura del océano

La Figura 94 muestra la evolución esperada de la temperatura de la superficie marina en el corto plazo para los diferentes RCPs.

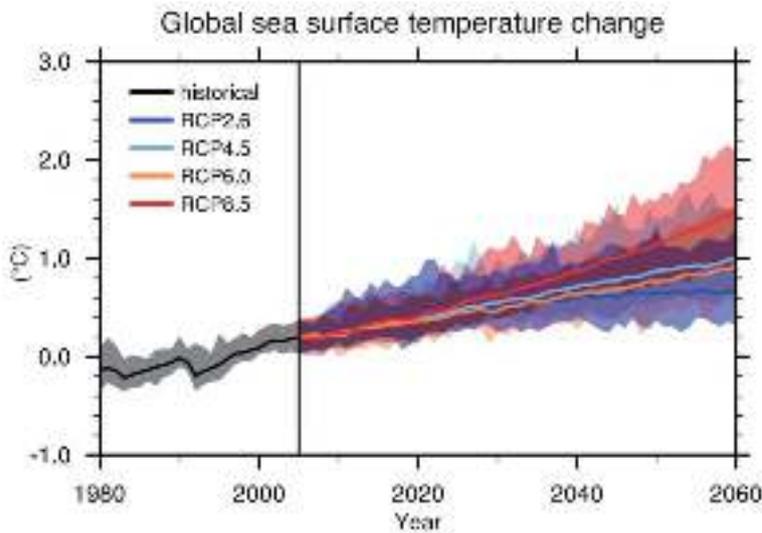


Figura 94: Evolución de la temperatura de la superficie marina en el corto plazo

Por otro lado, la Figura 95 muestra la variabilidad regional de estas proyecciones.

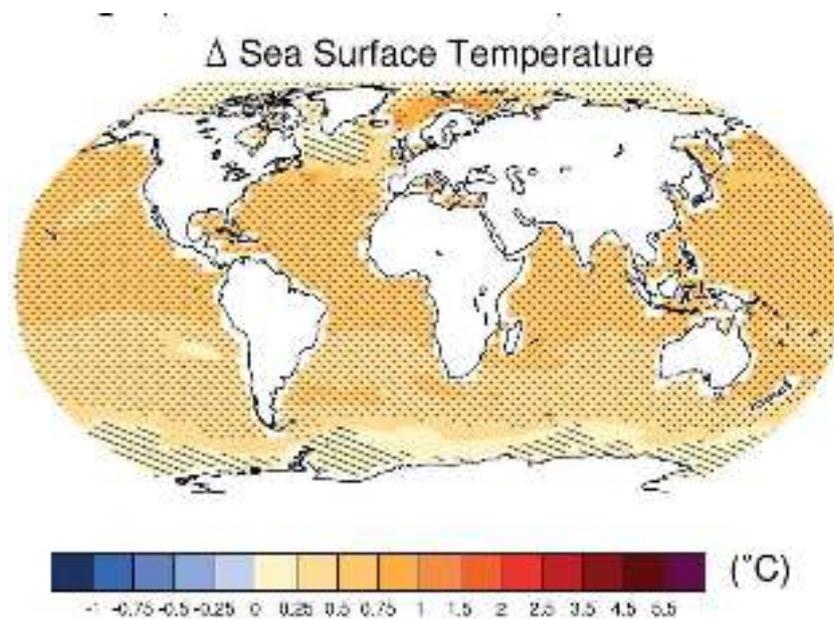


Figura 95: Variación regional de la temperatura de la superficie marina

Proyección a largo plazo de la temperatura del océano

El calentamiento de la superficie varía considerablemente entre los escenarios de emisiones, de aproximadamente 1 ° C (RCP2.6) a más de 3 ° C en RCP8.5.

Dependiendo del escenario de emisiones, el calentamiento del océano profundo oscilará entre 0.5 ° C (RCP2.6) y 1,5 ° C (RCP8.5) a una profundidad de cerca de 1 km para el final del siglo. La señal de calentamiento más fuerte se encuentra en las regiones tropicales y subtropicales.

I.2. Cambios esperados en las precipitaciones

IMPACTO	CORTO PLAZO	LARGO PLAZO	REFERENCIA
PRECIPITACIÓN	Período proyectado: 2016-2035 Período de referencia: 1986-2005 -7% a +22% (CMIP5 bajo RCP4.5) Este rango depende de la latitud	Projections period: 2081-2100 Reference period: 1986-2005 +0.5 a +4%/°C (CMIP5 bajo RCP2.6) +1 a +3%/°C (CMIP5 bajo otros RCPs)	IPCC WGI, 2013

Tabla 30: Impacto del cambio climático en las precipitaciones

Después de la temperatura, la segunda manifestación del cambio climático más evidente es el cambio en el patrón de precipitaciones.

Los cambios a gran escala en las precipitaciones se rigen por procedimientos que se implementan en los escenarios RCP. Las precipitaciones dependen de la disponibilidad de humedad y energía. En un promedio mundial, los océanos proporcionan un suministro ilimitado de humedad, por lo que la formación de la precipitación a escala global queda ligada a la segunda variable: la disponibilidad de energía. Localmente, las precipitaciones sí están limitadas por la disponibilidad de humedad (por ejemplo, en tierra) y el efecto de los sistemas de circulación, aunque estos también están sujetos a restricciones energéticas locales. Tanto la humedad como la disponibilidad de energía pueden ser alteradas por el cambio climático, y en particular por el aumento del forzamiento radiativo causado por un aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero.

En cuanto a las temperaturas, el WPI recolectó datos y suministró proyecciones para los dos períodos diferentes, 2016-2035 y 2081-2100, en relación con el período de referencia 1986-2005:

Cambios a corto plazo en las precipitaciones (2016-2035)

Los dos gráficos de la Figura 96 muestran las proyecciones CMIP5 de los cambios en la precipitación media anual y zonal (a), y la evaporación menos precipitación anual y zonal [mm/día] (b) bajo RCP4.5. A partir de estos gráficos se puede ver claramente que el patrón de precipitación dependerá de la ubicación. La precipitación media muy probablemente se incrementará en algunas de las latitudes medias, y aumentará algo en los subtropicos. A partir del diagrama (a) podemos extraer el rango de los cambios en las precipitaciones a corto plazo, lo cual oscila entre un -7% y un + 22%.

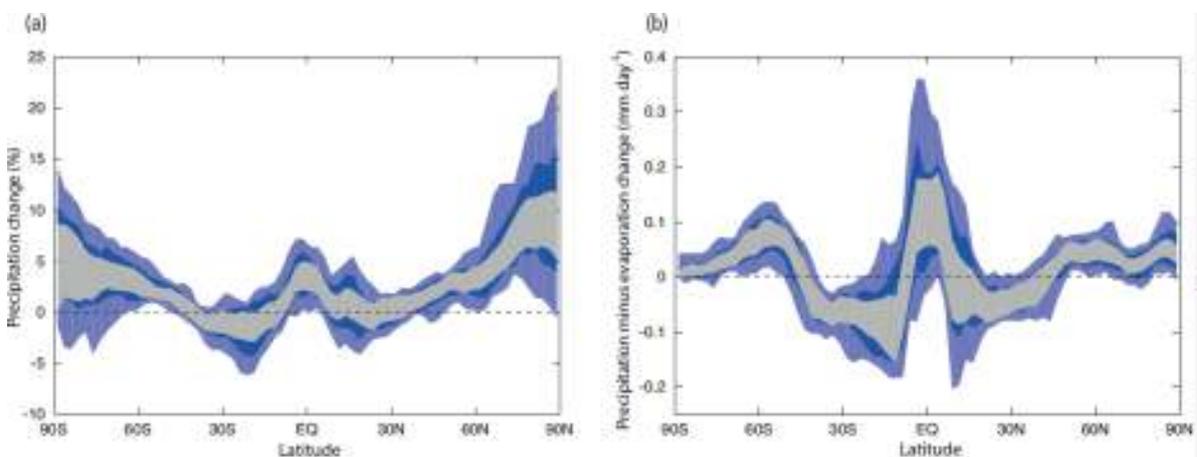


Figura 96: Evolución por latitudes del cambio en las precipitaciones en el corto plazo

Los cambios a largo plazo en la precipitación (2081-2100)

Los cambios de largo plazo en las precipitaciones son impulsados principalmente por el aumento de la temperatura de la superficie. Sin embargo, Los cambios proyectados varían mucho entre los modelos, mucho más que para las proyecciones de temperatura, aunque se hacen más robustos, y la confianza en ellos aumenta, a medida que aumentan las temperaturas.

A escala planetaria, la humedad relativa se prevé que se mantendrá más o menos constante, pero la humedad específica se prevé que aumente debido al calentamiento local. Por esta razón, en el largo plazo, es seguro que la precipitación global se incrementará con el aumento de la GMST. La precipitación media mundial es probable que aumente entre 0,5 y 4% por cada °C para el escenario RCP2.6 al final del siglo XXI. La gama de sensibilidades en CMIP5 para otros escenarios RCP es de 1 a 3% por cada °C. La Figura 97 muestra los mapas de resultados de múltiples modelos para los distintos RCPs en el periodo 2081-2100.

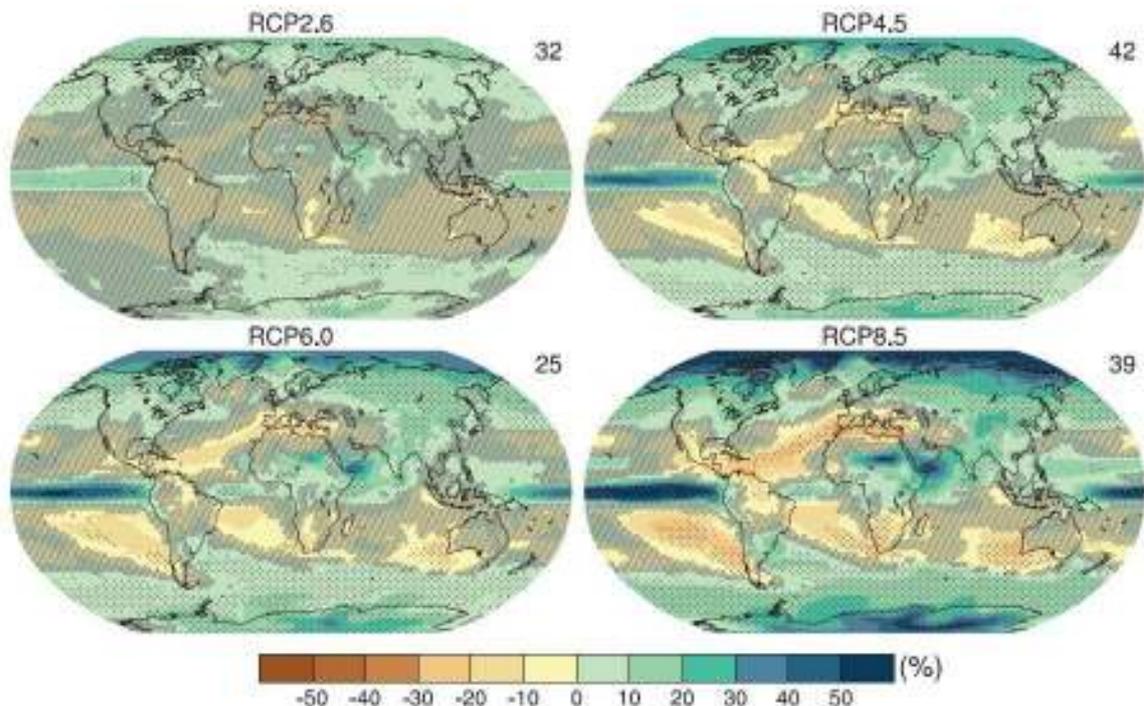


Figura 97: Precipitación media estimada en el periodo 2081-2100

Como podemos ver en la Figura 97, los cambios en la precipitación media en un mundo más cálido exhiben una variación sustancial bajo el RCP8.5. Algunas regiones experimentarán aumentos, otras experimentarán descensos y algunas no experimentarán cambios significativos en absoluto. El contraste de la precipitación media anual entre las regiones secas y húmedas, así como el contraste entre las estaciones húmedas y secas se incrementará en la mayor parte del mundo debido al aumento generalizado de temperaturas. El patrón general de cambio indica que las altas latitudes son más propensas a experimentar mayores cantidades de precipitación. Por otro lado, muchas regiones de latitud media, áridas, subtropicales y semiáridas probablemente experimentarán menos

precipitación mientras que otras regiones más húmedas probablemente experimentarán más precipitaciones a finales de este siglo, todo ello bajo el RCP8.5.

I.3. Cambios esperados en los eventos extremos

IMPACTO	CORTO PLAZO	LARGO PLAZO	REFERENCIA
EVENTOS EXTREMOS	Periodo proyectado: 2016-2035	Periodo proyectado: 2081-2100	
Temperatura	Días cálidos: % días anuales con T_{max} que exceda el 90th percentil de la T_{max} de 1961-1990. 20-26% (CMIP5 bajo RCP2.5) 20-28% (CMIP5 bajo RCP6.5) 20-30% (CMIP5 bajo RCP8.5) Días fríos: porcentaje de días al año con T_{max} por debajo del 10th percentil de T_{max} para 1961-1990. 4.0 - 6.0% (CMIP5 bajo RCP2.5) 3.5 - 6.0% (CMIP5 bajo RCP6.5) 3.0 - 6.0% (CMIP5 bajo RCP8.5)	Días cálidos: % días anuales con T_{max} que exceda el 90th percentil de la T_{max} de 1961-1990 35-45% (CMIP5 bajo RCP2.5) 35-45% (CMIP5 bajo RCP6.5) 55-70% (CMIP5 bajo RCP8.5) Días fríos: porcentaje de días al año con T_{max} por debajo del 10th percentil de T_{max} para 1961-1990. 3.0-4.5% (CMIP5 bajo RCP2.5) 1.5-3.0% (CMIP5 bajo RCP6.5) 0.5-1.0% (CMIP5 bajo RCP8.5)	IPCC, WGI, 2013
Agua/Precipitación	Frecuencia de eventos extremos locales: +5 a 10% por °C de calentamiento	+5% (RCP2.6) a +20% (RCP8.5) aumento en la precipitación en periodos (5 días) de humedad muy alta	IPCC, WGI, 2013
Ciclones/huracanes	La actividad de ciclones tropicales descenderá o se mantendrá sin cambios a escala global durante el siglo XXI. Habrá un aumento tanto en la velocidad máxima media como en las tasas de precipitación en los ciclones.		IPCC, WGI, 2013

Tabla 31: Impacto del cambio climático en los eventos extremos

La magnitud de los diferentes tipos de eventos extremos es lo que se ve alterada por el cambio climático. Como ya se ha mencionado, desde mediados del siglo XX se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Estos cambios se mantendrán en el futuro, y se espera que sigan creciendo.

En cuanto a la temperatura y la precipitación, el WGI (IPCC, 2013) obtuvo datos para el corto plazo (2016-2035) y para el largo plazo (2081-2100). La temperatura del aire, la precipitación, la circulación atmosférica y el mar son los elementos más afectados por estos cambios.

Temperatura

En el AR4 se analizaron los cambios extremos de temperatura centrándose en dos medidas diferentes: los días cálidos y las noches frías. Estudios posteriores confirmaron las conclusiones del AR4, a saber, que los episodios fríos se prevé que disminuyan significativamente, y que las olas de calor serán más intensas, más frecuentes y durarán más hacia el final del siglo XXI. Estas tendencias fueron confirmadas en el AR5 tal y como se muestra en la Figura 98. Las proyecciones CMIP5 prevén una disminución significativa en la frecuencia de las noches frías, un aumento en la frecuencia de días y noches cálidas, y un aumento en la duración de los períodos cálidos. Para las próximas décadas, estos cambios son relativamente insensibles al escenario de emisiones considerado. En la mayoría de las regiones de la tierra y en el corto plazo la frecuencia de días cálidos y noches cálidas continuará aumentando, mientras que la de los días fríos y noches frías continuarán disminuyendo.

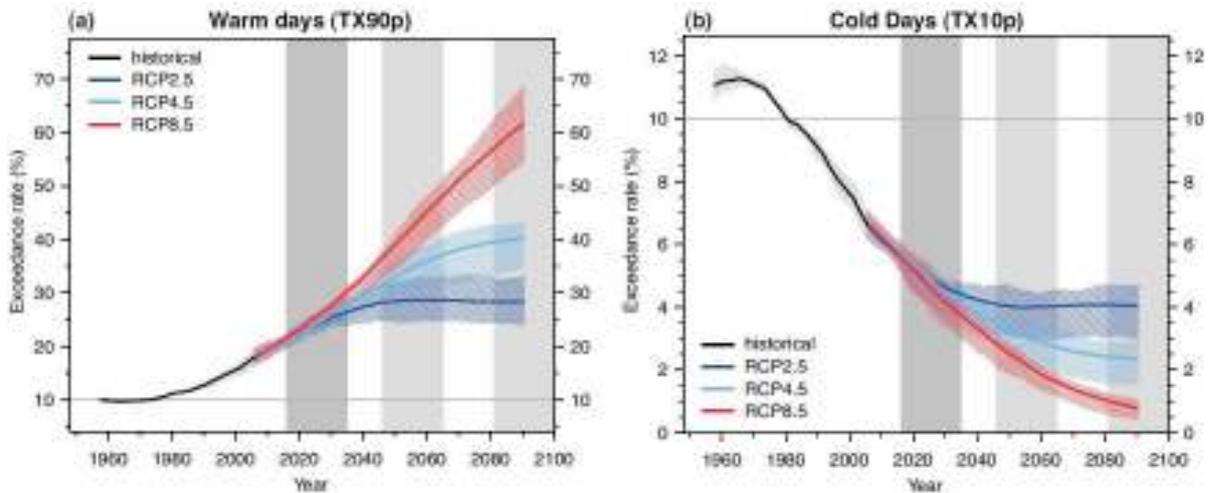


Figura 98: Cambio en la frecuencia de días cálidos y fríos

De estas figuras se pueden extrapolar las futuras tendencias de días cálidos y días fríos que aparecen en la tabla resumen. Los días cálidos son el porcentaje de días al año con el diario $T_{m\acute{a}x}$ superior al percentil 90 de la $T_{m\acute{a}x}$ para 1961-1990. Los días fríos, por otra parte, son el porcentaje de días al año con $T_{m\acute{a}x}$ por debajo del percentil 10 para 1961-1990. Teniendo presente esta definición, las proyecciones esperadas son:

Proyecciones a corto plazo de los días cálidos

- 20-26% CMIP5 bajo RCP2.6
- 20-28% CMIP5 bajo RCP6.5
- 20-30% CMIP5 bajo RCP8.5

Proyecciones a corto plazo de los días fríos

- 4,0-6,0% CMIP5 bajo RCP2.6
- 3,5-6,0% CMIP5 bajo RCP6.5
- 3,0-6,0% CMIP5 bajo RCP8.5

Proyecciones a largo plazo de los días cálidos

- 24-34% CMIP5 bajo RCP2.6
- 35-45% CMIP5 bajo RCP6.5
- 55-70% CMIP5 bajo RCP8.5

Proyecciones a largo plazo de los días fríos

- 3,0-4,5% CMIP5 bajo RCP2.6
- 1,5-3,0% CMIP5 bajo RCP6.5
- 0,5-1,0% CMIP5 bajo RCP8.5

Precipitación

Para el siglo XXI, el AR4 concluyó que las precipitaciones intensas era probable que aumentaran en muchas zonas del planeta. Desde AR4, muchos estudios adicionales han sido publicados utilizando modelos climáticos globales y regionales. Para el corto plazo, las proyecciones CMIP5 confirmaron una tendencia mundial clara de un aumento en las precipitaciones intensas en la media mundial, pero hay variaciones significativas entre regiones. En la mayor parte de las masas terrestres de latitudes medias y en las regiones tropicales húmedas, las precipitaciones extremas serán más intensas y más frecuentes en un mundo más cálido. Es importante señalar no obstante que, aunque ha habido un progreso sustancial entre CMIP3 y CMIP5 en la capacidad de los modelos para simular de forma más realista las precipitaciones extremas, la mayoría de los modelos subestiman el aumento previsto de precipitaciones extremas en el futuro. De todos modos, hay una alta confianza en que los cambios en los eventos extremos a escala diaria local sufrirán un aumento de entre el 5 y el 10% por ° C de calentamiento.

Los eventos extremos de precipitación se producen cuando la mayor parte del vapor de agua atmosférico disponible precipita rápidamente en una sola tormenta. La cantidad máxima de vapor de agua en el aire (saturación) se determina por la relación Clausius-Clapeyron. Cuando las temperaturas del aire aumentan, esta cantidad saturada de agua también aumenta. Si la cantidad de vapor de agua contenido en el aire es mayor, la magnitud del evento extremo será mayor. La Figura 99 muestra la proyección de los periodos de 5 días de precipitación continua según los modelos CMIP5. Se prevé que a finales del siglo XXI, habrá un cambio en el rango de entre el 5% (RCP2.6) al 20% (RCP8.5).

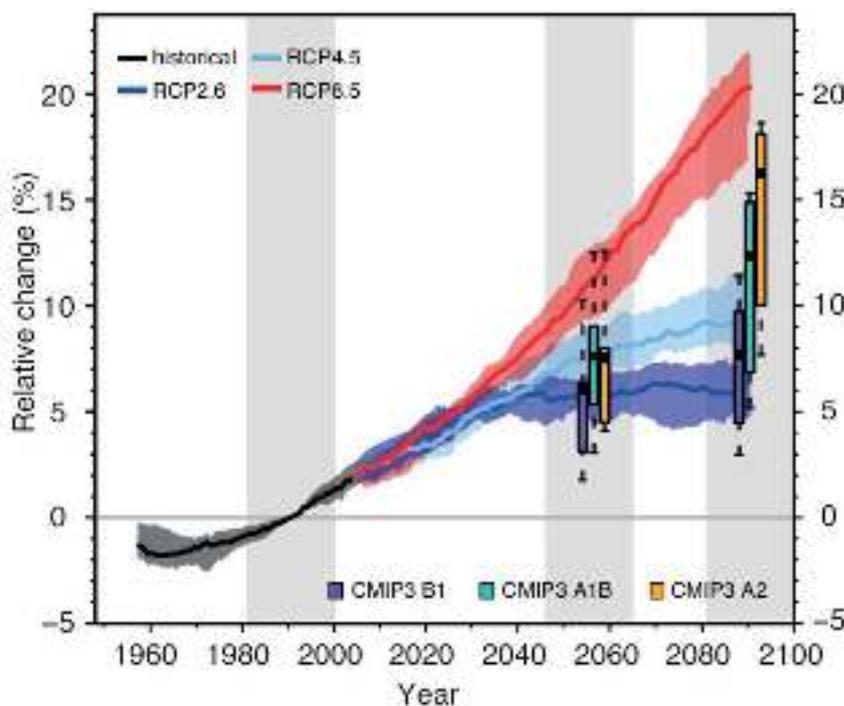


Figura 99: Periodos de 5 días consecutivos de alta humedad

La circulación atmosférica

Las variaciones en la circulación atmosférica causan modificaciones en fenómenos a gran escala que afectan al clima regional, como los monzones, los ciclones, los ciclones tropicales, los huracanes y El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Hay menos estudios acerca de este tipo de fenómenos, de ahí que haya pocos resultados y en general menos confianza media en ellos.

En términos globales, la actividad de los **monzones** aumentará en el siglo XXI, mientras que la circulación se debilita. Las fechas de comienzo del monzón pueden llegar a anticiparse, y las de retirada a retrasarse, lo que deviene en una prolongación de la temporada de monzones en muchas regiones. El aumento en la precipitación media estacional se manifestará en el este y sur de Asia en los monzones de verano. Por otro lado, en América del Sur, África, Asia Oriental, Asia del Sur, el sudeste de Asia y Australia las probabilidades de un aumento futuro de precipitaciones extremas relacionadas con el monzón son altas.

Los cambios en las precipitaciones tropicales estarán asociados a la climatología actual y al patrón de calentamiento de los océanos. El primer efecto será el causante de un aumento de las precipitaciones cerca de las regiones actualmente lluviosas, mientras que el segundo será el responsable del incremento de las precipitaciones allí donde el calentamiento del océano supere la media tropical. El Océano Índico tropical, por ejemplo, sufrirá una disminución de las precipitaciones en el este, y un aumento de las lluvias en el oeste.

En relación a la frecuencia de los **ciclones**, existe poca confianza en las proyecciones globales para el siglo XXI, no solo en el Océano Índico, sino en todo el mundo. Las proyecciones indican que la frecuencia mundial de los ciclones tropicales será su disminución o en todo caso la ausencia de cambios, aunque sí se espera un aumento en las tasas medias globales de velocidad máxima del viento y lluvia de los mismos.

Como se comentó anteriormente, en el AR5 del IPCC (IPCC, 2013, p.992), los huracanes fueron uno de los campos de estudio por parte de los investigadores. El informe pronostica aumentos a corto plazo de la intensidad de los huracanes del Atlántico Norte. Los estudios prevén a su vez el aumento en la frecuencia de ciclones tropicales de categoría 4 y 5 en el Atlántico norte y en el sudoeste del Pacífico, así como una intensificación a mediados de siglo.

Con respecto a los factores que conducen a las variaciones de los ciclones tropicales y huracanes, hay coincidencia en los estudios en que los modos de variabilidad del clima que en el pasado han dado lugar a estas variaciones en la intensidad, la frecuencia y la estructura de estos fenómenos climáticos - como el ENSO - continuarán influyendo en estos eventos extremos a través de la segunda mitad del siglo XXI.

El **Niño-Oscilación del Sur** (ENOS) seguirá siendo el ciclo de variabilidad natural del clima más importante durante el siglo XXI. Además, la variabilidad de las precipitaciones regionales que éste induce se intensificará. Las variaciones naturales del patrón de amplitud espacial del ENSO son tan grandes que la confianza en cualquier cambio proyectado para el siglo XXI sigue siendo baja. Sí parece probado que, en un clima más cálido, el aumento de la humedad atmosférica intensificará la

variabilidad temporal de la precipitación incluso aunque la amplitud y frecuencia de la circulación atmosférica siga siendo la misma.

El nivel del mar

La magnitud de los eventos extremos a nivel del mar ha aumentado desde 1970, y la mayor parte de este aumento se explica por los aumentos en el nivel medio del mar. En el futuro, es muy probable que se produzca un aumento significativo en la aparición de eventos extremos a nivel del mar, y de manera similar a las observaciones del pasado, este aumento será principalmente el resultado de un aumento en el nivel medio del mar. Estas proyecciones se han obtenido estudiando varias mareas de tempestad regionales en la costa sureste de Australia, en el Mar de Irlanda del Este, en el Mar del Norte y en las costas del Reino Unido.

ANEXO II. El concepto de vulnerabilidad e indicadores propuestos.

II.1 El marco conceptual de la vulnerabilidad

La naturaleza transversal del problema del cambio climático global requiere una intensa colaboración de académicos de diferentes ámbitos, como la ciencia del clima, la gestión de desastres, la evaluación de riesgos, el desarrollo, la economía y el análisis de políticas. Esta colaboración debe basarse en una terminología consistente que facilite que investigadores de diferentes tradiciones puedan comunicarse con claridad y transparencia a pesar de las diferencias en los modelos conceptuales que utilizan.

El documento de Füsse (2005) asume que no existe una única conceptualización correcta de la vulnerabilidad, y sugiere la necesidad de usar un marco y una terminología interdisciplinar en la investigación del cambio climático global. El marco consta de tres componentes:

1. Terminología de **situaciones** vulnerables. En él se describe el contexto de una evaluación de la vulnerabilidad en términos del sistema vulnerable, el peligro en cuestión, los atributos valiosos de ese sistema que se ven amenazados por su exposición a este riesgo, y una referencia temporal.
2. Esquema de clasificación de los **factores** de vulnerabilidad. La clasificación tiene en cuenta dos dimensiones independientes: escala y dominio disciplinar.
3. Terminología de los **conceptos** de vulnerabilidad. Esta terminología describe cualquier conceptualización concebible de la vulnerabilidad basada en los grupos de factores de vulnerabilidad que lo componen.

Situaciones

Analizando la literatura se observa que todos los marcos de vulnerabilidad especifican cuatro dimensiones fundamentales a la hora de describir el contexto de una evaluación de vulnerabilidad:

1. Sistema. El sistema o región y/o grupo de población y/o sector.
2. Peligro. El factor de estrés externo (o un conjunto de factores de estrés) de preocupación. Las Naciones Unidas (UN, 2004, citado en Füssel, 2005) define un "riesgo" como "un evento físico, un fenómeno o una actividad humana potencialmente perjudicial, que puede causar la pérdida de la vida o lesiones a seres humanos, daños materiales, sociales o económicos, o degradación ambiental". En resumen: un peligro se entiende como una influencia externa que puede afectar negativamente a un atributo valioso de un sistema.
3. Atributo valioso. Se refiere a la variable de interés del sistema vulnerable que está amenazada por su exposición al peligro. Riesgos complejos, como el cambio climático antropogénico, pueden tener una amplia gama de efectos en un sistema o comunidad en particular.
4. Referencia temporal. Es el período de tiempo de interés. Si se espera que la vulnerabilidad de un sistema o de su exposición al peligro cambien de manera significativa durante el

período de tiempo considerado en la evaluación, el marco debe especificar una referencia temporal. Esto es particularmente relevante para la evaluación de la vulnerabilidad frente al cambio climático antropogénico, que puede tener un horizonte temporal de varias décadas o más.

Estos cuatro atributos son universalmente aplicables a una amplia gama de contextos y de diferentes ámbitos de investigación de vulnerabilidad. Un ejemplo de estos cuatro elementos aplicados a un caso concreto sería el estudio de la "vulnerabilidad de la producción primaria neta (atributo) de un ecosistema particular (sistema) a incendios (peligro) en el 2050 (referencia temporal)".

Factores

Una descripción clara de la situación de vulnerabilidad es un primer paso importante para evitar malentendidos en torno a la vulnerabilidad. Sin embargo, también hay diferentes interpretaciones del término en sí mismo. Füssel (2005) distingue diferentes conceptos de vulnerabilidad en función de los factores que se consideren. La mayoría de los autores distingue los factores estresantes externos a los que un sistema está expuesto de los factores internos que determinan los efectos en el sistema. Otros, sin embargo, distinguen los factores socioeconómicos estructurales externos de los factores internos. Cada una de las terminologías proporciona una aproximación relevante para la evaluación de la vulnerabilidad de un sistema a un peligro específico; sin embargo, son claramente incompatibles entre sí. La principal razón de esta confusión es el hecho de no distinguir entre dos dimensiones en gran medida independientes de los factores de vulnerabilidad: la escala y el ámbito disciplinario.

1. Escala: interno vs externo. Factores de vulnerabilidad internos se refieren a características del sistema vulnerable. Todos los demás factores de vulnerabilidad serían externos.
2. Ámbito disciplinario: socio-economía vs. biofísica. Los factores de vulnerabilidad socioeconómicos son los que se relacionan con los recursos económicos, la distribución del poder, las instituciones sociales, las prácticas culturales y otras características de los grupos sociales normalmente investigadas por las ciencias sociales. Los factores de vulnerabilidad biofísicos, por el contrario, están relacionados con las propiedades del sistema investigadas por las ciencias físicas.

Conceptos

Una interpretación de vulnerabilidad puede distinguirse en base a cuál de los cuatro grupos de factores de vulnerabilidad está incluido.

Las definiciones de vulnerabilidad que comprenden sólo un grupo de factores se construyen mediante la adición de la escala y el dominio como calificadores (por ejemplo, la vulnerabilidad socioeconómica interna). Todas las definiciones pertinentes de vulnerabilidad que comprenden dos grupos de factores se combinan ya sea en la misma escala o en el mismo dominio. El calificador *escala-cruzada* se utiliza para las combinaciones de factores internos y externos, y el calificador *integrado* para la combinación de los factores socioeconómicos y biofísicos.

Finalmente, una limitación de las terminologías más comunes sobre la vulnerabilidad que detecta Füssel es su indiferencia con respecto al tiempo. La capacidad de respuesta de una comunidad al cambio climático comprende su capacidad para hacer frente a las variaciones climáticas a corto plazo, así como su capacidad de adaptación, es decir, su capacidad a largo plazo, lo cual puede ser determinado por diferentes factores. Las discusiones sobre los conceptos de vulnerabilidad que no se refieren a una situación de vulnerabilidad particular han de especificar explícitamente la referencia temporal, además de su dominio y de su escala.

Combinando la terminología de la **situación** de vulnerabilidad y la terminología de los **conceptos** de vulnerabilidad se presenta a continuación un marco combinado que incluye seis elementos:

1. Referencia Temporal: Corto frente a largo plazo
2. Escala. Interna o externa vs. Escala cruzada
3. Dominio. Socioeconómico vs. biofísico vs. integrada
4. Sistema Vulnerable
5. Atributo valioso
6. Peligro

Este marco conceptual de la vulnerabilidad combinado tiene varias ventajas: en primer lugar, permite comunicar claramente qué interpretación de la vulnerabilidad se usa en una evaluación específica; en segundo lugar, permite aclarar las similitudes y las diferencias en las diversas definiciones de vulnerabilidad; en tercer lugar, proporciona un marco de trabajo para la revisión de las terminologías existentes.

II.2. Aproximaciones a la vulnerabilidad

El marco conceptual de la vulnerabilidad presentado anteriormente podría aplicarse a varios enfoques de investigación. Aquí nos centraremos en los enfoques clásicos:

Marco riesgo

Este marco se emplea principalmente para evaluar los riesgos en ciertos elementos valiosos (unidades de exposición) que surgen de su exposición a riesgos específicos. Este enfoque de riesgo está ampliamente desarrollado en la literatura técnica sobre desastres. Por lo general, se supone que los eventos peligrosos son raros, y que el peligro es conocido y estacionario. Aplicando la terminología anterior, este concepto de vulnerabilidad se caracteriza por ser una vulnerabilidad biofísica interna.

Marco constructivista social

Este marco se suele utilizar para analizar quién es más vulnerable y por qué. De acuerdo con éste, la vulnerabilidad denota la capacidad de respuesta socioeconómica de grupos o individuos a una variedad de factores de estrés. El marco constructivista social, que tiene sus raíces principalmente en la economía política, prevalece en la literatura de la pobreza y el desarrollo. Su definición de vulnerabilidad se refiere exclusivamente a las personas, y se basa en un modelo explicativo de la

vulnerabilidad socioeconómica a una serie de tensiones y consecuencias. Según la terminología anteriormente presentada, el marco constructivista caracteriza a la vulnerabilidad como social interna o como social a escala cruzada. Los términos capacidad de respuesta y capacidad de recuperación también se utilizan para denotar este concepto. Un ejemplo de estudio basado en este marco podría ser un análisis del efecto del cambio climático sobre la pobreza energética en España a 2050.

Marco lugares en peligro

Se trata de un marco que integra los dos anteriores. Son ampliamente utilizados en el contexto del cambio global y el cambio climático, en referencia a las regiones, comunidades u otras unidades sociales.

II.3. Vulnerabilidad al cambio climático y el debate acerca de la definición del IPCC

El cambio climático antropogénico difiere sustancialmente de otros problemas a los que se han aplicado las evaluaciones de vulnerabilidad. En respuesta a las diversas necesidades de información de los responsables políticos para abordar el problema del cambio climático global, se han desarrollado dos vías de principales de investigación y acción: la mitigación y la adaptación. Estas dos opciones se basan a su vez en la información acerca de la vulnerabilidad de los sistemas claves al cambio climático. Sin embargo, sus necesidades de información difieren significativamente, por ejemplo en relación con el horizonte temporal.

Las tres tradiciones principales de investigación de vulnerabilidades (riesgo, constructivista social y de lugar) varían en su capacidad de proporcionar información para los dos enfoques de análisis de la vulnerabilidad al cambio climático (mitigación y adaptación). En principio, el marco de riesgos puede proporcionar información importante para la política de mitigación pero necesita ser ampliado sustancialmente para reflejar las características específicas del cambio climático global. El marco social constructivista puede proporcionar información importante para el diseño de políticas de adaptación, en particular en los países en desarrollo, sin embargo también debe adaptarse para tener en cuenta los desafíos únicos asociados con el cambio climático a largo plazo. Utilizando cualquiera de los dos marcos, se puede desarrollar una definición coherente de la vulnerabilidad al cambio climático global, que más tarde se vincule a la definición del IPCC. Optaremos aquí por el primero: el marco de riesgo, como punto de partida.

El marco de riesgo se ha aplicado ampliamente en las evaluaciones de riesgos para estimar los daños esperados por diferentes tipos de peligros, incluyendo peligros climáticos. Las aplicaciones estándar de evaluación de riesgos de desastres (DRA) se ocupan principalmente de los peligros naturales a corto plazo, asumiendo riesgos conocidos y la vulnerabilidad presente. El problema es que el cambio climático es a largo plazo y, aunque es global, no es uniforme en el espacio.

Es necesaria por tanto una conceptualización de la vulnerabilidad al cambio climático global en el largo plazo. A continuación se presenta dicha conceptualización en contraste con la DRA.

1. El cambio climático es continuo. La DRA se refiere a eventos de peligros discretos. El cambio climático en cambio es un proceso continuo que puede aumentar o disminuir el nivel de riesgo inicial.
2. El cambio climático es un proceso a largo plazo atribuible a la acción humana. La DRA ve peligros climáticos como eventos estacionarios y exógenos a la evaluación, y de ahí que asuma la vulnerabilidad como constante. Las largas escalas de tiempo que se manejan en el cambio climático, por el contrario, requieren un marco de evaluación dinámico que dé cuenta de la incertidumbre en todos los grupos de factores de vulnerabilidad.
3. El cambio climático es complejo, global, espacialmente heterogéneo e incierto. La DRA asume que la exposición de un sistema vulnerable a un peligro puede ser caracterizada por la descripción del riesgo en la escala espacial del peligro. En las evaluaciones de vulnerabilidad al cambio climático global, sin embargo, la gran desviación entre las escalas de los peligros (global) y las unidades de exposición (regional o local) no permite establecer esta correlación, ya que dos sistemas idénticos en diferentes lugares son propensos a experimentar diferentes exposiciones ante el mismo nivel de riesgo asociado al cambio climático global (por ejemplo, expresado en términos de cambio de la temperatura global). Por otra parte, la misma magnitud de cambio climático regional (por ejemplo, un cambio dado en la precipitación) puede tener impactos muy diferentes en función del clima.
4. El cambio climático puede tener múltiples efectos en un sistema. El DRA normalmente utiliza una única métrica para describir el riesgo atribuible a un evento específico. El cambio climático, por el contrario, por lo general tiene múltiples efectos en sociedades y otros sistemas vulnerables. Por esa razón, para alcanzar caracterizaciones completas de la vulnerabilidad de un sistema al cambio climático, en general se requiere del uso de múltiples métricas.

Armados con el aparato conceptual que el marco de Füssel nos proporciona, ya estamos en condiciones de analizar la definición de vulnerabilidad del IPCC. Tal y como hemos visto, los riesgos de un sistema al cambio climático futuro están determinados por su exposición y por su sensibilidad. Por un lado, la exposición a riesgos climáticos regionales se determina por el nivel de peligro esperado, así como por un factor de exposición regional que describe la manifestación del cambio climático por zonas. Por otro lado, la sensibilidad al cambio climático depende de la sensibilidad actual del sistema vulnerable, así como de su capacidad de adaptación en el tiempo. En resumen, el riesgo futuro está determinado por el nivel de peligro y otros tres factores: (1) el factor de exposición regional, (2) la sensibilidad actual y (3) la capacidad de adaptación. Los tres últimos factores son exactamente los que se consideran en la definición de la vulnerabilidad de IPCC. Por lo tanto, vemos que la definición del IPCC de la vulnerabilidad cumple con los 6 requisitos del marco de Füssel, al describir sistemáticamente el futuro (o largo plazo) de la vulnerabilidad de cualquier sistema natural o social al cambio climático global.

II.4. Diferentes visiones sobre la vulnerabilidad

Ya se ha puesto de manifiesto en los capítulos anteriores que la vulnerabilidad no es un concepto sencillo, y que no hay consenso en cuanto a su significado preciso. Asumiendo esta diversidad, se ha

optado por utilizar la definición del IPCC como definición base, elección que se ha reforzado mediante el análisis de la misma dentro del marco propuesto por Füssel (2005). Aunque esta elección se ha mostrado coherente, es interesante completar la conceptualización de las definiciones sobre vulnerabilidad a partir del estudio del Centro Tyndall.

Según estos investigadores (Adger et al., 2004), es esencial hacer hincapié en que sólo podemos hablar con sentido acerca de la vulnerabilidad de un sistema o unidad de exposición determinada a un peligro o a un rango específico de peligros. Una unidad de sistema o de exposición puede ser una región, un grupo de población, una comunidad, un ecosistema, un país, un sector económico, un hogar, una empresa o un individuo. El término peligro se utiliza aquí para referirse específicamente a una manifestación física de variabilidad o cambio climático, tales como sequías, inundaciones, tormentas, episodio de fuertes lluvias, un cambio a largo plazo en el valor medio de una variable climática, un potencial cambio futuro en un régimen climático y así sucesivamente. Por otro lado, los riesgos climáticos pueden definirse en términos de valores absolutos o de desviaciones de la media de las variables como la precipitación, la temperatura, la velocidad del viento o el nivel de agua, tal vez combinados con factores tales como la velocidad de aparición, la duración y la extensión espacial. A los peligros también se les conoce como los fenómenos climáticos.

Las definiciones de la vulnerabilidad presentes en la literatura relacionada con el cambio climático tienden a caer en dos categorías que la interpretan

- como la cantidad (potencial) de daños causados a un sistema por un evento relacionado con el clima;
- como un estado que existe dentro de un sistema antes de que se vea afectado por estos eventos.

Centrándonos en este segundo punto, la interpretación de la vulnerabilidad como un estado (es decir, como una variable que describe el estado interno de un sistema antes de la ocurrencia de un evento potencialmente dañino) ha surgido de los estudios de los factores estructurales que hacen a las sociedades y a las comunidades susceptibles de ser dañadas por peligros externos. En esta formulación, la vulnerabilidad es algo que existe dentro de los sistemas de forma independiente de los peligros externos.

El siguiente ejemplo puede ayudar a la comprensión del concepto: imaginemos que tenemos un recipiente, que normalmente se llena hasta la mitad. Esta situación representa la operación normal del sistema, que no se ve afectado por el cambio climático. El recipiente tiene también un pequeño orificio en su mitad superior. Esta peculiaridad ejemplifica una vulnerabilidad del sistema. Si llenamos por completo el recipiente se producirá una fuga. La mayor cantidad de agua significa un cambio climático, mientras que la fuga de agua simboliza el cambio de operación que el sistema sufre. Es importante notar que, aunque sin la aparición de un evento de cambio climático no se produjo ninguna alteración en el funcionamiento del sistema, la vulnerabilidad siempre estuvo presente.

II.5. La necesidad de una métrica para la vulnerabilidad

Como ya se comentó en secciones anteriores, mientras que en el ámbito de la mitigación se viene utilizando la métrica común de "reducción de toneladas equivalentes de CO₂", no existen parámetros o indicadores comúnmente aceptados para comparar las necesidades de adaptación y medir la eficacia de las medidas. Esta carencia podría explicarse sobre todo por el hecho de que la identificación de medidas de adaptación se encuentra todavía en una fase muy temprana; se trata de un ámbito de investigación que urge desarrollar. En esa línea, y siguiendo el recorrido planteado en el informe, el primer paso para llegar a esas métricas es encontrar las vulnerabilidades del sistema y, a partir de ahí, elaborar un conjunto de indicadores.

Con el fin de comprender mejor cómo activar y sostener sinergias positivas, HELIO International (Williamson et al., 2009) desarrolló una metodología sencilla y un conjunto de indicadores para evaluar la vulnerabilidad y la resiliencia de los sistemas energéticos al cambio climático a escala nacional. Luego, aplicando los indicadores a los propios sistemas nacionales, HELIO planteó algunas posibles políticas concretas. En la sección 5.3. se presenta su propuesta, pero antes haremos un recorrido por las diferentes vulnerabilidades que la literatura ha detectado para las distintas tecnologías energéticas.

II.6. Indicadores de vulnerabilidad para el sector energético

La creación de una única métrica para evaluar la resistencia de un sistema energético al cambio climático es un reto. Una vez más, el trabajo del Banco Mundial (Ebinger and World Bank, 2011) es una buena referencia. En este trabajo, los autores proponen algunos indicadores que pueden ser utilizados para evaluar la resiliencia de un sistema, basados en la comparación del clima actual y futuro, y en cómo estos cambios afectan a la capacidad de producción de cada central. Por otro lado, presentan también indicadores para medir la vulnerabilidad de un sistema y su capacidad de recuperación, basados en este caso en el nivel de diversificación, ya que los sistemas que en gran medida dependen de una sola fuente de energía pueden estar más expuestos a los impactos climáticos.

Muchos indicadores sobre los sistemas de energía se pueden utilizar para evaluar el grado en que esos sistemas son vulnerables al cambio climático. En términos de energía, algunos ejemplos podrían ser el porcentaje de combustible en la oferta total de energía primaria y final, así como la producción total de electricidad y la capacidad instalada. Con respecto a las renovables, ya que son más vulnerables a las alteraciones en el clima, la participación de las fuentes renovables en la capacidad instalada total es otro indicador relevante.

Para el suministro de energía, las variaciones en la eficiencia global del sistema (medidas, por ejemplo, por la relación del consumo final en relación al primario) inducidas por el cambio climático puede indicar cómo la conversión de energía y el transporte pueden verse afectados por el mismo. El problema es que esta medida puede mostrar efectos agregados, por lo que se necesitan algunas

medidas adicionales que complementen la comprensión de la vulnerabilidad del sistema. Algunas de estas medidas adicionales podrían ser: (1) los impactos del cambio climático proyectados sobre el factor de capacidad de generación de electricidad renovable, que son una buena medida para fuentes tales como la generación de energía hidroeléctrica y eólica; (2) los impactos en la generación de electricidad térmica, que se describen mejor en términos de eficiencia de conversión o variaciones de capacidad; por último, (3) los impactos climáticos sobre la producción de biocombustibles líquidos, que se pueden evaluar a través de variaciones en la productividad agrícola y la conversión.

Otro indicador a valorar es la intensidad energética de un sector, que puede ofrecer una imagen de la vulnerabilidad desde el lado de la demanda. El mayor desafío aquí es llevar a cabo un análisis *ceteris paribus* estricto para el largo plazo.

Además de estos indicadores estándar en el sector energético, dos estudios recientes, el de Michaelowa et al. (2005) y el de Williamson et al. (2009) examinaron las métricas particulares para la vulnerabilidad y resiliencia de los sistemas energéticos que se habían propuesto en la literatura, y presentaron un conjunto de indicadores que se describen en la siguiente sección.

II.6.1. Indicadores HELIO de vulnerabilidad

Los documentos antes mencionados tienen por objeto contribuir al desarrollo de parámetros e indicadores para sistemas de energía. Basándose en su experiencia en la aplicación de indicadores, HELIO ha desarrollado un conjunto de indicadores para medir:

1. La vulnerabilidad de los sistemas de energía
2. La eficacia de los esfuerzos de adaptación en el sector energético

El segundo conjunto de indicadores es útil para la evaluación de las medidas de adaptación. Nos centramos por tanto aquí en el primer grupo.

La filosofía de HELIO es que la métrica subyacente debe estar disponible para la mayoría de los países, la recolección de datos debe ser factible y, si se requiere algún cálculo para derivar un indicador, este debe ser fácil de hacer.

En general los indicadores deben cumplir los siguientes requisitos:

- Estar claramente definidos, ser fáciles de entender y fáciles de comunicar a los ciudadanos y a los responsables políticos por igual;
- Ser relevantes para las políticas;
- Reflejar un aspecto importante social, económico, ambiental, tecnológico o de gobierno del sistema energético;
- Medir algo de valor para los observadores y los tomadores de decisiones;
- Ser robustos y relevantes a largo plazo.

Los indicadores se dividen en dos grupos fundamentales. El primero hace referencia a la situación socio-ambiental de los diferentes estados, el segundo se centra ya en las vulnerabilidades de las diferentes tecnologías. Vamos con cada uno de ellos.

Para que las políticas y medidas propuestas sean eficaces, es necesario cuantificar el estado de vulnerabilidad del país en general. De ahí que el primer conjunto de indicadores de HELIO se dedique a esta tarea (ver Tabla 32).

SECTOR	DESCRIPCIÓN
Medioambiente	Cambio en los patrones de lluvia
	Cambios en la temperatura
Económico	Número de hogares con acceso a la electricidad en las últimas dos décadas
	Nivel de dependencia energética
Técnico	Proporción de renovables en el mix
	Nivel de diversidad de renovables en el mix
Social	Cambio en los patrones de enfermedades
	Cambio en el empleo
Gobernanza	Mejora en las leyes sobre usos de suelo
	Participación de la ciudadanía

Tabla 32: Indicadores HELIO de vulnerabilidad por países

El resumen del segundo grupo de indicadores más relevantes, dedicado a tecnologías, se recoge en la Tabla 33.

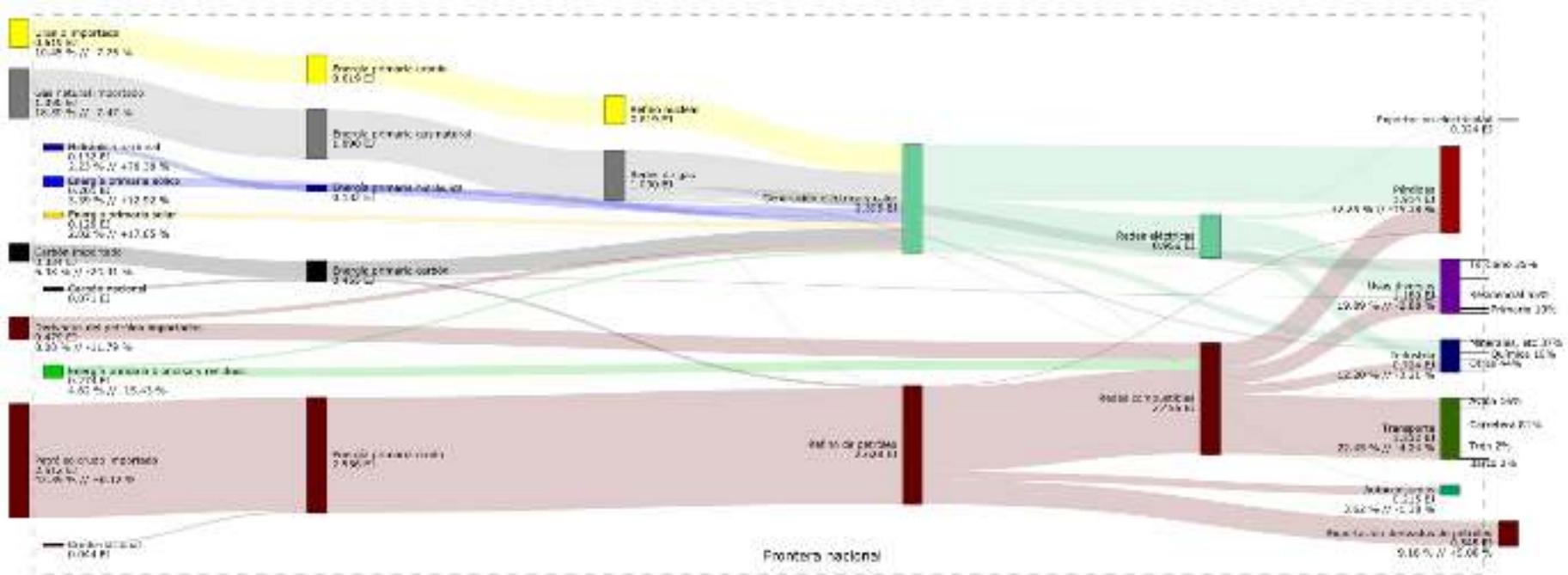
SECTOR	INDICADOR	DESCRIPCIÓN
Hidroeléctrica	VH1	Cambio precipitación prevista para los próximos 20 a 50 años (%) y / o probabilidad de inundaciones en cada cuenca
	VH2	Proyección de la frecuencia de inundaciones durante los próximos 50 años (número de inundaciones que tienen una mayor intensidad que una inundación con un ciclo de repetición 100 años)
Eólica	VW1	Número de aerogeneradores a menos de un metro sobre el nivel del mar
	VW2	Cambio de la velocidad del viento promedio durante los próximos 20 años, basado en los modelos climáticos regionales (%)
	VW3	Estimación de las velocidades medias anuales del viento de más de 25 m/s en los próximos 20 años
Solar	VS1	Capacidad de las instalaciones solares ya existentes (m2)
	VS2	Aumento de temperatura esperada (°C) en los próximos 20 años
Biomasa y biofuel	VB1	Proporción de biomasa utilizada con fines energéticos (%) con respecto a la producción total de biomasa
	VB2	Cambio en la precipitación prevista para los próximos 20 a 50 años (%)
	VB3	Probabilidad de aumento de la temperatura más allá de la tolerancia al calor biológico del cultivo correspondiente en los próximos 20 años (%). Veinte años es el tiempo de vida media estimada de las centrales de biomasa.
	VB4	Frecuencia de las sequías en los próximos 20 años
	VB5	Proyección de la frecuencia de inundaciones en los próximos 20 años
	VB6	Número de plantas de energía de biomasa ubicadas a menos de 1 m sobre el nivel del mar y / o situadas en zonas que tienen un período de recurrencia de inundaciones de 100 años.

Plantas termoeléctricas	VP1	Número de centrales térmicas (carbón, petróleo y gas), situadas a menos de un metro sobre el nivel del mar y dentro del área que sería inundada por una inundación con un período de recurrencia actual de 100 años
	VP2	Número de centrales nucleares situadas a menos de un metro sobre el nivel del mar o de un río y afectada por una inundación con un período de recurrencia actual de 100 años
	VP4	Aumento de la temperatura esperada del agua de refrigeración en los próximos 30 años (° C)
Combustibles fósiles	VF1	Instalaciones de petróleo y gas en alta mar que puedan ser golpeadas por una tormenta con ráfagas de más de 70 m/s en los próximos 20 años (%)
	VF2	Porcentaje/número de refinerías que pueden ser afectadas por una tormenta con rachas de más de 70 m/s dentro de los próximos 20 años (%)
	VF3	Número de minas de carbón ubicadas a menos de 1 m sobre el nivel del mar y / o situadas en una zona que tiene un ciclo de inundación de 100 años
Transporte	VT1	Número de kms de líneas de transmisión y distribución sobre el suelo

Tabla 33: Indicadores HELIO de vulnerabilidad y resiliencia

Esta propuesta de indicadores de HELIO es una aproximación preliminar al problema de la medida de la adaptación en el sector energético que aun precisa de mayor concreción.

ANEXO III. Diagramas Sankey del sistema energético español



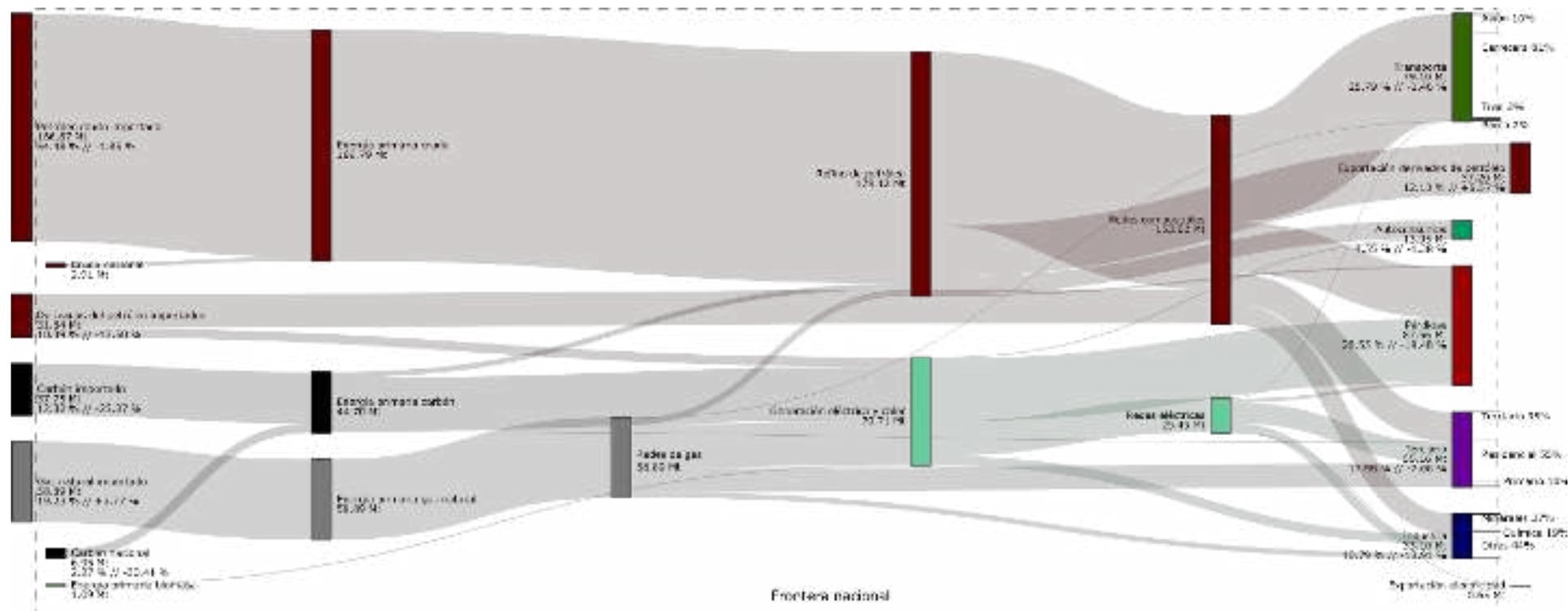


Figura 101: Diagrama Sankey de emisiones de CO2 vinculadas al sector energético en España. 2014

ANEXO IV. Distribución de la capacidad eléctrica instalada por demarcación hidrográfica y tecnologías

	TOTAL	GALICIA COSTA	MIÑO SIL	CANTABR. ORIENTAL	CANTABR. OCCIDENTAL	DUERO	TAJO	GUADIANA	TINTO, ODIEL Y PIEDRAS	GUADALQUIVIR	GUADALETE Y BARBATE	CUENCAS MEDITERRÁNEAS ANDALUZAS	SEGURA	JÚCAR	EBRO	DISTRITO FLUVIAL DE CATALUÑA
Nuclear	7,002	0	0	0	0	0	2,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,06	1,99	1,05
Carbón nacional	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Carbón importado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Carbón IGCC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Carbón supercrítico	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Carbón supercrítico CCS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gas CC	16,33	0,00	0,00	0,00	2,47	0,00	1,26	0,00	1,26	0,00	1,69	1,67	3,37	0,00	3,34	1,28
Gas CC CCS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gas OC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gas OC CCS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fuel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hidro - fluyente	4,89	0,53	0,50	0,47	0,10	0,56	0,26	0,16	0,03	0,22	0,02	0,07	0,04	0,22	1,35	0,33
Hidro - regulable	6,42	0,07	0,86	0,05	0,00	1,89	1,35	0,23	0,01	0,23	0,04	0,01	0,05	0,69	0,89	0,04
Bombeo	8,85	0,09	1,18	0,08	0,00	2,60	1,87	0,32	0,02	0,32	0,06	0,01	0,07	0,95	1,23	0,06
Mini hidráulica	1,92	0,21	0,20	0,18	0,04	0,22	0,10	0,06	0,01	0,09	0,01	0,03	0,01	0,09	0,53	0,13
Cogeneración industrial	11,98	0,48	0,48	0,84	0,45	0,91	0,95	0,45	0,14	0,84	0,09	0,28	0,57	1,42	2,92	1,16
Cogeneración - otros	1,26	0,05	0,05	0,09	0,05	0,10	0,10	0,05	0,01	0,09	0,01	0,03	0,06	0,15	0,31	0,12

	TOTAL	GALICIA COSTA	MIÑO SIL	CANTABR. ORIENTAL	CANTABR. OCCIDENTAL	DUERO	TAJO	GUADIANA	TINTO, ODIEL Y PIEDRAS	GUADALQUIVIR	GUADALETE Y BARBATE	CUENCAS MEDITERRÁNEAS ANDALUZAS	SEGURA	JÚCAR	EBRO	DISTRITO FLUVIAL DE CATALUÑA
Eólica	22,48	1,51	1,62	0,80	0,20	4,82	1,60	1,65	0,32	2,10	0,22	0,65	0,29	2,16	3,90	0,64
Eólica Offshore	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fotovoltaica central	4,30	0,01	0,03	0,00	0,03	0,41	0,65	0,67	0,08	0,56	0,06	0,17	0,43	0,53	0,54	0,12
Fotovoltaica industrial	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fotovoltaica distrib	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Solar Termoel. central	1,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	0,52	0,09	0,57	0,06	0,19	0,03	0,07	0,01	0,01
Solar termoel. industrial	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,41	1,85	0,34	2,06	0,21	0,68	0,11	0,25	0,04	0,04
Solar termoeléctrica otros	6,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,31	1,72	0,32	1,91	0,20	0,63	0,10	0,23	0,04	0,04
Biomasa - cultivos	0,84	0,03	0,03	0,11	0,04	0,03	0,07	0,06	0,03	0,16	0,02	0,06	0,01	0,03	0,14	0,03
Biomasa - residuos	0,52	0,01	0,01	0,09	0,06	0,00	0,03	0,01	0,01	0,04	0,00	0,01	0,01	0,08	0,14	0,03
Biomasa forestal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSU	0,66	0,01	0,01	0,00	0,01	0,11	0,02	0,04	0,02	0,12	0,01	0,04	0,07	0,02	0,12	0,05

ANEXO V. Tablas resumen de impactos, vulnerabilidades y adaptación del sector energético al cambio climático

Tabla 34: Cuadro resumen de los cambios climáticos y sus impactos en el sistema energético (ámbito global).

IMPACTOS			PROYECCIONES / TENDENCIAS			REFERENCIA	
CAMBIO CLIMÁTICO	TEMPERATURA	GMST	PROYECCIÓN CORTO PLAZO: 2016 – 2035 PERIODO DE REFERENCIA: 1986 - 2005	+0.47°C a +1.00°C (CMIP5, RCP4.5)	PROYECCIÓN DE LARGO: 2081 – 2100 PERIODO DE REFERENCIA: 1986 - 2005	+0.3°C a +1.7°C (CMIP5, RCP2.6) +2.6°C a +4.8°C (CMIP5, RCP8.5)	(IPCC, 2013)
		OCÉANO		Top 100m: más caliente (CMIP5, all RCPs)		Top 100m: +1°C (RCP2.6) a +3°C (RCP8.5)	(IPCC, 2013)
	PRECIPITACIÓN	PATRONES		-7% a +22% (CMIP5, RCP4.5)		+0.5 a 4%/°C (CMIP5, RCP4.5)	(IPCC, 2013)
		TEMPERATURA		Días anuales cálidos: 20-30% (CMIP5, RCP8.5) Días anuales fríos: 3.0-6.0% (CMIP5, RCP8.5)		Días anuales cálidos: 55-70% (CMIP5, RCP8.5) Días anuales fríos: 0.5-1.0% (CMIP5, RCP8.5)	(IPCC, 2013)
	EVENTOS EXTREMOS	PRECIPITACIÓN		Incremento en alta precipitación (CMIP5) Extremos diarios locales: +5 a +10°C de calentamiento		+5% (RCP2.6) a +20% (RCP8.5)	(IPCC, 2013)
		CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA		Aumento de la intensidad de los huracanes en el Atlántico Norte		Aumento de la frecuencia de huracanes tropicales de categoría 4-5 en el Atlántico Norte y suroeste del Pacífico	(IPCC, 2013)
NIVEL DEL MAR		Aumento del nivel del mar (rango variable según RCP)	Aumento del nivel del mar (rango variable según RCP)	(IPCC, 2013)			
AGUA	CAMBIO CLIMÁTICO	CRIÓSFERA					
		• EXTENSIÓN HIELO MARINO	Ártico libre de hielo en septiembre de 2037	Hemisferio Norte: -8% (RCP2.6) a -34% (RCP8.5) en Feb Hemisferio Norte: -43% (RCP2.6) a -94% (RCP8.5) en Sep Hemisferio Sur: -16% (RCP2.6) a -67% (RCP8.5) en Feb Hemisferio Sur: -8% (RCP2.6) a -30% (RCP8.5) en Sep	(IPCC, 2013)		
		• EXTENSIÓN COBERTURA NIEVE	Hemisferio Norte: Media Marzo a Abril: -5.2%±1.9% (RCP2.6) a -6.0%±2.0% (RCP8.5)	Hemisferio Norte: Media Marzo a Abril: -7%±4% (RCP2.6) a -25%±8% (RCP8.5)	(IPCC, 2013)		
		• PERMAFROST	Área de permafrost cerca de la superficie. Media anual: -21% ± 5% (RCP2.6) a -20% ± 5% (RCP8.5)	Área de permafrost cerca de la superficie. Media anual: -37%±11% (RCP2.6) a -81%±12% (RCP8.5)	(IPCC, 2013)		
	EVAPORACIÓN	De forma general: +1 a +3% para grado de incremento Aumenta en la mayor parte de los océanos. Aumenta o disminuye en tierra siguiendo el patrón de precipitaciones			(IPCC, 2013)		
	TEMPERATURA	NIVEL DEL MAR	Proyecciones: 2081 – 2100. Periodo de referencia: 1986 - 2005				
• GLOBAL		0.40 [0.26 a 0.55] m (RCP2.6) a 0.63 [0.45 a 0.82] m (RCP8.5) en el periodo 2081-2100)			(IPCC, 2013)		
	• EXPANSIÓN TÉRMICA	0.14 [0.10 a 0.18] m (RCP2.6) a 0.27 [0.21 a 0.33] m (RCP8.5) (30 a 55% del aumento total)			(IPCC, 2013)		

IMPACTOS		PROYECCIONES / TENDENCIAS		REFERENCIA
		• DERRETIMIENTO GLACIARES	0.10 [0.04 a 0.16] m (RCP2.6) a 0.16 [0.09 a 0.23] m (RCP8.5) (15 a 35% del aumento total)	(IPCC, 2013)
	PRECIPITACIÓN	INUNDACIONES	Sin tendencia mundial general	(IPCC, 2013)
		SEQUÍAS	Baja confianza en la magnitud de los impactos futuros. Aumentarán las sequías meteorológicas en el Mediterráneo, América Central, Brasil, Sudáfrica y Australia. Disminuirá en latitudes septentrionales altas.	(IPCC, 2013)
		CORRIENTES	Tendencia general: disminución en la primavera y aumento de los caudales en invierno	(California Climate Change Center, 2006)
		SALINIDAD	La salinidad superficial del mar. Regiones subtropicales y Atlántico más salinas. Altas latitudes y Pacífico Norte menos salinas.	(IPCC, 2013)
RECURSOS ENERGÉTICOS	CAMBIO CLIMÁTICO	VIENTO	"Ganadores" y "perdedores": regiones donde la energía eólica puede mejorar y regiones donde la energía eólica puede verse afectada negativamente Período de referencia: 1964 - 2000 Velocidad del viento EE.UU. Verano: -5-10% (recurso eólico: -40%). Invierno: es posible que aumente ligeramente	(Pryor and Barthelmie, 2010)
			Período de referencia: 1948 - 1978 Velocidad viento EE.UU. Continental. -1.0 a -3,2% en los próximos 50 años. -1.4 a -4,5% en los próximos 100 años	(Sailor et al., 2008)
			Período de referencia: 1980 - 2000 Región del Mar Báltico. Potencial de la energía eólica: + 15% Irlanda. Potencial de energía eólica. Invierno: + 4.8%. Verano: disminución Reino Unido. Velocidades del viento. Verano: -5% (-15% en Irlanda del Norte). Invierno: aumento Mediterráneo oriental. Velocidades del viento: Aumenta en tierra y disminuye en el mar. Notable aumento sobre el mar Egeo	(Breslow and Sailor, 2002)
				(Mideksa and Kallbekken, 2010)
		BIOENERGÍA	Brasil. Proyecciones: 2005-2030. Período de referencia: 1980-2000 Caña de azúcar. Rendimiento del cultivo: + 7% (de 77 a 82t / ha) Biodiesel. Cambio de las zonas de cultivo adecuadas para los cultivos de semillas oleaginosas, de noreste a sur	(de Lucena et al., 2009b)
		OLAS Y MAREAS	Relación de viento - energía de las olas +20% en la velocidad media del viento implica un aumento en la altura de las olas en torno al 44%, y un aumento en los niveles de energía disponibles en un 133% -20% en la velocidad media del viento disminuye los niveles de energía disponibles en un 67%	(Harrison and Wallace, 2005)
		COMBUSTIBLES FÓSILES	El acceso se verá afectado por el cambio climático. Carbón. Un aumento en la precipitación disminuye su calidad	(Williamson et al., 2009)
	AGUA	ESCORRENTÍAS	Proyecciones: 2050. Período de referencia: 1900-1970 +10 a +40% en el este de África ecuatorial, cuenca de La Plata y latitudes altas de Norteamérica y Eurasia -10 a -30% en el sur de África, el sur de Europa, el Medio Oriente y latitudes medias de Norteamérica	(Milly et al., 2005)
			De 44.854 bmc (en 2010) a 52.829 bmc (en 2100)	(MIT, 2014)
D	TEMPERATURA	DEMANDA CALEFACCIÓN	+ 0,8% anual entre 2000 y 2030, y después de disminuye lentamente. -34% en todo el mundo para el 2100	(Isaac and van Vuuren, 2009)

IMPACTOS		PROYECCIONES / TENDENCIAS	REFERENCIA	
	DEMANDA REFRIGERACIÓN	De 1900 kWh (en 2000) a 4.800 kWh (en 2100). + 7% al año entre 2020 y 2030. Luego, + 1% al año hasta el final del siglo + 70% mayor que la demanda proyectada sin cambio climático	(Isaac and van Vuuren, 2009)	
	INDUSTRIA	Estados Unidos. Consumo de energía por unidad de producción industrial: + 0.0127% de aumento cada 1 HDD o + 0.0032% por incremento de 1 CDD Base anual: -6.2% la demanda de energía (un ahorro de 0,0422 EJ) Uso de agua: +45%, de 763 bcm (2010) a 1098 bcm (2100)	(Wilbanks et al., 2008)	
	AGRICULTURA	-10%, de 1551 bcm (2010) a 1389 bcm (2100)	(MIT, 2014)	
	AGUA	Extracción de agua (B2 escenario): de 2498 bcm (1995) a 2341 bcm (2025), a 2256 bcm (2055) y 2211 bcm (2075)	(Alcamo et al., 2007)	
	USO DOMÉSTICO	+100%, de 348 bcm (2010) a 698 bcm (2100)	(MIT, 2014)	
OFERTA	EFICIENCIA			
	TEMPERATURA	• SOLAR	El aumento de la temperatura del aire puede modificar la eficiencia de las células fotovoltaicas y en última instancia reducir la generación eléctrica PV	(Fidje and Martinsen, 2006)
		• PLANTAS TÉRMICAS	Con + 1 ° C: potencia nuclear -0,8%. Output de carbón y gas -0,6% EEUU: reducción de 1% en la generación de electricidad significa una caída de la oferta de 25 mil millones de kWh	(Mideksa and Kallbekken, 2010)
		• TRANSMISIÓN	Red eléctrica de California. -7-8% Capacidad de la línea de transmisión y -2-4% de la capacidad de la subestación debido a + 5 ° C (2100)	(U.S. Department of Energy, 2013)
	AGUA	REFRIGERACIÓN	-0.45% potencia de salida cada +1°C Entre 2010 y 2035: la extracción de agua: + 20%; el consumo de agua: + 85%	(Mideksa and Kallbekken, 2010) (IEA, 2012)
		HIDRO	Impactos de las inundaciones: Posible cierre de la operación de la turbina o incluso la destrucción de las plantas de energía y / o presas	-
	EVENTOS EXTREMOS	EÓLICA	Estresada por velocidades extremas de viento (25 m/s), la tensión en la turbina puede llegar a ser demasiado alta, y podría provocar daños graves	-
		BIOCOMBUSTIBLES	Reducción de la productividad de las cosechas por sequías, heladas, temperaturas extremas y precipitaciones Destrucción de los equipos de producción de biocombustibles por las tormentas y ciclones	-
		PLANTAS TÉRMICAS	Reactores Interiores: Olas de calor (reducción de la generación de energía) e inundaciones tierra adentro (daño de las instalaciones auxiliares) Reactores costeros. Subida del nivel del mar (inundaciones, erosión)	(Kopytko and Perkins, 2011)
		COMBUSTIBLES FÓSILES	Aumento de las paradas de producción para evitar daños al medio ambiente	(Burkett, 2011)
		TRANSMISIÓN	Daños en la infraestructura de la red eléctrica por fenómenos meteorológicos extremos y la descongelación del permafrost	-
		TRANSFERENCIA	Interrupción de transporte de petróleo crudo, productos derivados del petróleo y carbón, debido a la disminución de los niveles de agua (sequías)	(U.S. Department of Energy, 2013)
		HIDRO	EE.UU. Río Colorado: -40% producción de energía hidroeléctrica a mediados del siglo XXI EE.UU. Valle Central: -10 a -12% producción de energía hidroeléctrica	(Mideksa and Kallbekken, 2010)

IMPACTOS		PROYECCIONES / TENDENCIAS	REFERENCIA
RECURSOS ENERGÉTICOS		+ 0.08% de la generación total, +2.46 TWh respecto a la generación actual, alcanzando 2,931 TWh (2050)	(Hamududu and Killingtveit, 2012)
	VIENTO	Parques eólicos marinos de todo el Mar del Norte: + 3.9% debido a los aumentos en las velocidades del viento	(Mideksa and Kallbekken, 2010)
		Estados Unidos Continental: -30 a -40% de generación de energía eólica debido a un -10 a -15% en las velocidades de viento	(Breslow and Sailor, 2002)
	BIOCOMBUSTIBLES	La magnitud de generación de energía a partir de biocombustibles depende de la disponibilidad de recursos	-
SOLAR	Proyecciones: período 2071-2100. Referencia: 1980-2000 -6% producción de electricidad debido a -2% radiación solar (2071-2100)	(Fidje and Martinsen, 2006)	
CAMBIO CLIMÁTICO	MITIGACIÓN	-40 a -70% de las emisiones de GEI en 2050 respecto a 2010 para llegar a 450 ppm CO ₂ eq en 2100 (+ 2 ° C con respecto a nivel preindustrial) -25 a -55% de las emisiones de GEI en 2050 respecto a 2010 para llegar a 500 ppm CO ₂ eq en 2100 -5 a -45% De emisiones de GEI en 2050 respecto a 2010 para llegar a 550 ppm CO ₂ eq en 2100 Para alcanzar 450 ppm CO ₂ eq en 2100: mejoras en la eficiencia, triplicando o cuadruplicando la cuota de suministro de energía cero emisiones de carbono para el año 2050	(IPCC, 2015)

Nota: (-) significa que no hay un documento específico de referencia

Tabla 35: Medidas de adaptación para la oferta y demanda energética ante el cambio climático (ámbito global).

ÁMBITO		MEDIDAS DE ADAPTACIÓN
DEMANDA	Usos finales de electricidad	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Aumentar la generación (MWh) y la capacidad instalada (MW) ➤ Mejorar la eficiencia energética del suministro energético ➤ Mejorar la eficiencia en el uso final de los edificios, instalaciones, dispositivos y maquinaria ➤ Reducir la necesidad de refrigeración; aumentar la eficiencia de enfriamiento y disminuir las ganancias de calor internas ➤ Implementar tecnologías de almacenamiento de energía que ayuden a aplanar la curva de demanda ➤ Exigir estándares mínimos de eficiencia energética de los nuevos edificios comerciales ➤ Exigir el etiquetado y la certificación de una amplia gama de aparatos eléctricos ➤ Desarrollar legislación y mejorar el acceso a la financiación para las empresas de servicios energéticos ➤ Establecer normas mínimas para los motores eléctricos industriales ➤ Considerar programas subsidiados para la sustitución masiva de las luces incandescentes, y la sustitución de viejos refrigeradores ineficientes por modelos más eficientes
		OFERTA
	Eólica	

ÁMBITO		MEDIDAS DE ADAPTACIÓN
OFERTA	Solar	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Garantizar que las estructuras son lo suficientemente fuertes como para soportar rachas de viento más fuertes ➤ Especificar estructuras de montaje capaces de soportar ráfagas de viento fuerte, así como características del cableado y los componentes para altos contenidos de humedad ➤ Especificar los componentes de las células fotovoltaicas resistentes al calor y diseñar módulos capaces de soportar picos cortos de muy alta temperatura ➤ Usar diseños que mejoren el flujo de aire pasivo bajo las estructuras de montajes fotovoltaicos ➤ Optar por paneles de superficie rugosa en zonas donde se prevea un aumento de la capa de nubes ➤ Cuando se espere un aumento de la intermitencia en la capa de nubes, considerar micro-inversores para cada panel pues mejoran la estabilidad y aumentan la potencia de salida ➤ Considerar sistemas distribuidos que pueden mejorar la estabilidad de la red ➤ Diseñar sistemas solares de seguimiento para CSP especialmente robustos ante vientos fuertes ➤ Evitar los sistemas de seguimiento en zonas con riesgo de huracanes (CSP) ➤ Considerar refrigeración por aire forzado y líquida en zonas donde se espere un aumento de temperatura (CSP) ➤ Usar refrigeración por aire en zonas donde se espera menos disponibilidad de agua (CSP) ➤ Usar colectores de tubos de vacío ya que no sufren de problemas de temperatura ambiente ➤ Desarrollar métodos de predicción climática basados en datos meteorológicos ➤ Disponer de equipos de reparación móviles que garanticen el funcionamiento de los sistemas tras fenómenos extremos
	Biomasa y biocombustibles	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Ampliar los sistemas de riego o mejorar la eficiencia de riego existente para contrarrestar los efectos de las sequías ➤ Utilizar fuentes no convencionales si no hay disponibilidad de recursos hídricos convencionales ➤ Proteger contra las inundaciones mediante la construcción de diques y mejorar el drenaje ➤ Ampliar la recogida de aguas pluviales, las técnicas de almacenamiento y conservación del agua, la reutilización del agua y la desalinización ➤ Mejorar la gestión del suelo y de nutrientes ➤ Aumentar la robustez de las plantas de energía de biomasa ➤ Introducir prácticas de conservación de la humedad del suelo para mejorar la fertilidad del suelo ➤ Reubicar, cuando sea posible, los cultivos en zonas con menor riesgo de inundaciones y tormentas ➤ Implementar sistemas de alerta temprana de las lluvias estacionales y las anomalías de temperatura ➤ Apoyar la recolección de emergencia de la biomasa en caso de un evento extremo inminente ➤ Proporcionar esquemas de seguros de cosechas ➤ Mejorar el control de plagas y enfermedades vinculadas al cambio climático ➤ Mejorar la gestión de los ecosistemas
	Olas y mareas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Diseñar dispositivos capaces de resistir olas extremas ➤ Para los sistemas de anclaje, utilizar diseños orientados en la dirección de las olas en lugar de a través del frente de ola, para reducir la vulnerabilidad a las tensiones severas ➤ Considerar mecanismos de protección contra las tormentas ➤ Mejorar los diseños de tuberías de aguas profundas para soportar mayores tensiones

ÁMBITO		MEDIDAS DE ADAPTACIÓN
OFERTA	Plantas termoeléctricas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Desarrollar e implementar altos estándares estructurales para edificios nuevos o renovados ➤ Optar preferentemente por construcciones de hormigón en lugar de metal, ya que son más resistentes al viento y a la corrosión ➤ Elevar el nivel de las estructuras ➤ Donde es probable que aumenten las inundaciones, implementar diques y presas de contención ➤ Construir mejoras en las defensas costeras (diques y mamparos) ➤ Mejorar el drenaje ➤ Proteger los tanques de combustibles ➤ Cambiar el sistema de refrigeración de un solo paso a otros de circuito cerrado ➤ Rediseñar las instalaciones de refrigeración: usar intercambiadores de calor por condensación, reducir las pérdidas por evaporación, aumentar el uso secundario de aguas residuales y construir torres de enfriamiento en seco ➤ Aumentar el volumen de tratamiento de agua ➤ Instalar torres de refrigeración adicionales y modificar las entradas de agua de refrigeración en lugares costeros ➤ Utilizar cuando sea posible sistemas secos o de refrigeración híbrida ➤ Desarrollar bombas e intercambiadores de calor más eficientes ➤ Elegir mejores lugares (lugares menos expuestos) para construir nuevas centrales térmicas ➤ Formular estrategias a largo plazo para responder a las perturbaciones relacionadas con el clima
	Extracción y procesado de combustibles fósiles	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Construir o ampliar reservas de agua para reducir el riesgo de inundaciones en desarrollos mineros tanto nuevos como existentes ➤ Construir edificios robustos ante inundaciones ➤ Considerar la refrigeración por aire como una alternativa a la refrigeración por agua ➤ Construir o mejorar diques y aliviaderos en tierra ➤ Construir o ampliar las reservas de agua ➤ Desarrollar o redirigir las fuentes de agua ➤ Mejorar la robustez de los diseños, especialmente en alta mar, ante la vulnerables a las tormentas ➤ Llevar a cabo evaluaciones periódicas del riesgo de inundación ➤ Mejorar los modelos utilizados para predecir tormentas
	Transmisión, distribución y transferencia de electricidad	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reforzar las estructuras de T & D existentes y construir sistemas de distribución subterránea ➤ Dónde se esperan vientos fuertes, fortalecer los polos de distribución con cables de retención ➤ Dónde se espera un aumento de tormentas eléctricas, incluir protección contra rayos ➤ Diseñar sistemas de refrigeración más eficaces para subestaciones y transformadores ➤ Mejorar los diseños de las medidas de protección contra inundaciones en las infraestructuras ➤ Desarrollar redes inteligentes ➤ Reducir la presión en la red a través de generación y distribución de energía descentralizada

Tabla 36: Tabla resumen del cambio climático y sus impactos en el sistema energético español

IMPACTOS		PROYECCIONES/TENDENCIAS	REFERENCIA
CAMBIO CLIMÁTICO	TEMPERATURA	GMST Período Proyecciones: 2071-2100. Período de referencia: 1971-2000 Sur: + 2,0 ° C [1,9-3,2] (RCP4.5) + 4,2 ° C [3,8-5,7] (RCP8.5) Atlántico: + 1,7 ° C [1,3-2,9] (RCP4.5) + 3,2 ° C [2,5-4,2] (RCP8.5) + 0,4 ° C / década en invierno. + 0,7 ° C / década en verano + 5-7 ° C en invierno + 3-4 ° C en verano para el año 2100	(Jacob et al., 2014)
		OCÉANO +2°C (21.7°C) en 2100	("Home - Climate Adaptation," n.d.) (IDDR, 2009)
		AGUA Período de referencia: 1971-2000 0,8 a + 1,0 ° C en 2031-2060. 1,4 a + 2,3 ° C en 2071-2100	("Home - Climate Adaptation," n.d.)
	PRECIPITACIÓN	PATRÓN DE PRECIPITACIONES Período Proyecciones: 2071-2100. Período de referencia: 1971-2000 Sur: -6% [-11 a -2] (RCP4.5) -10% [-27 a 0] (RCP8.5) Atlántico: + 1% [-1 a 9] (RCP4.5) + 4% [-2 a 9] (RCP8.5) 2011-2040: -5% en el centro, N y E. -10% en SO 2070-2100: -15% -25% en el centro y N. -20% -30% en el S 2100: -6% -14% de Andalucía y Cataluña. + 14% frontera francesa 2050: -20% en verano; -30% en invierno en los Pirineos	(Jacob et al., 2014)
		TEMPERATURA Período Proyecciones: 2071-2100. Período de referencia: 1971-2000 Días cálidos por año: +34 [28-83] (RCP4.5) +124 [90-186] (RCP8.5) Días fríos al año: -5 [-3 a -6] (RCP4.5) -5 [-3 a -6] (RCP8.5) País Vasco: -50% días de heladas en 2100 Episodios de gota fría: desaparecen después de 2020 Olas de calor. Número de días de verano: 16% en el año 2050; 22% en 2100	(Jacob et al., 2014)
		PRECIPITACIÓN Período Proyecciones: 2071-2100. Período de referencia: 1971-2000 Sur: + 36% [23 a 62] (RCP4.5) + 49% [30 a 65] (RCP8.5) Atlántico: + 36% [20 a 73] (RCP4.5) + 71% [48 a 118] (RCP8.5)	("Home - Climate Adaptation," n.d.) (Jacob et al., 2014)
	EVENTOS EXTREMOS	CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Período Proyecciones: 2071-2100. Período de referencia: 1961-2000 Cambios relativos del potencial promedio anual de pérdidas por tormenta + 2.4% en velocidades máximas de viento por el NO para 2100 Los huracanes tropicales podrían convertirse en una seria amenaza para la UE occidental	(van der Linden and Mitchell, 2009) ("Home - Climate Adaptation," n.d.)

IMPACTOS		PROYECCIONES/TENDENCIAS		REFERENCIA
AGUA	CAMBIO CLIMÁTICO	CRIÓSFERA	La capa de nieve disminuye Pirineos: 90% del hielo de los glaciares ya se perdieron. El resto puede desaparecer en unas décadas	("Home - Climate Adaptation," n.d.)
		EVAPORACIÓN	-15% a -25% de humedad del suelo durante el verano +15% evapotranspiración a + 20% hasta el 2100	(Karas, 1997) ("Home - Climate Adaptation," n.d.)
	TEMPERATURA	NIVEL DEL MAR	Periodo Proyecciones: 2.081-2.100. Período de referencia: 1986-2005 +0,29 a +0,55 (RCP2.6) +0,36 a +0,63 (RCP4.5) +0,37 a +0,64 (RCP6.0) +0,48 a +0,82 (RCP8.5)	(Field, 2014)
			Costa atlántica: + 15cm en 2050. 50 a + 100 cm para el año 2100	("Home - Climate Adaptation," n.d.)
			Mediterráneo: 18 a + 59cm para el 2100	(IDDRI, 2009)
	PRECIPITACIÓN	INUNDACIONES	Inundaciones de invierno: 5 veces más frecuentes	(Gobiet et al., 2014)
		SEQUÍAS	Periodo Proyecciones: 2071-2100. Período de referencia: 1971-2000 + 4,7% (B1) / 4,7% (A2) número de eventos de sequía + 89,9% (B1) / + 143.1% (A2) duración media + 375,2% (B1) / + 467.4% (A2) Volumen déficit medio	(Gobiet et al., 2014)
		CAUDALES	-5% a -14% en 2030; -17% en 2060; -20% a -22% en 2100 -70% de recarga potencial de las aguas subterráneas para 2050 -15% a -20% de recursos hídricos en Pirineos 2050 -25% a -35% en recursos hídricos del Valle del Ebro en 2050	("Home - Climate Adaptation," n.d.)
			Los recursos hídricos. Período de referencia: 1961-1990 -16% (A2) / -21% (B2) 2011-2040 -23% (A2) / -19% (B2) 2040-2.070 -34% (A2) / -20% (B2) desde 2071 hasta 2100	(CEDEX, 2010)
	RECURSOS ENER.	CAMBIO CLIMÁTICO	VIENTO	Antes de 2050: no hay cambios significativos Después de 2050: disminución de la energía eólica tanto en invierno como en verano
BIOENERGÍA			% Del total de tierras aptas para el cultivo de biocombustibles Semillas oleaginosas: 70% (1990) -5 a -15% (2020-2050-2080) Caña de azúcar: 10% (1990) -5 a -15% (2020-2050-2080) Maíz: 75% (1990) -5 a -15% (2020-2050-2080)	(Tuck et al., 2006)
ESCORRENTÍA		Período de referencia: 1971-2000 -13% a -15% para 2.031-2060. -16% a -23% para 2071 a 2100 Aumento de la escorrentía en invierno, disminución de la escorrentía en primavera Período de referencia: 1961-1990 -8% (A2) / -8% (B2) 2011-2040	("Home - Climate Adaptation," n.d.) (CEDEX, 2010)	

IMPACTOS		PROYECCIONES/TENDENCIAS	REFERENCIA
	AGUA	-16% (A2) / -11% (B2) 2040-2.070 -28% (A2) / -14% (B2) 2.071-2100	
DEMANDA	TEMPERATURA	-10% demanda de energía en 2030 Referencia: escenarios propios	("Home - Climate Adaptation," n.d.)
		DEMANDA DE CALOR Frío / escenario húmedo: -9% en 2030 / -19% en 2050 / -9% en 2010-2050 Escenario medio: -8% en 2030 / -19% en 2050 / -8% en 2010 hasta 2050 Escenario cálido / seco: -16% en 2030 / -28% en 2050 / -16% en el 2.010 hasta 2.050 Reducción de emisiones: -14% en 2030 / -9% en 2050 / -9% en 2010-2050	(Dowling, 2013)
	DEMANDA DE REFRIGERACIÓN	+50% demanda de electricidad en 2080s +114% demanda de electricidad en Madrid en 2070s Referencia: escenarios propios Frío / escenario húmedo: 17% en 2030/ 39% en 2050/ 14% en 2010-2050 Escenario medio: 25% en 2030/ 52% en 2050/ 22% en 2010 hasta 2050 Escenario cálido: 28% en 2030/ 66% en 2050/ 30% en 2010-2050 Reducción de emisiones: 27% en 2030/ 38% en 2050/ 28% en 2010-2050	("Home - Climate Adaptation," n.d.) (Dowling, 2013)
	AGRICULTURA	-70mm/año de necesidades de riego netas en la década de 2020 en el oeste de España	(Field, 2014)
OFERTA	TEMPERATURA	EFICIENCIA	
		• SOLAR PV 2010-2080 es probable que aumente en un pequeño porcentaje CSP es probable que aumente en más de un 10%	("Home - Climate Adaptation," n.d.)
	• TÉRMICA	+ 1 ° C de temperatura ambiente mensual implica -0,7% producción en centrales nucleares	("Home - Climate Adaptation," n.d.)
	AGUA	REFRIGERACIÓN Periodo Proyecciones: desde 2031 hasta 2060. Período de referencia: 1971-2000 -6% a -19% capacidad promedio en verano	(Field, 2014)
	RECURSOS ENERGÉTICOS	HIDRO La producción de electricidad -5% a -15% (2050 frente a 2005) -1.82% TWh en 2050 (-1.79TWh, alcanzando 96,60 TWh)	(Field, 2014) (Hamududu and Killingtveit, 2012)
	VIENTO	El potencial de la energía eólica probablemente no se verá afectado	("Home - Climate Adaptation," n.d.)
	BIOCOMBUSTIBLE	+ 400% consumo de agua en 2030 (Escenario: Referencia Mix) + 1600% consumo de agua en 2030 (Escenario: Biocombustibles Mix)	(Rio Carrillo and Frei, 2009)

IMPACTOS		PROYECCIONES/TENDENCIAS	REFERENCIA
CAMBIO CLIMÁTICO	MITIGACIÓN	Reducción doméstica -40% de gases de efecto invernadero en 2030 respecto a 1990	(European Council, 2014)



Santa Cruz de Marcenado, 26

28015 Madrid

Tel +34 91 542 28 00

Fax + 34 91 542 31 76

secretaria.tecnica@iit.comillas.edu

www.iit.comillas.edu