

Informe d'abast i metodologia

Impactes i vulnerabilitats del canvi climàtic a Andorra

Sector energia

Equip de treball

Patrícia Borges Investigadora d'Andorra Recerca + Innovació
Marta Domènech Investigadora d'Andorra Recerca + Innovació
Oriol Travesset Coordinador de l'eix Sostenibilitat d'Andorra Recerca + Innovació

Andorra Recerca + Innovació agraeix el finançament rebut per part de l'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic d'Andorra en el marc de l'estudi d'impactes i vulnerabilitats del canvi climàtic i la capacitat d'embornal d'Andorra



Informe preliminar



Aquesta obra està subjecta a una llicència de [Reconeixement 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Resum

El sector de l'energia és clau tant en les polítiques de mitigació com d'adaptació al canvi climàtic. En aquesta segona línia, disposar d'un coneixement exhaustiu a escala local dels riscos que comporta el canvi climàtic és essencial per fer més resilients els sistemes energètics.

Aquest informe presenta l'abast i la metodologia de l'estudi d'impactes i vulnerabilitats del canvi climàtic en el sector de l'energia a Andorra, amb un enfocament específic en els riscos en l'abastiment i la demanda d'energia. L'estudi pretén contribuir a millorar la resiliència climàtica d'un sector estratègic pel país com és el de l'energia, a través de l'establiment d'indicadors nacionals per avaluar els efectes i la capacitat d'adaptació al canvi climàtic del sector energètic.

Una de les tasques més rellevants d'aquest estudi es centra en la modelització conjunta del sistema energètic i el recurs hídic d'Andorra. S'espera que el model resultant sigui una eina de referència en la planificació energètica i climàtica d'Andorra, permetent, entre altres, projectar a futur els indicadors d'avaluació establerts i quantificar l'impacte de diferents mesures d'adaptació proposades.

Sumari

1.	Introducció	5
1.1	Canvi climàtic i seguretat energètica.....	5
1.2	Canvi climàtic i seguretat energètica a Andorra.....	8
1.2.1	Impactes en l'abastiment d'energia.....	9
1.2.2	Impactes en la demanda d'energia.....	13
1.3	Resiliència climàtica del sector energètic.....	16
1.3.1	Estratègies d'adaptació.....	18
2.	Abast de l'estudi	23
2.1	Objectius.....	24
2.2	Actors clau.....	24
2.3	Entitats col·laboradores externes.....	24
3.	Pla de treball	26
3.1	Definició d'indicadors de vulnerabilitat, exposició i impacte.....	26
3.2	Modelització conjunta del sistema energètic i el recurs hídic.....	27
3.3	Càlcul d'indicadors d'impacte, vulnerabilitat i exposició.....	28
3.4	Definició d'indicadors d'adaptació.....	29
3.5	Càlcul d'indicadors d'adaptació.....	29
	Referències	31

1. Introducció

El sector de l'energia és un actor clau en la lluita contra el canvi climàtic, no només per la seva contribució en l'emissió de gasos d'efecte d'hivernacle (GEH), sinó també per la seva exposició i vulnerabilitat envers la variabilitat climàtica (Londoño Pineda et al., 2019). El canvi climàtic suposa un risc per la seguretat energètica mundial, amenaçant els recursos disponibles i el subministrament de combustibles. En aquest sentit, una comprensió exhaustiva dels efectes del clima sobre l'abastiment i la demanda d'energia és crucial per fer més resilents els sistemes energètics.

1.1 Canvi climàtic i seguretat energètica

El canvi climàtic afecta directament molts dels àmbits del sistema energètic, des de l'extracció, processament i transport de combustibles i minerals, fins al potencial, l'eficiència i la fiabilitat de la generació d'energia, la resiliència de la infraestructura energètica, així com als patrons de demanda d'energia (IEA, 2022a).

Schaeffer et al. (2012) agrupen en sis els principals impactes que el canvi climàtic pot tenir sobre el sector energètic.

- **Impactes en la disponibilitat de recursos.** La disponibilitat de recursos d'un país o regió són fonamentals en la planificació energètica. Així mateix, el context de transició energètica obliga a incrementar la generació a través de fonts d'energia renovables, altament dependents del clima. Es preveu que els canvis futurs en el clima tinguin impactes en la disponibilitat d'aigua, la capacitat de produir biocombustibles, la irradiació solar, el vent i les mareas. Val a dir que, en funció de la regió i recurs, aquests impactes poden ser negatius o positius. Pel que fa als combustibles fòssils, tot i que el canvi climàtic no té impactes sobre l'estoc de recursos, pot facilitar o dificultar, segons els casos, l'accés a aquests.
- **Impactes en el subministrament d'energia.** Les instal·lacions de transformació d'energia primària a energia final poden veure's impactades pel canvi climàtic de diverses maneres, afectant la capacitat dels sistemes per subministrar energia als consumidors finals. Els canvis previstos en l'hidrograma dels rius afectaran l'operació d'instal·lacions hidroelèctriques existents així com la viabilitat de futurs projectes. En la mateixa línia, el context de canvi climàtic afegeix encara més incertesa a la planificació i operació de la generació èdica. A banda dels impactes d'esdeveniments extrems, el subministrament a través d'energia solar, tant fotovoltaica com tèrmica, es pot veure afectat per l'augment de la temperatura de l'aire, modificant l'eficiència dels sistemes i reduint així l'aportació d'energia final. Altres instal·lacions de transformació identificades per Schaeffer et al. (2012) com a vulnerables front al canvi climàtic

són la producció de biocombustibles líquids, les centrals tèrmiques (de carbó, gas natural, nuclear, geotèrmica i biomassa) i l'abastiment de petroli i gas natural.

- **Impactes en la distribució i el transport.** La infraestructura de transport i distribució elèctrica és, generalment, la més vulnerable a esdeveniments extrems que podrien ser més freqüents amb el canvi climàtic. Els fenòmens meteorològics susceptibles de causar fallades en les línies elèctriques inclouen vents extrems, càrregues de gel, llamps, allaus, esllavissades i inundacions. Les temperatures extremes poden causar també fallades en els transformadors de les subestacions elèctriques (p. ex. onada de calor l'any 2006 en diferents àrees dels Estats Units).
- **Impactes en l'ús de l'energia.** Els impactes del canvi climàtic en el sector energètic no es limiten a l'abastiment, sinó que també tenen un impacte en l'ús final d'energia que es pot veure afectat per les variacions de temperatura així com pels canvis en els patrons de precipitació. A escala global, els efectes més directes en l'ús de l'energia són la disminució de la demanda de calefacció i l'increment de la demanda de refrigeració degut al ja observat augment de les temperatures. Addicionalment, el rendiment d'equips tèrmics es pot veure afectat per les variacions de les temperatures. Els impactes en l'ús d'energia varien significativament entre diferents zones del planeta i, per tant, són necessaris estudis regionals per donar suport a les autoritats locals a fer front a les variacions en l'ús d'energia.
- **Impactes en les infraestructures.** L'increment en la freqüència i la intensitat d'esdeveniments extrems augmenta la vulnerabilitat de les infraestructures energètiques existents. En aquest sentit, el canvi climàtic no només pot comprometre l'abastiment d'energia sinó també incrementar-ne els costos futurs (p. ex. en la necessitat de reparació i substitució d'equips). La pujada del nivell del mar així com la fusió del permafrost representen també un risc important per les infraestructures energètiques.
- **Impactes intersectorials.** Els impactes del canvi climàtic sobre els sistemes energètics poden tenir efectes indirectes sobre altres sistemes econòmics/naturals. Així mateix, els impactes sobre aquests últims poden afectar l'oferta i la demanda d'energia. Un dels grans reptes a l'hora d'avaluar els impactes del canvi climàtic és fer-ho de manera integrada per tenir plenament en compte les múltiples interrelacions complexes no només dins del sector energètic, sinó també amb altres sectors. Dos dels principals impactes intersectorials del canvi climàtic sobre l'energia són la competència pels recursos hídrics (en la generació d'electricitat, el refinat del petroli i el reg de cultius energètics) i la competència pel sòl (en la producció de biocombustibles).

De forma més resumida, l'IEA (2022a) agrupa els efectes del canvi climàtic en impactes sobre l'abastiment i sobre la demanda d'energia.

Pel que fa a l'abastiment, posa el focus en l'extracció, processat i transport de combustibles i minerals, així com en el sector elèctric. L'augment de la temperatura agreuja la freqüència i la magnitud dels incendis forestals que poden condicionar la producció de petroli i gas, a més d'afectar la producció de les regions àrtiques a causa de la fusió del gel i la descongelació del permafrost. Les onades de calor podrien afegir estrès a la liqüefacció de l'hidrogen, que requereix temperatures baixes, i a les canonades de combustible, la qual cosa podria provocar la seva expansió i augmentar el risc de ruptura. Els perills relacionats amb les precipitacions com les inundacions i les sequeres són especialment problemàtics per als recursos d'esquist, la mineria del carbó, l'extracció de minerals, la producció de biocombustibles i el transport fluvial. Els ciclons tropicals, juntament amb l'augment del nivell del mar, podrien suposar un risc per a les instal·lacions de producció i transport de petroli i gas costaners.

El sector elèctric representa aproximadament el 20% del consum d'energia global i, en un context de transició energètica, s'espera que aquest percentatge incrementi de forma significativa (IEA, 2021). El canvi climàtic fa més vulnerable el sector elèctric, principalment per les variacions en la disponibilitat de recursos i pel risc de fallida de les xarxes elèctriques degut a l'increment d'esdeveniments extrems (p. ex. onades de calor, sequeres, pluges torrencials) i als riscos naturals derivats (p. ex. incendis forestals, ciclons, inundacions).

Tal com s'ha esmentat anteriorment, els principals impactes de l'escalfament global sobre la demanda es preveuen en les variacions en els usos de calefacció i refrigeració dels edificis. L'augment en l'ús d'electricitat durant les hores punta dels mesos d'estiu suposarà una tensió extra a les xarxes elèctriques. Addicionalment, tot i que amb una major incertesa, es preveuen canvis en la demanda de la indústria (p. ex. major demanda de fertilitzants, ciment, ferro i acer) i el transport. En aquest últim sector, l'IEA (2022a) alerta del possible increment de la demanda de l'aviació i del transport per carretera degut a l'augment de les temperatures globals, les onades de calor més freqüents i els esdeveniments meteorològics extrems.

De Cian & Sue Wing (2019) estimen l'increment de la demanda d'energia global entre el 7-17% l'any 2050, segons l'escenari d'emissions considerat. Segons els seus resultats, tots els continents experimenten un increment inequívoc en l'ús d'energia final, a excepció d'Europa, on la reducció prevista en el sector residencial condueix a una reducció global de l'ús d'energia agregada.

Per últim, cal tenir també present el nexa aigua-energia (Hamiche et al., 2016) ja que es preveu que la demanda d'energia vinculada a l'abastiment d'aigua (captació d'aigua subterrània i superficial, tractament d'aigües residuals i dessalinització) vagi a l'alça en les regions vulnerables a l'escassetat hídrica.

La seguretat energètica està molt lligada al concepte de vulnerabilitat. Jewell et al. (2014) la defineixen com a baixa vulnerabilitat dels sistemes energètics vitals, entenent aquests últims com aquells en que la seva fallida podria alterar el funcionament i l'estabilitat d'una societat. Aquests sistemes energètics vitals es poden definir en termes de les seves fronteres geogràfiques (nacionals, subnacionals, regionals o mundials) o en termes de les seves fronteres sectorials (una font d'energia primària com el petroli, una energia secundària com l'electricitat o un ús final com el transport). Diferents combinacions de fronteres geogràfiques i sectorials donen lloc a un nombre potencialment gran de sistemes energètics vitals (p. ex. el mercat mundial del petroli o la xarxa elèctrica europea).

1.2 Canvi climàtic i seguretat energètica a Andorra

El sistema energètic d'Andorra es caracteritza per una dependència energètica de l'exterior superior al 90%, important el 80% de l'energia elèctrica i el 100% dels combustibles fòssils (OECC, 2021). Aquest i altres factors, com el continu creixement de la demanda energètica, el risc de saturació de les línies d'importació elèctrica, l'encariment constant dels carburants i les tarifes elèctriques, i la voluntat del compliment de les directrius energètiques europees, van motivar l'elaboració del Pla Estratègic de l'Energia 2006 – 2015 (Govern d'Andorra, 2007). En aquest pla es van traçar les primeres línies i objectius estratègics del país en matèria d'energia fins l'any 2015, les quals es van actualitzar posteriorment al Llibre Blanc de l'Energia (Govern d'Andorra, 2012). Més recentment, la Llei 21/2018, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc) va dibuixar el futur energètic del país, així com el camí a seguir per tal d'assolir els compromisos climàtics. La disminució de la demanda d'energia, la implantació de sistemes més eficients i la producció d'energies renovables s'identifiquen en la Litecc com els pilars del futur model energètic per potenciar la seguretat energètica, la sobirania nacional i impulsar la mitigació del canvi climàtic.

A banda dels plans governamentals com la recent Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic 2020-2050 (OECC, 2021) o dels informes presentats a la Convenció marc de les Nacions Unides sobre canvi climàtic¹, la recerca en política energètica ha estat poc treballada en el marc andorrà. En l'única modelització del sistema energètic a escala de país realitzada fins a data d'avui, Travesset-Baro (2017) avalua la seguretat energètica actual i futura del país a través d'indicadors de vulnerabilitat del sistema energètic tot i que sense incorporar els impactes del canvi climàtic. Els resultats de les projeccions futures mostren que, en un escenari BAU (*Business As Usual*), l'evolució de la seguretat energètica seguiria una tendència

¹ L'Informe Biennal de Transparència (Govern d'Andorra, 2023) és la darrera comunicació presentada

negativa en gairebé tots els indicadors. S'incrementaria encara més la vulnerabilitat del sistema energètic en àmbits actualment ja molt crítics com la dependència a les importacions o el creixement en l'ús de combustibles fòssils i es perpetuarien problemes com la baixa diversitat de fonts d'energia en el sector del transport. És destacable que bona part de les tendències negatives previstes en l'escenari BAU es reverteixen en els escenaris de reducció d'emissions de CO₂. En aquest mateix sentit apunten estudis com el de Lyke (2024) afirmant que les inversions en energies netes poden reduir l'impacte negatiu del canvi climàtic sobre la seguretat energètica.

Entre d'altres aproximacions a l'àmbit energètic a escala de país hi destaquen l'estudi del consum d'energia del sector domèstic, per part de l'Institut Cerdà², l'estudi encarregat per l'AESE (Associació d'Entitats del Sector Energètic) l'any 2011 sobre l'aprofitament dels recursos naturals d'Andorra o la quantificació del potencial d'eficiència energètica en el sector de l'edificació a càrrec del Col·legi Oficial d'Arquitectes d'Andorra i Sabaté Associats (2012), tots ells documents no públics.

Els principals impactes del canvi climàtic identificats pel sector energia en el Procés d'adaptació d'Andorra al canvi climàtic (PAACC) (Govern d'Andorra, 2014) fan referència als canvis en l'ús d'energia, que podria comportar l'increment de la pobresa energètica, i a la disponibilitat de recursos, especialment d'aigua. Pel que fa a les vulnerabilitats detectades hi destaca la dependència de la producció energètica de les centrals hidroelèctriques així com la vulnerabilitat de la xarxa elèctrica a les altes temperatures (p. ex. reducció de l'eficiència) i als episodis més freqüents de tempestes, incendis, sequeres, etc.

A continuació s'aprofundeix en les principals vulnerabilitats del sector energètic andorrà i en els potencials efectes del canvi climàtic agrupant-los en impactes en l'abastiment i en la demanda d'energia.

1.2.1 Impactes en l'abastiment d'energia

Tenint en compte les característiques del sector energètic d'Andorra, es preveu que els principals impactes del canvi climàtic en l'abastiment d'energia es focalitzin en el transport i la distribució d'aquesta, i en la disponibilitat de recursos renovables.

1.2.1.1 Transport i distribució d'energia

Els combustibles fòssils com el gasoil de calefacció o els carburants de locomoció, la calor provinent de cogeneració o l'electricitat son transportats fins als punts de consum final a través de xarxes de transport i distribució. En el cas dels combustibles

² Referències a l'estudi a <https://publicacions.iec.cat/repository/pdf/00000119/00000052.pdf>

fòssils, la infraestructura utilitzada és la pròpia **xarxa viària**, mentre que la calor i l'electricitat disposen de la seva pròpia infraestructura.

De les tres infraestructures anomenades, la **xarxa elèctrica** apunta a ser la més vulnerable front al canvi climàtic i els riscos que aquest incorpora. A Andorra cal posar el focus en els esdeveniments extrems com les onades de calor, les sequeres i les pluges torrencials així com als riscos naturals derivats d'aquests com els incendis forestals o les inundacions.

Degut a l'alta dependència de les importacions, no és suficient fixar-se en la vulnerabilitat de la xarxa interna sinó que cal tenir en compte també les vulnerabilitats de la xarxa d'Espanya i França, i en especial de la seva xarxa de transport cap al Principat. L'IEA (2022b) identifica l'augment de temperatura i les inundacions com els principals perills climàtics d'ambdós països, afegint-hi les sequeres en el cas d'Espanya.

1.2.1.2 Disponibilitat de recursos i producció d'energia

La dotació de recursos d'una regió o país és fonamental en la planificació dels sistemes energètics. Aquests es refereixen tant a les reserves existents de combustibles fòssils com a la disponibilitat de recursos renovables. Alguns recursos renovables són especialment vulnerables als efectes del canvi climàtic i la seva disponibilitat es pot veure fortament compromesa.

En el cas d'Andorra, l'augment previst tant en la magnitud com en la durada de les sequeres (Lemus Casanovas, 2021) juntament a la dependència de la producció hidroelèctrica, representa un dels principals riscos per l'abastiment d'electricitat. L'**aprofitament hidroelèctric** és actualment el principal ús d'aigua del país (~75 hm³) aportant una producció elèctrica anual d'uns 85 GWh gràcies, principalment, a la central d'Encamp (47 MW de potència instal·lada) i a una petita aportació de les minicentrals d'Arcalís, Aixovall i Pessons (400 kW, 500 kW i 300 kW de potència instal·lada, respectivament). Addicionalment, però amb un pes molt limitat dins l'aprofitament hidroelèctric nacional, existeixen dos microturbines instal·lades a les xarxes d'aigua potable d'Andorra la Vella³ i Sant Julià de Lòria. Així doncs, la hidroelèctrica aporta el 75% de la producció elèctrica nacional que, alhora, representa el 20% de l'ús d'electricitat a Andorra (OECC, 2021). En aquest sentit, igual que en el transport i la distribució d'energia, la dependència no és només de la hidroelectricitat local sinó també de la de França i Espanya. La Litecc expressa la voluntat d'augmentar la producció elèctrica nacional com a mínim fins al 50% l'any 2050, assegurant un

³ Més informació a <https://www.andorralavella.ad/comu/?q=noticia/s%E2%80%99instal%C2%B7la-una-microturbina-que-genera-electricitat-aprofitant-la-xarxa-d%E2%80%99aigua-potable-al>

percentatge de fonts renovables no inferior al 75% i la declaració d'emergència climàtica i ecològica l'incrementa al 80% (Govern d'Andorra, 2020). Aquest compromís exigeix promoure la introducció de noves instal·lacions de producció elèctrica, essent identificada la tecnologia solar com la de major potencial de creixement en el Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra (PSIEA) (Govern d'Andorra, 2018) però mantenint la hidroelèctrica un pes important en el mix de producció elèctrica nacional.

La Figura 1 mostra la producció mensual estimada d'hidroelectricitat a la central hidroelèctrica d'Encamp en els escenaris modelats per Domènech et al. (2024) a l'horitzó 2050. En aquest estudi la producció futura respecte l'any base es manté relativament estable en dos dels escenaris de canvi climàtic (i. e. *Reference* i *Global change*). L'impacte d'aquests escenaris en la producció d'hidroelectricitat s'estima negligible a escala anual, no obstant, les previsions apunten a un augment durant els mesos d'hivern i a una disminució al juny i juliol. L'augment del cabal hivernal en aquests escenaris es pot explicar per la disminució de la relació neu/precipitació líquida, segons les projeccions de canvi climàtic actuals. Aquests resultats són coherents amb altres estudis recents realitzats en diferents cadenes muntanyoses (Bombelli et al., 2019; Brunner et al., 2019; Van Vliet et al., 2016). No obstant això, és important assenyalar que l'escenari històric de sequera (i. e. *Historical drought year*) resulta en una reducció del 40% de la generació anual d'hidroelectricitat. La disminució s'observa en cada mes de l'any, trobant-se les més significatives al juny, juliol i setembre, on la producció podria caure un 62%, mentre que durant la temporada d'hivern la pèrdua s'estima en un 47%.

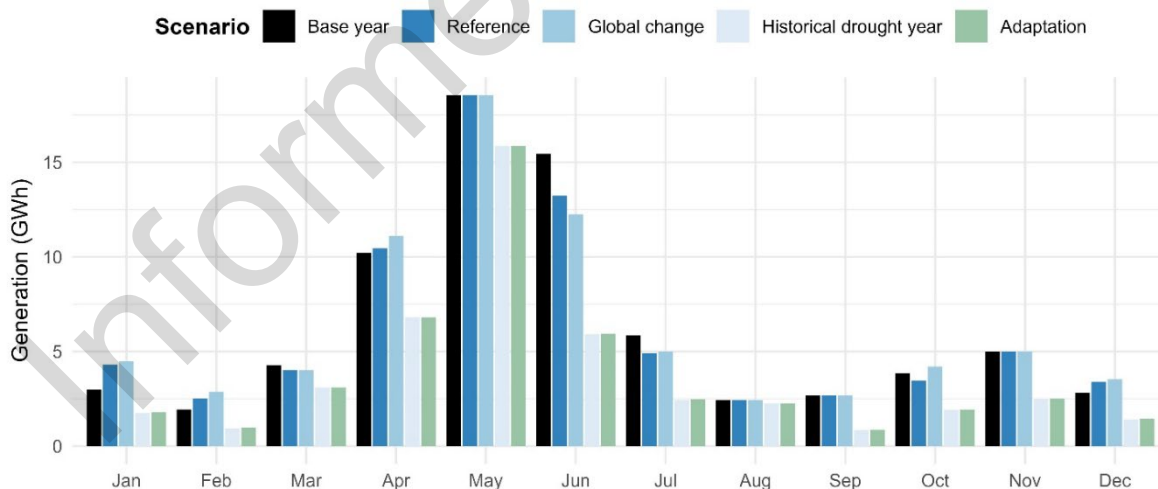


Figura 1. Producció mensual d'energia hidroelèctrica a la central d'Encamp l'any 2050 als escenaris modelitzats. Font: Domènech et al. (2024)

Tot i que actualment l'**ús energètic de la biomassa forestal** a Andorra és testimonial pel que fa a ordre de magnitud, la bioenergia pot estimular el desenvolupament local,

incrementar la diversitat de fonts d'energia i contribuir al compliment dels compromisos climàtics (Travesset-Baro, 2017). El PSIEA identifica també la biomassa forestal com un recurs a integrar en la planificació energètica del país, tenint en compte que el territori està cobert actualment per un 40% de boscos (Beltrán et al., 2023). En un estudi vinculat al PSIEA, Silvagrina (2016) estima el potencial d'aprofitament fustaner d'Andorra en 3.937 tones (en fusta verda).

Els boscos del Pirineu han augmentat en superfície i densitat en les últimes dècades (Améztegui et al., 2010), mentre que l'augment de la temperatura i dels períodes de sequera, han propiciat un augment en l'evapotranspiració i en la reducció dels estocs d'aigua al sòl forestal. En aquest context, augmenta el risc als grans incendis (Nolan et al., 2021), i alhora es redueix el creixement de la massa forestal, predisposant-la al decaïment i a la mortalitat (Allen et al., 2015; Cailleret et al., 2017).

Actualment no es coneix amb exactitud el volum de biomassa que s'extreu anualment dels boscos andorrans així com tampoc de fusta, tot i que segons la Duana Andorrana s'identifica l'exportació d'unes 2.300 tones de mitjana de fusta anuals cap a territori espanyol durant el període 2018-2021⁴. L'avaluació de la capacitat de generació actual i futura d'aquest recurs energètic és clau per conèixer la disponibilitat del recurs. L'estudi "Avaluació de l'aprofitament energètic de la biomassa d'estella del Principat d'Andorra" aprofundeix en aquesta línia estimant el potencial de producció d'energia tèrmica associada a la biomassa extreta dels boscos andorrans en 13.800 MWh/any (Silvagrina, 2023). Malauradament, fins al moment, aquest estudi no es troba a disposició pública. El recent Inventari Nacional Forestal (INF1-AND)⁵ pot aportar també dades d'interès en aquest camp, en especial pel que fa a la quantificació i localització del recurs, i també per la detecció de masses inestables o capitalitzades en excés.

El fet d'extreure biomassa, pot aportar un valor afegit a la gestió sostenible dels boscos, contribuint a fer-los més sostenibles econòmicament, reduint els efectes del canvi climàtic, i incrementant la seva resiliència. La biomassa forestal com a producte és el residu silvícola dels aprofitaments forestals o el resultat de les tallades de millora en boscos molt densos i amb fusta de poca qualitat i, per tant, permet una valorització comercial d'aquests productes del bosc. Ara bé, caldrà desplegar i assegurar l'aplicació de models de silvicultura adaptativa propera a la natura, que permetin garantir un impacte positiu de l'extracció de biomassa. Aquest impacte ha d'anar dirigit a millorar els serveis ecosistèmics, com el carboni, l'aigua i la biodiversitat (Teresa Cervera, Xavi Rabascall, Teresa Baiges, 2022), tot assegurant la traçabilitat de tota la cadena de valor.

⁴ Comunicació personal

⁵ Més informació a <https://ari.ad/projectes/inventari-nacional-forestal-andorra>

L'**aprofitament del recurs solar** ha viscut una forta explosió tant a escala global com local i les previsions futures apunten a que aquesta tendència es mantingui convertint aquest recurs en un dels pilars de qualsevol sistema energètic. Segons dades del Registre Energètic Nacional (REN)⁶, actualment a Andorra existeixen 404 instal·lacions d'energia solar fotovoltaica amb una potència instal·lada de 15,59 MW i una producció aproximada de 16,5 GWh, aproximadament el 3% del consum elèctric nacional.

Segons l'OPCC-CTP (2021), la producció d'electricitat mitjançant energia solar fotovoltaica als Pirineus es podria veure afavorida en el futur per un augment de la irradiació mitja a tota la serralada, ja que s'estima un increment del 10% sobre la capacitat actual a mitjans de segle.

A banda de les petites variacions a l'alça en la irradiació mitjana previstes al sud d'Europa, alguns estudis posen el focus en la importància de la intermitència per avaluar la fiabilitat futura de la producció fotovoltaica (Yin et al., 2020). Com a resum, l'estudi de Jiang et al. (2023) basat en observacions i reanàlisi conclou que el canvi climàtic tindrà impactes positius (en termes de disponibilitat de recursos) i negatius (en termes d'intermitència solar) sobre l'estabilitat de l'energia solar, alertant que cal tenir en compte aquests impactes al dissenyar noves instal·lacions fotovoltaïques i desenvolupar tècniques d'adaptació per a la problemàtica de la intermitència. Entre aquestes s'hi inclou la previsió a curt, mitjà i llarg termini de la disponibilitat de recursos, la dispersió geogràfica de les unitats de producció, l'emmagatzematge, la interconnexió de la xarxa i els sistemes híbrids.

Per últim, l'**aprofitament eòlic** viurà un punt d'inflexió a Andorra aquest any 2024 amb la posta en funcionament del parc eòlic del Maià. Aquest constarà de deu aerogeneradors amb una potència de 23 MW i una producció estimada de 51 GWh anuals. A diferència del que apunta per l'energia solar, l'OPCC-CTP (2021) considera probable que el canvi climàtic tingui efectes negatius sobre la producció eòlica. Malgrat l'absència d'estudis específics de la regió dels Pirineus i la gran incertesa associada a les projeccions, s'espera que el recurs eòlic augmenti al nord i centre d'Europa, mentre que en la regió del Mediterrani es preveu que disminueixi (Carvalho et al., 2017).

1.2.2 Impactes en la demanda d'energia

Els impactes més previsibles del canvi global pel que fa a l'ús d'energia són la disminució de la demanda de calefacció i l'increment de la demanda de refrigeració. A més de provocar canvis estacionals en la demanda d'energia, en el cas d'Andorra, podria contribuir a una reducció de l'ús de gasoil de calefacció i a un increment de l'electricitat per refrigeració. En aquest sentit, serà d'interès fer seguiment i preveure

⁶ Comunicació personal de l'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic d'Andorra

l'evolució dels graus dia de calefacció i refrigeració⁷ (HDD i CDD, respectivament per les seves sigles en anglès). La Figura 2 presenta les tendències observades a Andorra pel que fa a HDD i CDD durant el període 1981-2023. S'aprecia clarament la tendència a la baixa en el cas dels graus dia de calefacció i a l'alça en el cas dels de refrigeració.

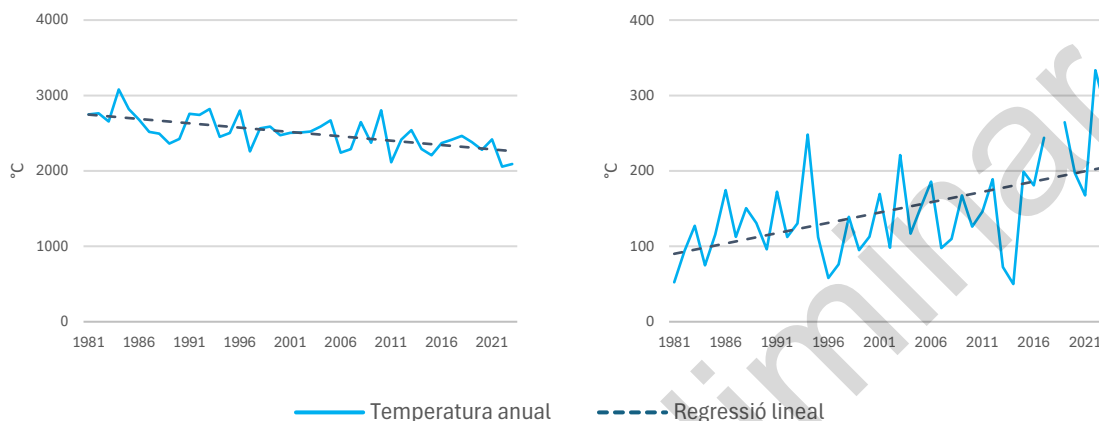


Figura 2. Evolució dels graus dia de calefacció en base 15 (esquerra) i refrigeració en base 18 (dreta) a Andorra pel període 1981-2023 calculats amb les dades de les estacions meteorològiques de Roc de St. Pere i Central de FEDA, respectivament. Font: Servei Meteorològic Nacional d'Andorra

A més, les projeccions generades al projecte CLIMPY (EFA081/15) preveuen un increment inequívoc de la temperatura mitjana en tots els escenaris RCP (*Representative Concentration Pathways*) estudiats (Amblar-Francés et al., 2020; Quintana, 2023). L'impacte de l'escenari RCP4.5 en la variació del valor mitjà anual de temperatura mitjana a finals de segle es situaria al voltant dels 2,5 °C per sobre del període de referència. Pel que fa a l'escenari RCP8.5, el més emissiu, les variacions podrien superar els 5°C (veure Figura 3). D'altra banda, l'increment de la temperatura a l'estiu es preveu més accentuat, en línia amb el ja observat a Andorra⁸ i a la resta del Pirineu.

⁷ Més informació a

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Heating_and_cooling_degree_days_-_statistics

⁸ Pel període 1950-2015, l'increment de la temperatura mitjana d'estiu va ser de 0,29°C/dec mentre que l'anyal va ser de 0,18°C <https://www.oma.ad/ca/tendencies>

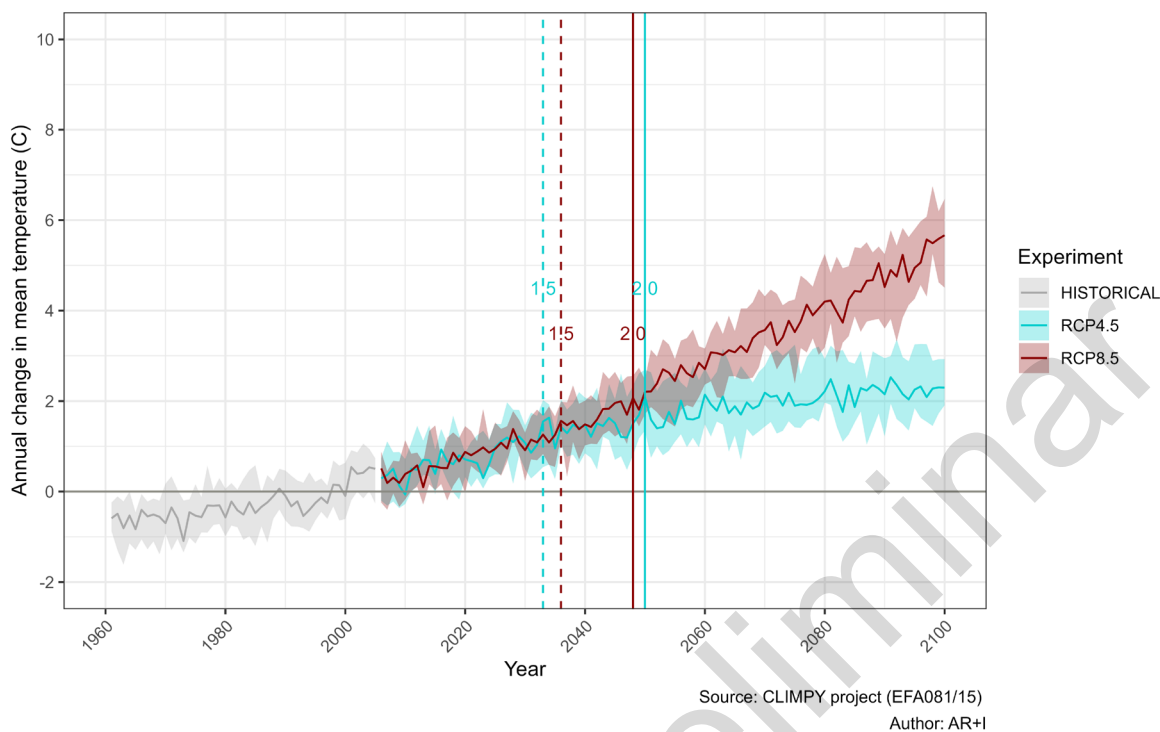


Figura 3. Canvis del valor mitjà anual de la temperatura mediana diària al Principat d'Andorra en el període històric i en els diferents RCP analitzats. La mediana està representada per una línia gruixuda i l'ombra representa els percentils 17 i 83.

En aquest context de canvis estacionals en la demanda, en l'ús de fonts d'energia i de volatilitat de preus caldrà prestar especial atenció a la pobresa energètica i a les seves implicacions en la salut (Jessel et al., 2019). Així doncs, una millor comprensió del sector residencial, no només del comportament energètic actual dels edificis sinó també de quins efectes futurs podrien tenir els programes integrals de renovació energètica, es preveu estratègic pel país. En aquest sentit, la modelització energètica a escala urbana residencial d'Escaldes-Engordany realitzada per Borges (2023) representa una bona base per avançar en aquesta línia.

Encara que la majoria d'avaluacions d'impacte del canvi climàtic sobre els recursos hídrics se centren en els impactes sobre la disponibilitat d'aigua, és important estudiar també el nexa energia-aigua des del punt de vista de la demanda. Per exemple, a Andorra, caldrà posar el focus en l'evolució de la producció de neu i en el seu ús d'aigua i energia associats (Knowles et al., 2023). El canvi climàtic també pot portar a un major requeriment d'aigua per irrigació i energia pel bombeig d'aigua tant en el sector agrícola com al residencial (Schaeffer et al., 2012).

Entre altres aspectes als que caldrà estar atent, segurament a un altre nivell de prioritat, hi destaca el rendiment dels equips tèrmics que es podrien veure afectats per les variacions de les temperatures, el possible augment de refrigeració per la conservació d'aliments i per la refrigeració de màquines en els sectors secundari i

terciari, el major consum d'energia dels vehicles per l'augment de l'ús de la refrigeració o els efectes de la temperatura en el rendiment de les bateries dels vehicles híbrids i elèctrics.

1.3 Resiliència climàtica del sector energètic

La resiliència climàtica del sector energètic fa referència a la capacitat d'aquest sector per gestionar el risc, adaptar-se als impactes del canvi climàtic i mantenir la seva funcionalitat malgrat les perturbacions. El risc resulta de la interacció entre el perill, l'exposició i la vulnerabilitat, termes sovint utilitzats en el context de la gestió de riscos i desastres. El perill fa referència a les amenaces o situacions que poden causar danys o pèrdues. L'exposició es refereix a la presència d'elements vulnerables davant d'aquests perills, mentre que la vulnerabilitat és la propensió d'aquests elements a patir danys. El document "Canvi climàtic: components del risc"⁹ aprofundeix en aquests conceptes.

Malgrat que tots els països estan exposats a perills climàtics en certa mesura, el nivell de dany o pèrdua potencial varia entre ells. Alguns com ara la Índia, Xina o Mèxic estan altament exposats a diversos perills climàtics, mentre altres com ara Irlanda, Luxemburg o Noruega tenen un nivell més baix d'exposició (IEA, 2022b). La Figura 4 mostra el nivell agregat de perill climàtic per als països membres i associats de l'Agència Internacional de l'Energia apilant els perills (i. e. augments de temperatura, inundacions, ciclons i sequeres) als que està exposat el sector energètic de cada país.

⁹ https://ari.ad/images/projectes/evicc/components_risc.pdf

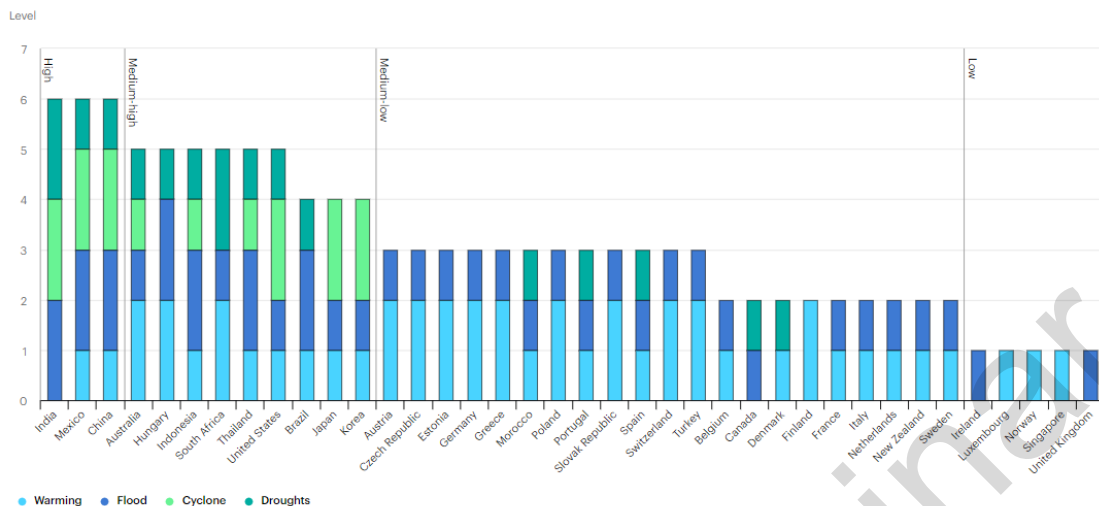


Figura 4. Nivell agregat de perill climàtic per als països membres i associats de l'Agència Internacional de l'Energia. Font: IEA (2022b)

L'indicador de resiliència climàtica de l'Agència Internacional de l'Energia (AIE) proposa avaluar el nivell de resiliència climàtica de cada país comparant el nivell de risc climàtic que el país enfronta amb la seva preparació política (veure Figura 5). L'anàlisi realitzat mostra que la meitat dels països membres i associats de l'AIE estan classificats com a excel·lents o bons en termes de resiliència climàtica. En particular, el 13% dels països, incloent Irlanda, Itàlia, Noruega, Espanya i el Regne Unit, es classifiquen com a altament preparats (i. e. *Excellent* d'acord a la llegenda de la Figura 5) tenint en compte el nivell de risc climàtic que enfronten i l'adequació de les seves polítiques climàtiques¹⁰. Pel que fa França, l'AIE considera que té marge de millora en la seva preparació política, apuntant a la manca de prioritització d'accions d'adaptació en l'Estratègia nacional per l'Energia i el Clima.

¹⁰ Veure informes específics de cada país a <https://www.iea.org/reports/climate-resilience-policy-indicator>

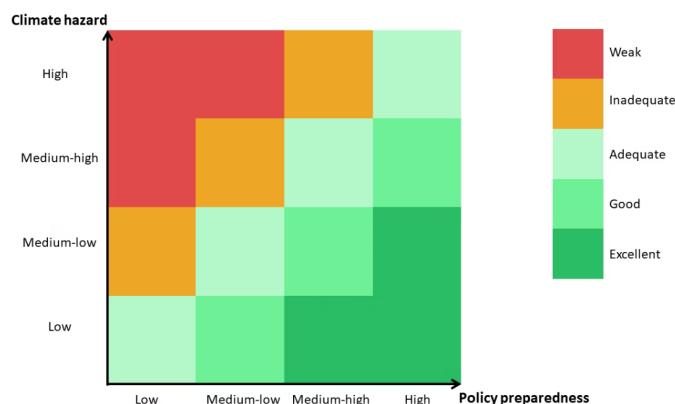


Figura 5. Quadre de valoració de resiliència climàtica. Font: IEA (2022b)

1.3.1 Estratègies d'adaptació

Millorar la resiliència climàtica del sector energètic requereix accions de totes les parts interessades, incloent els proveïdors d'energia, els consumidors i les autoritats. Els proveïdors d'energia poden millorar la resiliència al canvi climàtic realitzant avaluacions de risc i impacte climàtic, millorant el reforçament físic del sistema, diversificant la cadena d'aprovisionament d'energia i introduint millors sistemes de monitoratge climàtic per a l'avís anticipat i la resposta en emergència.

Els consumidors d'energia poden contribuir a la resiliència climàtica adoptant mesures en la demanda energètica en els principals sectors d'ús final, com ara edificis, indústries i transport. Algunes mesures que ja han demostrat ser efectives inclouen dissenys amb materials resistents al clima, reduccions de l'ús d'energia, millora de l'eficiència energètica o solucions basades en la natura.

Les autoritats energètiques tenen un paper crític en la construcció de la resiliència climàtica del sector energètic establint un entorn de polítiques i mercats favorables. Les autoritats energètiques poden facilitar accions dels proveïdors i consumidors d'energia, abordant les barreres que puguin desencoratjar les accions per a la resiliència climàtica (IEA, 2022a).

L'IEA (2022a) fa una proposta de mesures inicials per avançar cap a la resiliència climàtica del sector energètic (veure Taula 1), agrupant-les segons part interessada o àmbit i etapa de la resiliència climàtica en que actua (veure Figura 6).

Types	Measure	Readiness	Robustness	Resourcefulness	Recovery
Supply side	Conduct climate risk and impact assessment	Green			
	Implement physical system improvement		Orange	Red	
	Switch to water-efficient and heat-resilient production process		Orange	Red	
	Diversify energy supply chain		Light Orange	Red	Blue
	Better monitor for early warning and emergency response	Light Green		Red	Blue
Demand side	Ensure climate proofing in design and performance	Green	Light Orange		
	Increase awareness and promote behavioural changes	Green	Light Orange		
	Improve energy efficiency		Orange	Red	
	Use smart and advanced technologies for better management		Orange	Red	
	Adopt nature-based solutions		Light Orange	Red	
	Switch to climate-resilient materials		Light Orange	Red	Blue
Authorities and governments	Enhance knowledge about climate risks and impacts	Green			
	Establish appropriate policy frameworks	Green			
	Mainstream climate resilience into relevant regulations	Green	Light Orange	Red	
	Mobilise financing and investment		Orange	Red	
	Support adequate climate insurance				Blue
	Ensure emergency preparedness				Blue

Taula 1. Mesures per avançar cap a la resiliència climàtica del sector energètic. Font: IEA (2022a)

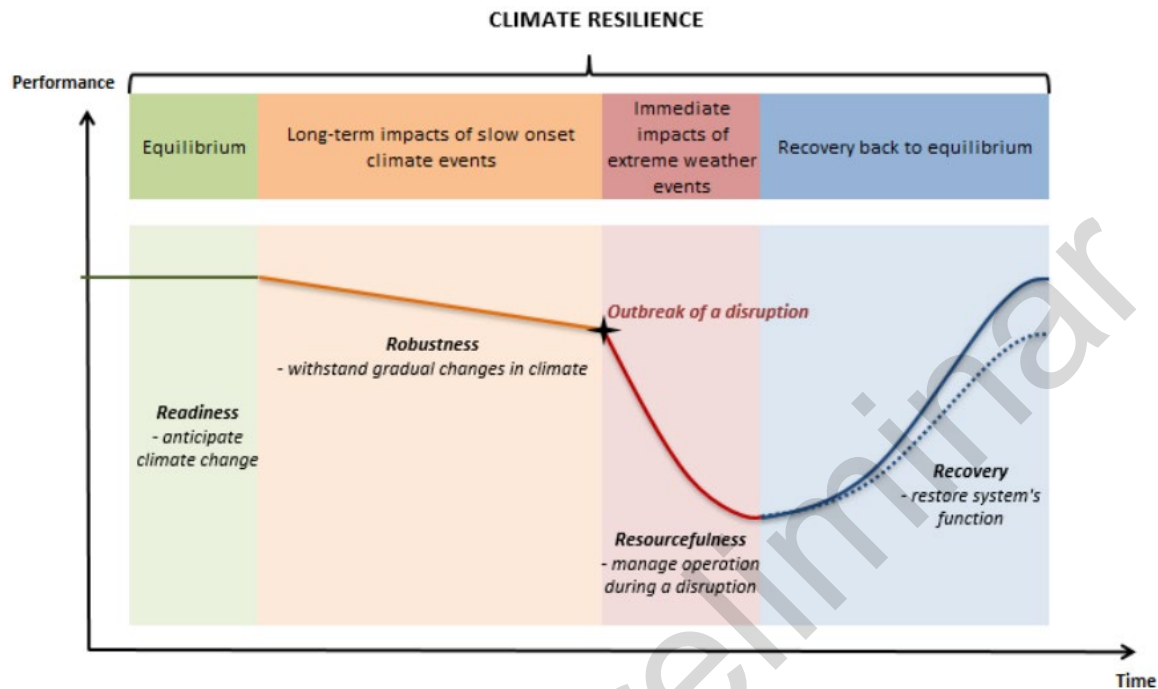


Figura 6. Marc conceptual de la resiliència climàtica amb les seves etapes. Font: IEA (2022a)

Algunes de les mesures proposades com la millora de l'eficiència energètica, la diversificació de fonts de generació, l'adaptació de les instal·lacions als fenòmens extrems o la sensibilització ciutadana, ja s'identificaven en el PAAC (Govern d'Andorra, 2014). Serà important tenir en compte també mesures que el PAAC proposava en altres sectors amb un fort nexa amb l'energètic com la gestió de l'aigua o la gestió forestal. Entre aquestes hi destaquen, pel seu vincle amb l'energia, el foment de la gestió forestal sostenible, la disminució de la densitat dels boscos, l'impuls d'un pla general de l'aigua o l'elaboració d'un pla estratègic d'infraestructures de regulació des d'una perspectiva àmplia, que incorpori les eventuais necessitats de regulació de cabals (p. ex. consum humà, rec agrícola, hidroelèctrica, lleure, gestió del risc d'avingudes i inundacions, gestió dels cabals ecològics, etc.).

Dins de les mesures transversals d'adaptació, l'OPCC-CTP (2021) identifica els Pirineus com una regió amb un gran potencial d'aprofitament energètic a partir de fonts d'energia renovables, que podrien conformar una xarxa de generació distribuïda en el territori i fer el territori resilient des del punt de vista energètic. No obstant això, apunta que a l'hora de planificar instal·lacions energètiques caldrà aplicar criteris de sostenibilitat ecològica i paisatgística de manera integrada a l'enfocament de canvi climàtic.

Més específicament en l'àmbit de la demanda, i havent identificat la pobresa energètica com un dels reptes actuals i futurs del país, serà important aprofundir en

la seva diagnosi (European Commission, 2023) i en el rol de les comunitats energètiques com a eina d'alleujament d'aquesta (Koukoufikis et al., 2023). En aquest sentit, els observatoris periòdics treballats des de l'eix de Societat d'Andorra Recerca + Innovació poden ser una font d'informació molt valuosa.

El present estudi, centrat en els impactes i les vulnerabilitats del canvi climàtic en el sector energètic andorrà, permetrà avançar en algunes de les mesures d'adaptació plantejades com disposar d'eines de suport a la planificació energètica i a l'assoliment dels compromisos climàtics i d'indicadors per monitoritzar i avaluar el progrés en l'adaptació. Els mecanismes per a la monitorització i l'avaluació de l'adaptació haurien de ser una part integral del marc de resiliència del sector energètic (IEA, 2022a). Aquesta és una activitat relativament recent en molts països, i hi ha poca experiència amb avaluacions a mitjà i llarg termini de les polítiques d'adaptació a nivell nacional. Molts sistemes de monitorització i avaluació es basen en una combinació d'indicadors que proporcionen informació sobre els riscos climàtics i els impactes del clima, la capacitat d'adaptació i les accions i resultats d'adaptació. Itàlia va desenvolupar una llista d'indicadors d'impacte del canvi climàtic en el marc de la seva Estratègia Nacional d'Adaptació (incloent, per exemple, la producció bruta d'energia hidroelèctrica i el gradient de consum de gas natural per calefacció). Al Regne Unit, el govern té la capacitat de requerir als actors rellevants (com ara empreses de transmissió i distribució d'electricitat) que informin sobre com preveuen que el canvi climàtic els afectarà i que proposin maneres de gestionar els impactes. Aquestes exigències de comunicació no només proporcionen al govern informació sobre la resiliència, sinó que també poden ajudar a augmentar la consciència i les capacitats organitzatives en el sector privat.

Per últim, remarcar, tal com també ho fa la WMO (2022), que el monitoratge climàtic per a l'avís anticipat i la resposta en emergència serà una eina clau en l'adaptació dels territoris. De fet, en la COP28 es va ressaltar la importància de l'avís anticipat i el GST (*Global Stocktake*) aprovat estableix que per al 2027 totes les parts hauran d'haver establert sistemes d'alerta precoç de perills múltiples, serveis d'informació sobre el clima per a la reducció del risc, així com mitjans d'observació sistèmica, i per al 2030 totes les parts hauran dissenyat, establert i posat en funcionament un sistema de vigilància, avaluació i aprenentatge respecte de les mesures nacionals d'adaptació. Andorra ja disposa d'alguns projectes en curs com la plataforma ARGOS¹¹ per millorar la capacitat d'anticipació i resposta proactiva davant fenòmens meteorològics i climàtics extrems de gran impacte o el seguiment en continu de l'*Snow Water Equivalent* i l'*Snow Cover* a tota la superfície del país a través de teledetecció¹². El projecte LIFE Pyrenees4clima¹³, recentment iniciat, aprofundirà en aquestes eines en

¹¹ Més informació a <https://ari.ad/projectes/repte-planetech-2022>

¹² Més informació a <https://ari.ad/noticies/importancia-neu-recurs-hidric>

¹³ Més informació a <https://ari.ad/projectes/pyrenees4clima>

alguns dels seus paquets de treball, especialment als WP2 i WP3. Una de les tasques d'aquest últim, centrada en el recurs hídic i amb un cas d'estudi a Andorra, treballarà en la incorporació de la previsió estacional en els models hidrològics i de gestió dels recursos amb l'objectiu de millorar la capacitat d'anticipació front a possibles episodis extrems. En aquest sentit, Andorra ha de seguir avançant en la millora de les observacions (p. ex. de cabals, nivell d'aigua dels estanys, etc.) i disposar d'indicadors i/o índexs per tal de fer el seguiment del recurs hídic i de la sequera meteorològica i hidrològica¹⁴.

¹⁴ Butlletí iniciat l'any 2024 conjuntament entre el Ministeri de Medi Ambient, Agricultura i Ramaderia, el Servei Meteorològic Nacional i Andorra Recerca + Innovació <https://www.mediambient.ad/butlleti-de-seguiment-del-recurs-hidric>

2. Abast de l'estudi

El present estudi pretén, d'una banda, fer una revisió de l'estat de l'art dels impactes del canvi climàtic sobre el sector de l'energia i identificant quins podrien ser els més significatius per Andorra. En aquest sentit, en la Taula 2 es presenta un resum dels potencials perills i impactes del canvi climàtic sobre el sector energètic andorrà identificats al llarg de la Secció 1.

		Factor climàtic			Potencials impactes	
		Variabilitat temperatura	Variabilitat precipitació	Variabilitat vent		
ABASTIMENT	Disponibilitat de recursos	Hídric	sequera	sequera	Disminució del recurs	
		Forestal	sequera, incendis	inundacions, pluja intensa	vent intens	Disminució del recurs
		Solar				Positius pel que fa a la disponibilitat de recursos i negatius pel que fa a la intermitència
		Eòlic			menys vent	Possible disminució del recurs
	Producció d'energia	Hidroelèctrica	Sequera	inundacions, pluja intensa		Alteracions del factor de disponibilitat de les centrals, danys en les instal·lacions
		Biomassa	onada de calor, augment t ^a			Afectació al rendiment de les instal·lacions
		Solar	onada de calor, augment t ^a , incendis	pluja intensa		Afectació del rendiment i dany en les instal·lacions (p. ex. calamarsades)
		Eòlica	onada de calor, augment t ^a , incendis		vent intens	Afectació al rendiment i danys en les instal·lacions
	Transport i distribució	Xarxa elèctrica	Incendis	inundacions, pluja intensa	vent intens	Talls en la xarxa elèctrica, danys en les ETR
		Xarxa viària	Incendis	inundacions, pluja intensa		Talls en la xarxa viària
DEMANDA	Residencial	onada de calor, augment t ^a			Disminució de la demanda de calefacció i augment de la demanda de refrigeració	
	Transport	onada de calor, augment t ^a			Augment de l'ús de la refrigeració així com afectació al rendiment de les bateries dels vehicles elèctrics i híbrids	
	Sector secundari	onada de calor, augment t ^a			Major demanda dels sistemes de refrigeració	
	Sector terciari	onada de calor, augment t ^a , sequera	disminució de precipitacions en forma de neu		Sector de l'esquí: major despesa energètica i hídrica per producció de neu. Resta de sectors: augment de refrigeració per la conservació d'aliments i refrigeració de les màquines	
	Administració pública	onada de calor, augment t ^a			Disminució de la demanda de calefacció i augment de la demanda de refrigeració	

Taula 2. Resum dels potencials perills i impactes del canvi climàtic sobre el sector energètic andorrà associats a l'abastiment i la demanda d'energia

D'altra banda, l'estudi busca identificar indicadors clau amb l'objectiu de facilitar el seguiment dels impactes, la vulnerabilitat, l'exposició i l'adaptació al canvi climàtic del territori andorrà. A més de calcular-se a present, es preveu disposar d'alguns d'aquests indicadors a mitjà i llarg termini. Per això, una de les principals tasques de l'estudi es centra en la modelització conjunta del sistema energètic i el recurs hídric.

En el transcurs d'aquest estudi, que s'allargarà almenys fins l'any 2026, es preveu identificar, de forma consensuada amb els actors del territori, mesures d'adaptació al canvi climàtic enfocades al sector de l'energia. S'entén també aquest estudi com una bona oportunitat per enfortir o crear noves aliances entre entitats rellevants tant nacionals com internacionals pel que fa a l'adaptació al canvi climàtic.

2.1 Objectius

L'objectiu general d'aquest estudi és contribuir a afrontar els reptes futurs del sector energètic andorrà davant de les conseqüències del canvi climàtic i millorar-ne la seva resiliència.

Aquest objectiu general és desglossa en els següents objectius específics:

1. Definir indicadors destinats a avaluar els efectes del canvi climàtic en el sector energètic andorrà, així com la seva capacitat d'adaptació.
2. Modelitzar de forma conjunta el sistema energètic i el recurs hídic d'Andorra.
3. Calcular els indicadors identificats prèviament tant a present com a futur.
4. Identificar mesures enfocades al sector de l'energia per a un futur full de ruta d'adaptació al canvi climàtic.

2.2 Actors clau

- Membres de la Comissió Nacional de l'Energia i del Canvi Climàtic (CNECC).
- Forces Elèctriques d'Andorra (FEDA).
- Associació d'Entitats del Sector Energètic (AESE).
- Departament de Medi Ambient i Sostenibilitat.
- Departament de Protecció Civil i Gestió d'Emergències.
- Departament d'Afers socials.
- Secretaria d'Estat de Transició Energètica, Transport i Mobilitat.

2.3 Entitats col·laboradores externes

Durant els transcurso del projecte es comptarà amb la col·laboració d'entitats col·laboradores externes que donaran suport en diferents línies de treball del projecte. En la Secció 3 s'especifica en les tasques principals en les que col·laborarà cada entitat.

- Universitat Politècnica de Catalunya:

- Institut Universitari d'Investigació en Ciència i Tecnologies de la Sostenibilitat (ISST.UPC)¹⁵.
- Arquitectura, Energia i Medi ambient (AiEM-UPC)¹⁶.
- Grup de Recerca en Dinàmica Fluvial (RIUS) de la Universitat de Lleida (UdL)¹⁷.
- Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)¹⁸.
- Centre de la Propietat Forestal¹⁹.

A banda de les entitats amb les que Andorra Recerca + Innovació ja col·labora actualment, en una fase més avançada del projecte es considera interessant entaular relacions amb d'altres que aportin coneixement en dos àmbits claus per al futur del sistema energètic d'Andorra, la pobresa energètica i la planificació estratègica de polítiques climàtiques per avançar cap a la descarbonització. La consultora catalana Ecoserveis²⁰ i el *think tank* francès IDDRI²¹, respectivament, podrien ser bones opcions.

¹⁵ <https://is.upc.edu/ca>

¹⁶ <https://aie.upc.edu/ca/>

¹⁷ <https://dmacsq.udl.cat/ca/recerca/rius/>

¹⁸ <https://www.ctfc.cat/>

¹⁹ <https://cpf.gencat.cat/ca/inici>

²⁰ <https://ecoserveis.net/arees-de-treball/pobresa-energetica/>

²¹ <https://www.iddri.org/en/reseau/deep-decarbonization-pathways>

3. Pla de treball

3.1 Definició d'indicadors de vulnerabilitat, exposició i impacte

Duració	12/2023 – 07/2024	Entitats col·laboradores	ISST.UPC
---------	-------------------	--------------------------	----------

Aquesta primera tasca consisteix en la identificació dels principals indicadors a utilitzar per avaluar els efectes del canvi climàtic en el sector energètic andorrà. Els indicadors identificats seran aplicables a escala nacional, calculables a Andorra amb les dades actuals i, bona part d'ells, calculables a futur a través de modelització. Puntualment, alguns dels indicadors podran ser calculats a altres escales espacials (p. ex. parroquial). En la definició dels indicadors es tindran en compte les cinc dimensions establertes a la Unió de l'Energia per Europa²²: (1) seguretat, solidaritat i confiança, (2) mercat interior integrat, (3) eficiència energètica, (4) acció climàtica i descarbonització i (5) recerca, innovació i competitivitat.

Metodologia

Es realitzarà una revisió bibliogràfica en informes nacionals²³ i internacionals, així com en articles científics per tal de recopilar els principals indicadors existents destinats a estudiar els efectes del canvi climàtic en el sector energètic. En línia amb el que plantegen Jewell et al. (2014) pels indicadors aplicables a models d'avaluació integrada, la selecció tindrà en compte, almenys, els cinc criteris següents:

1. Han de ser rellevants per poder abordar problemàtiques actuals i futures.
2. Cal que siguin suficientment genèrics per poder ser aplicats en sistemes energètics radicalment diferents de l'actual.
3. Han de ser calculables amb les dades disponibles i les derivades dels escenaris futurs.
4. Cal que aportin informació addicional a la que proporcionen indicadors existents.
5. Han de reflectir les vulnerabilitats clau dels sistemes energètics vitals i clarificar els compromisos polítics.

D'acord al document "Canvi climàtic: components del risc"²⁴, els indicadors identificats es classificaran segons la seva tipologia (i. e. vulnerabilitat, exposició i impacte).

²² Més informació a https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/energy-union_en

²³ P. ex. indicadors de seguiment de l'Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic 2020-2050 (OECC, 2021)

²⁴ https://ari.ad/images/projectes/evicc/components_risc.pdf

A banda del compliment dels cinc criteris esmentats i de classificar-se dins de les categories d'impacte, vulnerabilitat i exposició, es buscarà que hi hagi un equilibri entre indicadors enfocats a l'abastiment i a la demanda d'energia .

Resultats esperats

Disposar d'un paquet d'indicadors que permetin avaluar les vulnerabilitats, l'exposició i els impactes del canvi climàtic en el sector energètic andorrà. Aquests s'inclouran a la base de dades d'indicadors de l'estudi de vulnerabilitats i impactes del canvi climàtic (BD-Indicadors-EVICC²⁵).

3.2 Modelització conjunta del sistema energètic i el recurs hídic

Duració	12/2023 – 12/2024	Entitats col·laboradores	ISST.UPC, AiEM-UPC, CTFC, UdL
---------	-------------------	--------------------------	-------------------------------

La modelització permet determinar la situació actual del sistema energètic, explorar possibles escenaris futurs i quantificar l'impacte de potencials estratègies o polítiques. Aquesta tasca es centra en la modelització del sistema energètic andorrà i el recurs hídic enfocada a la planificació de polítiques energètiques i climàtiques. L'eina resultant es basarà en un model del sistema energètic i un model hidrològic i de gestió dels recursos que permetran estudiar el nexa energia-aigua de forma integrada. Suomalainen et al. (2022) presenten un bon exemple d'eina basada en la modelització i enfocada a comprendre l'impacte del canvi climàtic en els sistemes energètics, en aquest cas, en un sistema altament dependent de la producció hidroelèctrica.

Metodologia

El model integrat del sistema energètic i el recurs hídic d'Andorra s'implementarà en quatre fases principals: (1) model del sistema energètic, (2) model hidrològic i de gestió del recurs hídic, (3) enllaç d'ambdós models i (4) incorporació d'indicadors i construcció d'escenaris futurs.

El model del sistema energètic partirà del construït per Travesset-Baro (2017) mitjançant l'eina LEAP²⁶ (*Low Emissions Analysis Platform*) àmpliament utilitzada en l'anàlisi de polítiques energètiques i de mitigació del canvi climàtic (García-Gusano et al., 2018; Özer et al., 2013). A banda de revisar i actualitzar el model previ a la realitat actual, s'aprofundirà en el detall d'alguns sectors com el residencial, un dels identificats com a clau en la Litecc. El model urbà a escala d'edifici realitzat per Borges (2023) permet disposar d'informació i coneixement per abordar la caracterització de la demanda d'aquest sector amb major detall i precisió.

²⁵ <https://ari.ad/bd-indicadors-evicc>

²⁶ <https://leap.sei.org/>

El model hidrològic i de gestió del recurs hídric es basarà en el WEAP-Andorra (AR+, 2022; Domènech et al., 2024). Aquest estima l'equilibri hídric a la conca del riu Valira dins d'Andorra des de 2015 fins al 2050 en un interval de temps mensual. L'algoritme principal de WEAP²⁷ (*Water Evaluation and Planning*) és un balanç hídric resolt espacialment, calculat mensualment, que equilibra l'oferta i la demanda d'aigua a cada node i connexió del sistema (Höllermann et al., 2010).

Els dos models prèviament generats s'enllaçaran, aprofitant les sinèrgies entre WEAP i LEAP (Liu et al., 2021), amb l'objectiu d'estudiar el nexa energia-aigua de forma integrada.

Per últim, s'hi incorporaran els indicadors nacionals per avaluar els efectes i la capacitat d'adaptació al canvi climàtic del sector energètic d'Andorra i es realitzarà l'anàlisi d'escenaris futurs. En aquest anàlisi prospectiu serà especialment important comptar amb l'OECC així com amb els altres actors clau del sector energètic andorrà.

Resultats esperats

Disposar d'un model integrat energia-aigua a escala de país destinat a la planificació energètica i de polítiques climàtiques, i a estudiar l'impacte actual i futur del canvi climàtic en els sistemes energètics.

3.3 Càlcul d'indicadors d'impacte, vulnerabilitat i exposició

Duració	09/2024 – 03/2025	Entitats col·laboradores	ISST.UPC
---------	-------------------	--------------------------	----------

Aquesta tasca consisteix en el càlcul dels indicadors definits en la tasca 3.1.

Metodologia

Es realitzarà la recopilació i organització de les dades necessàries per calcular els indicadors definits en la tasca 3.1. Es prioritzaran, quan sigui possible, les dades observades que es completaran amb dades obtingudes a partir de la modelització de la tasca 3.2.

Resultats esperats

Disposar d'una base de dades amb els indicadors calculats. De forma similar al presentat en la tasca 3.1, es pretén disposar d'una sola base de dades d'indicadors de

²⁷ <https://www.weap21.org/>

l'estudi de vulnerabilitats i impactes del canvi climàtic que aglutini els calculats en tots els sectors estratègics del país.

3.4 Definició d'indicadors d'adaptació

Duració	09/2024 – 11/2024	Entitats col·laboradores	ISST.UPC, UdL, CTFC, CPF
---------	-------------------	--------------------------	--------------------------

Mesurar el progrés en l'adaptació al canvi climàtic és essencial per comprendre les vulnerabilitats canviant, a més de mostrat com les polítiques, estratègies i iniciatives d'adaptació adoptades influeixen en aquestes (Goonsekera & Olazabal, 2022). Aquesta tasca consisteix en la identificació d'indicadors per avaluar el progrés de l'adaptació al canvi climàtic del sector energètic andorrà. Els indicadors identificats seran aplicables a escala nacional, calculables a Andorra amb les dades actuals i, alguns d'ells, calculables a futur a través de modelització. D'igual manera que en la Tasca 3.1, en la definició dels indicadors es tindran en compte les cinc dimensions establertes a la Unió de l'Energia per Europa.

Metodologia

La metodologia que es seguirà en aquesta tasca serà, en línies generals, equivalent a la plantejada en la tasca 3.1. En aquest cas, es preveu una major dificultat per establir els indicadors degut al buit generalitzat de coneixement i pràctica respecte a la definició i l'ús d'indicadors d'adaptació (Goonsekera & Olazabal, 2022).

Resultats esperats

S'incorporaran els indicadors identificats a la base de dades comuna d'indicadors de l'estudi de vulnerabilitats i impactes del canvi climàtic (BD-Indicadors-EVICC²⁸).

3.5 Càlcul d'indicadors d'adaptació

Duració	11/2024 – 03/2025	Entitats col·laboradores	ISST.UPC, CPF
---------	-------------------	--------------------------	---------------

Aquesta consisteix en el càlcul dels indicadors definits en la tasca 3.4.

Metodologia

Es realitzarà la recopilació i organització de les dades necessàries per calcular els indicadors definits en la tasca 3.2. Es prioritzaran, quan sigui possible, les dades observades que es completaran amb dades obtingudes a partir de la modelització de la tasca 3.2.

²⁸ <https://ari.ad/bd-indicadors-evicc>

Resultats esperats

S'incorporaran els indicadors calculats a la base de dades comuna d'indicadors de l'estudi de vulnerabilitats i impactes del canvi climàtic.

Informe preliminar

Referències

- Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8), 1–55. <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>
- Amblar-Francés, M. P., Ramos-Calzado, P., Sanchis-Lladó, J., Hernanz-Lázaro, A., Peral-García, M. C., Navascués, B., Dominguez-Alonso, M., Pastor-Saavedra, M. A., & Rodríguez-Camino, E. (2020). High resolution climate change projections for the Pyrenees region. *Advances in Science and Research*, 17, 191–208. <https://doi.org/10.5194/asr-17-191-2020>
- Améztegui, A., Brotons, L., & Coll, L. (2010). Land-use changes as major drivers of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) expansion in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography*, 19(5), 632–641. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00550.x>
- AR+I. (2022). *Evolució de los usos de los recursos hídricos y posibles tensiones bajo escenarios de cambio climático en Andorra*. https://ari.ad/images/proyectos/piragua/E4.7_recursos_hidricos_andorra.pdf
- Beltrán, M., Busquets, E., Piqué, M., Domènech, M., & Travesset, O. (2023). *1r Inventari Nacional Forestal (INF1) del Principat d'Andorra. Metodologia d'establiment i seguiment de la xarxa de parcel·les permanents*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11175092>
- Bombelli, G. M., Soncini, A., Bianchi, A., & Bocchiola, D. (2019). Potentially modified hydropower production under climate change in the Italian Alps. *Hydrological Processes*, 33(17), 2355–2372. <https://doi.org/10.1002/hyp.13473>
- Borges, P. (2023). *Modelització energètica d'edificis a escala urbana a Andorra. Reducció dels desajustos dels models mitjançant dades de consum d'energia desagregades* [Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://www.tdx.cat/handle/10803/689963#page=1>
- Brunner, M. I., Björnsen Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., & Stähli, M. (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Science of the Total Environment*, 666, 1033–1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.169>
- Cailleret, M., Jansen, S., Robert, E. M. R., Desoto, L., Aakala, T., Antos, J. A., Beikircher, B., Bigler, C., Bugmann, H., Caccianiga, M., Čada, V., Camarero, J. J., Cherubini, P., Cochard, H., Coyea, M. R., Čufar, K., Das, A. J., Davi, H., Delzon, S., ... Martínez-Vilalta, J. (2017). A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. *Global Change Biology*, 23(4), 1675–1690. <https://doi.org/10.1111/gcb.13535>
- Carvalho, D., Rocha, A., Gómez-Gesteira, M., & Silva Santos, C. (2017). Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections. *Renewable Energy*, 101(2017), 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.036>
- De Cian, E., & Sue Wing, I. (2019). Global Energy Consumption in a Warming Climate.

- Environmental and Resource Economics*, 72(2), 365–410.
<https://doi.org/10.1007/s10640-017-0198-4>
- Domènech, M., Travasset-Baro, O., Pesado-Pons, C., López-Moreno, J. I., & Pons, M. (2024). Effects of global change on streamflow, water demand and supply: a case study from the Pyrenees. *Under Review at Water Resources Management*.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3915469/v1>
- European Commission. (2023). *Energy Poverty Advisory Hub (EPAH) Handbook 1: A Guide to Energy Poverty Diagnosis*.
- García-Gusano, D., Suárez-Botero, J., & Dufour, J. (2018). Long-term modelling and assessment of the energy-economy decoupling in Spain. *Energy*, 151, 455–466.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.102>
- Gooneseckera, S. M., & Olazabal, M. (2022). Climate adaptation indicators and metrics: State of local policy practice. *Ecological Indicators*, 145(November), 109657.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109657>
- Govern d'Andorra. (2007). *Pla Estratègic de l'Energia d'Andorra 2006-2015*.
- Govern d'Andorra. (2012). *Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra*.
https://www.mediambient.ad/images/stories/energia/documents/LlibreBlanc_2012.pdf
- Govern d'Andorra. (2014). *Procés d'adaptació d'Andorra al canvi climàtic (PAACC)*.
- Govern d'Andorra. (2018). *Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra*.
- Govern d'Andorra. (2020). *Acord de reconeixement de la crisi climàtica i de declaració de l'estat d'emergència climàtica i ecològica*.
- Govern d'Andorra. (2023). *Primer Informe Bienal de Transparencia de Andorra*.
<https://unfccc.int/documents/632855>
- Hamiche, A. M., Stambouli, A. B., & Flazi, S. (2016). A review of the water-energy nexus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 319–331.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.020>
- Höllermann, B., Giertz, S., & Diekkrüger, B. (2010). Benin 2025—Balancing Future Water Availability and Demand Using the WEAP 'Water Evaluation and Planning' System. *Water Resources Management*, 24(13), 3591–3613.
<https://doi.org/10.1007/s11269-010-9622-z>
- IEA. (2021). World Energy Outlook 2021. In *IEA Publications*. www.iea.org/weo
- IEA. (2022a). *Climate Resilience for Energy Security*.
<https://www.iea.org/reports/climate-resilience-for-energy-security>
- IEA. (2022b). *Climate Resilience Policy Indicator*. <https://www.iea.org/reports/climate-resilience-policy-indicator>
- Iyke, B. N. (2024). Climate change, energy security risk, and clean energy investment. *Energy Economics*, 129(December 2023), 107225.

<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.107225>

- Jessel, S., Sawyer, S., & Hernández, D. (2019). Energy, Poverty, and Health in Climate Change: A Comprehensive Review of an Emerging Literature. *Frontiers in Public Health*, 7(December). <https://doi.org/10.3389/fpubh.2019.00357>
- Jewell, J., Cherp, A., & Riahi, K. (2014). Energy security under de-carbonization scenarios: An assessment framework and evaluation under different technology and policy choices. *Energy Policy*, 65, 743–760. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513010744>
- Jiang, H., Lu, N., Yao, L., Qin, J., & Liu, T. (2023). Impact of climate changes on the stability of solar energy: Evidence from observations and reanalysis. *Renewable Energy*, 208(March), 726–736. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.114>
- Knowles, N., Scott, D., & Steiger, R. (2023). Sustainability of snowmaking as climate change (mal)adaptation: an assessment of water, energy, and emissions in Canada's ski industry. *Current Issues in Tourism*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/13683500.2023.2214358>
- Koukoufikis, G., Schockaert, H., Paci, D., Filippidou, F., Caramizaru, A., Della Valle, N., Candelise, C., Murauskaite-Bull, I., & Uihlein, A. (2023). *Energy Communities and Energy Poverty*. <https://doi.org/10.2760/389514>
- Lemus Casanovas, J. L. B. (2021). Assessing internal changes in the future structure of dry-hot compound events: The case of the Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(6), 1721–1738. <https://nhess.copernicus.org/articles/21/1721/2021/nhess-21-1721-2021-relations.html>
- Liu, G., Hu, J., Chen, C., Xu, L., Wang, N., Meng, F., Giannetti, B. F., Agostinho, F., Almeida, C. M. V. B., & Casazza, M. (2021). LEAP-WEAP analysis of urban energy-water dynamic nexus in Beijing (China). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136(September 2020), 110369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110369>
- Londoño Pineda, A. A., Vélez Rojas (Oscar), O. A., Jonathan, M. P., & Sujitha, S. B. (2019). Evaluation of climate change adaptation in the energy generation sector in Colombia via a composite index — A monitoring tool for government policies and actions. *Journal of Environmental Management*, 250, 109453. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109453>
- Nolan, R. H., Collins, L., Leigh, A., Ooi, M. K. J., Curran, T. J., Fairman, T. A., Resco de Dios, V., & Bradstock, R. (2021). Limits to post-fire vegetation recovery under climate change. *Plant Cell and Environment*, 44(11), 3471–3489. <https://doi.org/10.1111/pce.14176>
- OECC. (2021). *Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic 2020-2050*. https://www.mediambient.ad/images/stories/CanviClimatic/Memoria_EENCC.pdf
- OPCC-CTP. (2021). *Estratègia Pirinenca de Canvi Climàtic: una estratègia per a la cooperació en l'acció climàtica*. <https://www.opcc-ctp.org/ca/proyecto/epicc>

- Özer, B., Görgün, E., & Incecik, S. (2013). The scenario analysis on CO2 emission mitigation potential in the Turkish electricity sector: 2006–2030. *Energy*, *49*, 395–403. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212008468>
- Quintana, A. (2023). *Projeccions de canvi climàtic a andorra: anàlisi i càlcul d'indicadors en el marc de l'estratègia nacional d'adaptació al canvi climàtic*. [Universitat Rovira i Virgili]. <http://hdl.handle.net/20.500.11797/TFG6035>
- 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), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.056>
- Silvagrina. (2016). *Potencial fustaner aprofitable dels boscos d'Andorra per la producció d'estella de biomassa*.
- Silvagrina. (2023). *Avaluació de l'aprofitament energètic de la biomassa d'estella del Principat d'Andorra*.
- Suomalainen, K., Wen, L., Sheng, M. S., & Sharp, B. (2022). Climate change impact on the cost of decarbonisation in a hydro-based power system. *Energy*, *246*, 123369. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123369>
- Teresa Cervera, Xavi Rabascall, Teresa Baiges, et al. (2022). *Metodologia de càlcul de l'impacte de la gestió forestal en els serveis ecosistèmics: carboni, aigua i biodiversitat* (A. i A. R. Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Acció Climàtica (ed.)).
- Travesset-Baro, O. (2017). Prospectiva energètica al Principat d'Andorra. Model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista [Universitat Politècnica de Catalunya]. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <http://www.tdx.cat/handle/10803/460913>
- Van Vliet, M. T. H., Sheffield, J., Wiberg, D., & Wood, E. F. (2016). Impacts of recent drought and warm years on water resources and electricity supply worldwide. *Environmental Research Letters*, *11*(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124021>
- WMO. (2022). *2022 State of Climate Services - Energy*.
- Yin, J., Molini, A., & Porporato, A. (2020). Impacts of solar intermittency on future photovoltaic reliability. *Nature Communications*, *11*(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18602-6>