



Potencial d'aprofitament solar en cobertes d'edificis del Pirineu

Memòria tècnica i justificació del pressupost

Ajuts de recerca en el marc de la CTP, modalitat C: Projectes d'investigació i desenvolupament tecnològic

Referència: ACTP023-AND/2014

Sant Julià de Lòria, febrer de 2017



Govern d'Andorra



ÍNDIX

1.	CONTEXTUALITZACIÓ DEL PROJECTE	3
1.1	El sector energètic d'Andorra	3
1.2	L'aprofitament de l'energia solar al Pirineu	3
1.3	Objectius del projecte	4
1.4	Zones d'estudi	5
1.5	Grups de recerca i actors participants	5
2.	ACTIVITATS DESENVOLUPADES	8
2.1	Caracterització del potencial del recurs solar	8
2.2	Caracterització de les cobertes	11
2.3	Integració d'ombres en el SIG	13
2.4	Integració de dades econòmiques en el SIG	14
2.5	Anàlisi d'escenaris alternatius	15
2.6	Modelització de les corbes de consum elèctric	17
2.7	Potencial de generació FV autòctona i estalvi d'emissions	19
2.8	Elaboració plataforma web pública	20
2.9	Validació del potencial del recurs caracteritzat	21
2.10	Estudi d'ombres en edificis característics	23
2.11	Estudi dels costos econòmics i eficiències de les instal·lacions	24
2.12	Modelització de les corbes de generació elèctrica FV	24
2.13	Accions de transferència de coneixement cap a la societat	26
3.	PUBLICACIONS I ASSISTÈNCIA A CONGRESSOS	29
4.	VALORACIÓ GLOBAL DEL PROJECTE	30
5.	BIBLIOGRAFIA	32

1. Contextualització del projecte

1.1 El sector energètic d'Andorra

Actualment, la situació energètica d'Andorra es caracteritza per una dependència gairebé total de l'exterior (>95%) i una alta supeditació als combustibles fòssils, un recurs finit i subjecte a una alta volatilitat tant en preu com en disponibilitat. En el cas de l'energia elèctrica, tan sols un 15% de la demanda nacional es generada de forma autòctona gairebé íntegrament a partir de l'energia hidroelèctrica.

El Pla Estratègic de l'energia d'Andorra 2006-2015 (Govern d'Andorra, 2007) ja identificava com a eix prioritari la diversificació de fonts energètiques, amb un especial interès en fomentar el desenvolupament de les energies renovables. El Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra (Govern d'Andorra, 2012) aprofundeix en aquest àmbit estratègic pel país i realitza una primera estimació del potencial de les diverses fonts energètiques alternatives.

L'energia solar ha demostrat tenir la capacitat de convertir àrees amb usos eminentment residencials i comercials, en punts de generació energètica local. Grans ciutats com Barcelona o Boston han caracteritzat massivament les cobertes dels seus edificis per tal de determinar el potencial fotovoltaic i solar tèrmic de què disposen, mostrant els resultats obtinguts a través de plataformes web públiques per tal de fomentar la implantació de projectes de generació energètica a petita escala¹.

L'any 2013 va entrar en vigor a Andorra la reglamentació que regula les instal·lacions fotovoltaïques incorporades en edificacions i que en garanteix la venda de l'energia generada (Llei 5/2013). Aquesta llei ha representat un important impuls en el desenvolupament de l'energia fotovoltaica al país. Tot i així, des d'un punt de vista tècnic, s'identifica una absència d'informació referent al potencial solar de les edificacions existents.

1.2 L'aprofitament de l'energia solar al Pirineu

Aquest projecte s'ha centrat en caracteritzar el potencial de l'energia solar tèrmica i fotovoltaica integrada en edificis a diferents zones del Pirineu i molt especialment a Andorra. A diferència d'altres zones geogràfiques, la disponibilitat d'aquest recurs en zones de muntanya és molt heterogènia, essent altament influenciada per la topografia i la variabilitat arquitectònica. En aquest sentit, aquest projecte analitza diferents casos d'estudi

¹ Exemple interessant: <https://www.mapdwell.com/es/solar/boston>

al llarg del Pirineu amb l'objectiu d'entendre millor la influència d'aquests aspectes sobre el potencial solar.

Un dels elements clau del projecte és la implementació d'una plataforma online pública per mostrar la distribució de la capacitat d'aprofitament d'aquest recurs en les diferents zones d'estudi. Aquesta eina permet aportar informació als usuaris sobre el potencial energètic, la rendibilitat econòmica o els estalvis mediambientals d'hipotètiques instal·lacions d'energia solar en les cobertes dels seus edificis (visita la plataforma a <http://www.obsa.ad/solar>).

1.3 Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte és el de desenvolupar una metodologia que permeti d'una banda avaluar el potencial d'aprofitament del recurs solar al Pirineu i d'altra banda incentivar l'adopció d'aquesta tecnologia per part de les administracions i dels ciutadans.

La consecució de l'objectiu principal es preveu a partir de satisfer els següents objectius específics:

- O1. Caracteritzar el potencial del recurs solar en les valls escollides en funció de les idiosincràsies del seu relleu.
- O2. Caracteritzar les cobertes disponibles i les seves tipologies arquitectòniques.
- O3. Determinar el potencial d'irradiació de les cobertes caracteritzades.
- O4. Avaluar els requeriments mínims de la precisió de l'aixecament topogràfic per tal d'estimar el potencial d'aprofitament solar del recurs en cobertes d'edificis. En aquest sentit, és necessari un aixecament 3D en alta resolució?
- O5. Calcular el potencial d'aprofitament del recurs en funció de si la tecnologia escollida és la fotovoltaica o la solar tèrmica.
- O6. Determinar els temps de retorn característics de les diferents inversions, en funció dels costos associats i de les polítiques de preus existents en els diferents territoris.
- O7. Desenvolupar un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG) per mostrar la distribució geogràfica del recurs solar aprofitable en cobertes i els temps de retorn

de les possibles inversions en funció de les tecnologies escollides. Aquesta cartografia permetrà presentar zonificacions, mostrant el grau d'adequació de l'establiment d'aquestes tecnologies en les diferents valls d'estudi, d'acord amb les característiques de cadascuna.

- O8. Construir diferents escenaris per analitzar possibles canvis en la legislació vigent i el seu impacte sobre el grau d'aprofitament del recurs solar i la seva influència en les zonificacions definides.
- O9. Determinar les corbes de consum elèctric horari característiques en funció de les tipologies d'edificis de les zones estudiades.
- O10. Determinar les potencials corbes horàries de generació elèctrica de les diferents zones d'estudi mitjançant la tecnologia fotovoltaica.
- O11. Estimació de la demanda elèctrica de les zones d'estudi coberta en funció de la penetració d'instal·lacions fotovoltaiques implementades i de la correlació entre les corbes horàries de generació i de consum.
- O12. Potencialitat d'estalvi d'emissions de CO₂ a les zones d'estudi a partir de la introducció d'instal·lacions solars en cobertes.

1.4 Zones d'estudi

Inicialment aquest projecte plantejava quatre zones d'estudi (Tavascan, Sant Julià de Lòria, Andorra la Vella- Escaldes-Engordany i Ordino) de les quals es pretenia obtenir resultats en almenys tres d'elles. Finalment, s'han analitzat totes les zones plantejades i hi ha previsió d'estendre l'anàlisi a la resta de parròquies d'Andorra.

Actualment, la web <http://obsa.ad/solar/> mostra els resultats obtinguts a les zones de Tavascan, Ordino i Escaldes-Engordany. Properament es publicaran els resultats ja treballats a Andorra la Vella i Sant Julià de Lòria. A més llarg termini, s'inclourà l'anàlisi d'Encamp, Canillo i La Massana estenent així l'estudi a la totalitat del país.

1.5 Grups de recerca i actors participants

Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra (OBSA):

L'OBSA és la institució d'investigació privada més important d'Andorra que treballa en els diferents camps de recerca de la sostenibilitat. En relació a aquest projecte, una de les línies de treball del grup és la modelització de sistemes energètics amb l'objectiu de desenvolupar eines per donar suport a l'avaluació de polítiques energètiques tenint en consideració criteris de sostenibilitat. En aquest sentit, hem participat en l'elaboració del Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra (Govern d'Andorra, 2012), col·laborem de forma activa des de l'any 2016 amb l'Oficina de l'Energia i el Canvi Climàtic d'Andorra i hem publicat diversos articles científics en l'àmbit de la modelització energètica (Calvet et al., 2016; Quintero-Araujo et al., 2016; Travesset-Baro et al., 2016a, 2016b, 2016c, 2015).

L'equip de l'OBSA vinculat directament a aquest projecte ha estat:

- Dr. Èric Jover (coordinador general del projecte fins Març de 2015)
https://www.researchgate.net/profile/Eric_Jover
- Dr. Marc Pons (coordinador general del projecte a partir d'Abril de 2015)
https://www.researchgate.net/profile/Marc_Pons2
- Oriol Travesset-Baro
https://www.researchgate.net/profile/Oriol_Travesset-Baro
- Marc Vilella
https://www.researchgate.net/profile/Marc_Vilella
- Guillem Francisco
<https://www.linkedin.com/in/guillem-francisco-gin%C3%A9-06263412a/>
- Patricia Borges
<https://www.linkedin.com/in/patricia-borges-martins-a872b2a3/>

SUD Pirineus S.L. (Andorra):

SUD Pirineus S.L. és la sucursal de SUD Energies Renovables a Andorra. El grup SUD és un grup independent amb una contrastada experiència en el sector industrial, energètic i mediambiental, que ofereix serveis integrals en el camp de l'enginyeria, construcció i explotació d'energies renovables. La missió de la societat és la de promoure l'ús de les energies renovables i la millora en l'eficiència energètica, amb la voluntat de contribuir a fer un món més sostenible i respectuós amb el medi ambient. En concret és important destacar que l'empresa ha desenvolupat diferents projectes relacionats amb la instal·lació de panells solars fotovoltaics al Pirineu i concretament a Andorra. Així doncs, és coneixedora de les particularitats de les zones de muntanya.

L'equip de SUD Pirineus S.L. vinculat directament a aquest projecte ha estat:

- Pere Farriol (<https://www.linkedin.com/in/pere-farriol-1151652b/es>)

SUMM Lab-UPC (Catalunya):

El SUMM Lab (Sustainability Measurement and Modeling Lab) és un grup de recerca multidisciplinari (Grup de Recerca Reconegut per la Generalitat de Catalunya SGR 2014-2016, en modalitat de Grup de Recerca Emergent) especialitzat en mesurar i modelitzar les moltes facetes que engloba la ciència de la sostenibilitat. El Summ Lab va ser fundat el 2009 i les seves principals activitats s'organitzen al voltant de projectes d'investigació. Aquests projectes de recerca estan centrats principalment en el mesurament de la sostenibilitat i la modelització dels sistemes socials i ecològics a través d'eines d'econometria, dinàmica de sistemes, modelització basada en agents, xarxes complexes i sistemes d'informació geogràfica. El Dr. Martí Rosas-Casals, responsable territorial del projecte per Catalunya, és actualment el responsable d'aquest grup de recerca.

Cal destacar que aquest grup de recerca treballa en diferents línies d'investigació relacionades amb la complexitat de la infraestructura elèctrica (<http://summlab.upc.edu/en/projects-1/infrastructures-1>) així com també diversos projectes d'eficiència energètica en edificis i habitatges (<http://summlab.upc.edu/projects-1/energy-efficiency>).

L'equip del SUMM Lab vinculat directament a aquest projecte ha estat:

- Dr. Martí Rosas-Casals (https://www.researchgate.net/profile/Marti_Rosas-Casals)

Enerbyte (Catalunya):

Enerbyte, Smart energy solutions és una empresa de base tecnològica en l'àmbit de l'energia de recent creació basada a Sant Cugat del Vallès. Un dels principals objectius de l'empresa i el més rellevant en el marc d'aquest projecte és el foment de l'estalvi elèctric residencial a partir del millor coneixement dels perfils de consum i intentant modificar el comportament dels consumidors. El seu treball des de la seva creació s'ha centrat en el desenvolupament d'un assessor energètic virtual (*Virtual Energy Advisor*) el qual a través de l'anàlisi dels patrons de consum, guia a l'usuari per ser més eficient en l'ús d'energia elèctrica.

L'equip d'Enerbyte vinculat directament a aquest projecte ha estat:

- Dr. Pep Salas (https://www.researchgate.net/profile/Pep_Salas)

2. Activitats desenvolupades

El desenvolupament del projecte s'ha basat en la realització de les activitats plantejades inicialment en el Document Descriptiu del projecte encaminades a assolir els diferents objectius establerts (veure Taula 1).

Activitat		Objectiu												
		O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	O10	O11	O12	
Caracterització del potencial del recurs solar	A1	■			■	■	■	■	■	■		■	■	■
Caracterització de les cobertes	A2		■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Integració d'ombres en el SIG	A3			■	■	■	■	■	■			■	■	■
Integració de dades econòmiques en el SIG	A4						■	■	■			■	■	■
Anàlisi d'escenaris alternatius	A5/B5							■						
Modelització de les corbes de consum elèctric	A6								■			■	■	■
Potencial de generació FV autòctona i estalvis d'emissions	A7										■	■	■	■
Elaboració plataforma web pública	A8/B6							■						
Validació del potencial del recurs caracteritzat	B1							■			■	■	■	■
Estudi d'ombres en edificis característics	B2			■	■	■	■	■	■		■	■	■	■
Estudi dels costos econòmics i eficiències de les instal·lacions	B3					■	■		■		■	■	■	■
Modelització de les corbes de generació elèctrica FV	B4										■	■	■	■

Taula 1. Tasques realitzades durant el projecte i objectius que pretenen assolir

A continuació es detallen les activitats realitzades i els resultats principals obtinguts durant el transcurs del projecte. Cal assenyalar que, tot i que el projecte finalitzava oficialment a finals de desembre de 2016, actualment s'està donant seguiment al projecte i la major part de les activitats segueixen actives.

2.1 Caracterització del potencial del recurs solar

Tasca: A1

Objectius que pretén assolir: O1, O4, O5, O6, O7, O8, O10, O11, O12

El primer pas en l'anàlisi del potencial solar de les zones d'estudi és la caracterització del terreny mitjançant models digitals d'elevacions (MDE). A diferència d'altres estudis també centrats en l'àmbit urbà (Brito et al., 2012; Cellura et al., 2012; Redweik et al., 2013) però ubicats en zones planes, en aquest cas la influència de la topografia és determinant en els resultats finals. En aquest sentit, és important caracteritzar adequadament les muntanyes per tal de representar les ombres que provoquen i en conseqüència, la limitació provocada en el nombre d'hores d'insolació que s'obtindrà en les zones d'estudi.

En el cas d'Andorra, per tal de representar el terreny es disposa d'un ràster de resolució 5x5 m), adequat per captar de forma acurada l'efecte de les muntanyes sobre la irradiació però insuficient per representar les cobertes dels edificis. Així doncs, és necessari treballar a resolucions superiors, havent de gestionar arxius molt pesats. Per evitar simulacions molt pesades, és important limitar el màxim possible l'àrea considerada en cada zona d'estudi però incloent en el ràster l'àrea suficient per captar l'efecte de l'orografia. El procés seguit en l'estimació del potencial del recurs solar és el següent:

1. **Identificació de l'àrea geogràfica.** L'àrea d'interès a incloure en el ràster es determina mitjançant el mètode *viewshed*² el qual permet identificar les zones d'un ràster amb visió directa respecte un o varis punts. D'aquesta manera, i tenint en consideració la trajectòria solar, s'obté la zona a considerar en el MDE (muntanyes que generen ombres sobre edificis). La Fig. 1 mostra el *viewshed* d'Escaldes amb el qual s'ha determinat aquesta zona d'estudi.



Fig. 1. *Viewshed* d'Escaldes (verd: zona visible, blau: edificis)

2. **Definició del MDE.** Basant-se en el mètode descrit en el punt anterior es construeix el ràster d'elevacions, el qual és la base de les posteriors simulacions. La Fig. 2 mostra el MDE d'Escaldes representant tant la zona urbana com tota la topografia influent en la irradiació solar. La resolució del ràster és de 1x1 m per representar adequadament les cobertes tot i que excepte en la zona del fons de vall, ha estat construït a partir del ràster 5x5 m.

² <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/3d-analyst/viewshed.htm>

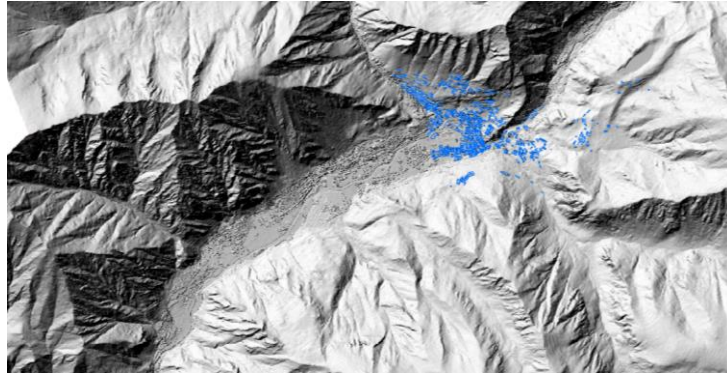


Fig. 2. MDE de la zona d'Escaldes-Engordany

3. **Simulació de la irradiació.** Per calcular la radiació incident en l'àrea d'estudi s'ha utilitzat l'eina *Solar Analyst* d'ArcGis (Fu and Rich, 1999), la qual estima el valor d'irradiació per cada punt del MDE. Els valors dels paràmetres utilitzats en les simulacions es mostren en la Taula 2.

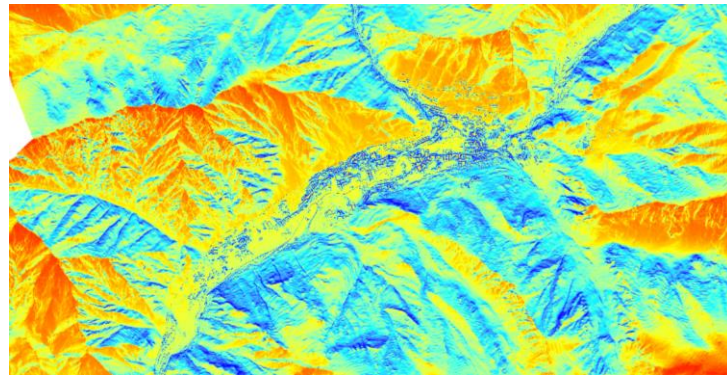


Fig. 3. Simulació de la radiació anual incident a Escaldes-Engordany

<i>Day interval</i>	14
<i>Hour interval</i>	1
<i>Calculation directions</i>	32
<i>Zenith divisions</i>	8
<i>Azimuth divisions</i>	8
<i>Diffuse model type</i>	UNIFORM_SKY
<i>Diffuse proportion</i>	0,3
<i>Transmitivity</i>	0,5

Taula 2. Valors dels paràmetres utilitzats en les simulacions amb Solar Analyst

La possibilitat de limitar la zona inclosa en la simulació, permet eliminar la topografia i així poder estimar l'efecte d'aquesta en el potencial d'irradiació solar de les cobertes. Segons l'anàlisi realitzat en dos de les zones d'estudi, la reducció del potencial solar degut a l'accidentada orografia és situa entre un 3,4% (Escaldes) i un 12,8% (Tavascan).

2.2 Caracterització de les cobertes

Tasca: A2

Objectius que pretén assolir: O2, O4, O5, O6, O7, O8, O9, O10, O11, O12

La caracterització de les cobertes dels edificis ha constatat principalment de dues fases diferenciades. Per una banda s'ha construït una capa 2D vectorial de les cobertes partint de les dades dels cadastres en els casos que ha estat possible i de la cartografia SIG disponible en cada cas. Val a dir que en la majoria de les zones estudiades, aquesta tasca ha anat acompanyada d'una digitalització manual mitjançant ortofotos i de treball de camp per completar la informació. D'altra banda, per captar el 3D de les cobertes, s'ha construït un model digital de superfícies (MDS) obtingut mitjançant escanejat LiDAR (Light Detection and Ranging). Aquesta tecnologia permet generar models d'alta precisió en tres dimensions (veure Fig. 4), permetent captar factors essencials en l'interacció entre la radiació solar i les cobertes.



Fig. 4. Aixecament d'alta precisió dels edificis i el seu entorn

Tenint en compte les dades LiDAR disponibles de les diferents zones d'estudi, la resolució en que s'ha pogut construir els MDS és de 1x1 m. Aquest nivell de resolució permet captar adequadament factors com l'orientació i la inclinació de les cobertes però presenta problemes per representar petits elements com xemeneies o aparells de climatització.

Tal com s'observa en la Fig. 5, disposar dels models d'alta precisió permet analitzar característiques principals de les cobertes dels edificis de les diferents zones d'estudi com les orientacions o la superfície.

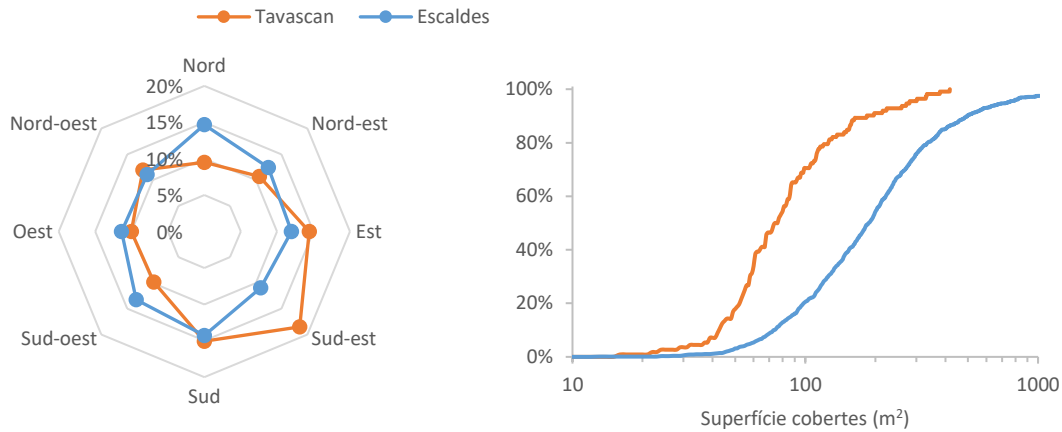


Fig. 5. Distribució d'orientacions i histograma de superfícies de les cobertes

Tot i que els MDS construïts a partir dels vols LiDAR existents són de molt bona qualitat, contenen alguns errors degut a imprecisions puntuals en l'escaneig. Per aquest motiu, s'han explorat altres tècniques que ens permetin corregir zones puntuals dels MDS. En aquest sentit, s'han treballat en dues línies, la fotogrametria i escanejos LiDAR per a zones concretes. Tal com s'observa en la Fig. 6, s'ha pogut construir un model 3D de l'Escola Andorrana de Sta. Coloma a partir de fotografies realitzades amb drone i el software *Agisoft Photoscan*. Cal assenyalar que aquestes fotografies s'han obtingut gràcies a la col·laboració amb Actuatech.

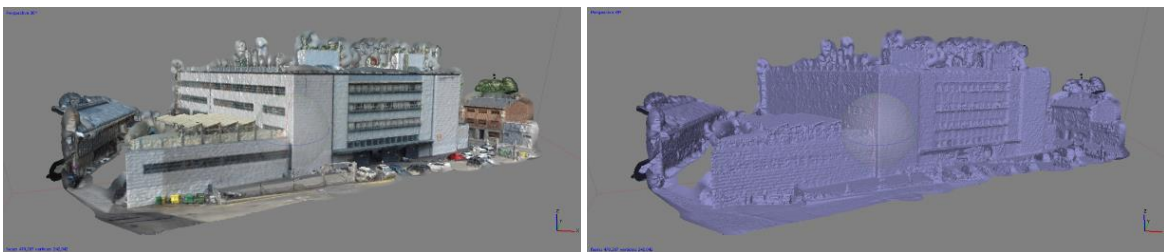


Fig. 6. Model 3D de l'Escola Andorrana de Sta. Coloma realitzat amb *Agisoft Photoscan*

D'altra banda s'han realitzat escanejos LiDAR terrestres amb l'objectiu de poder millorar zones específiques dels MDS. La Fig. 7 mostra la campanya d'escaneig LiDAR realitzada durant el mes de juliol de 2016.

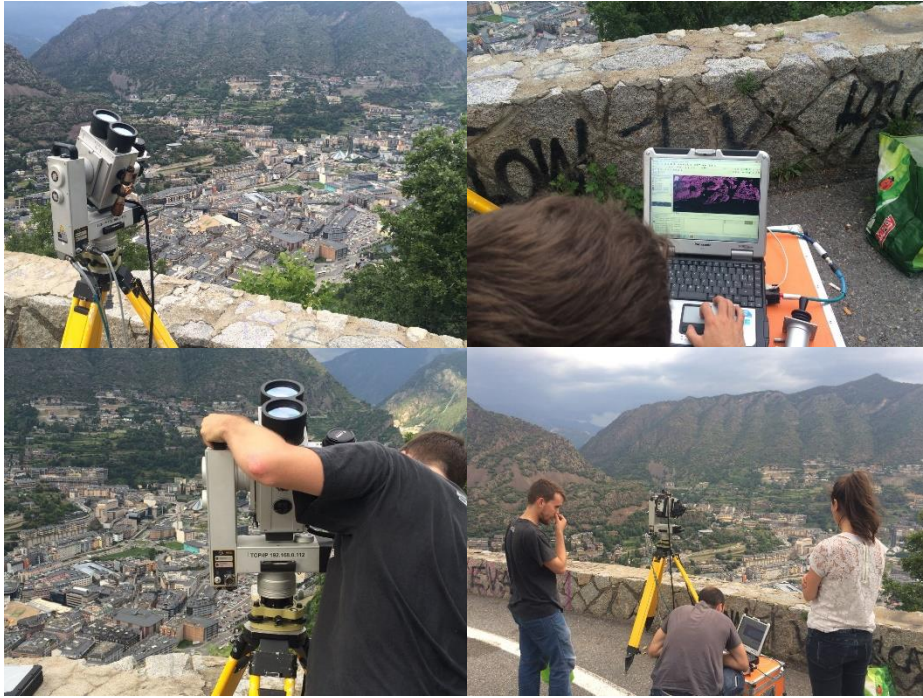


Fig. 7. Escaneig LiDAR a Andorra la Vella

2.3 Integració d'ombres en el SIG

Tasca: A3

Objectius que pretén assolir: O3, O4, O5, O6, O7, O8, O10, O11, O12

Les principals ombres generades sobre els edificis son provocades per l'orografia, altres edificis o inclús arbres propers a edificacions. Tots aquests elements es representen en el model mitjançant el ràster d'elevacions a resolució 1x1 m. Tal com s'observa en la Fig. 8, els elements grans de les cobertes com forats o voladissos es representen correctament. Per contra elements arquitectònics més petits com xemeneies o aparells de climatització no s'aconsegueixen representar en tots els casos. Per corregir aquest aspecte, en les estimacions de potencial s'aplica un factor corrector d'aprofitament de coberta.

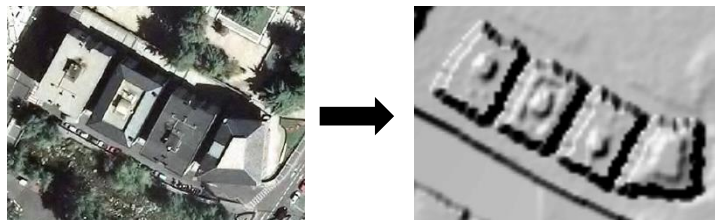


Fig. 8. Ortofoto i MDS d'un conjunt d'edificis generat mitjançant LiDAR

2.4 Integració de dades econòmiques en el SIG

Tasca: A4

Objectius que pretén assolir: O6, O7, O8, O10, O11, O12

Un cop es disposa del model que representa de forma acurada el terreny i les cobertes dels edificis, s'ha procedit a realitzar les simulacions per tal d'obtenir la irradiació solar incident en cada una de les cobertes. En la Fig. 9 s'observa el procés realitzat, partint del MDE fins a l'obtenció de la irradiació solar en les cobertes.

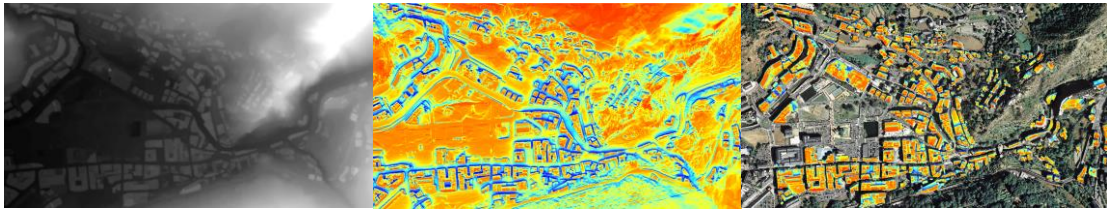


Fig. 9. Procés realitzat per calcular la irradiació incident en les cobertes

Aplicant un llindar mínim aprofitable (1000 HSP³) de radiació anual s'obté la superfície de coberta aprofitable per a cada tipus d'instal·lació (solar fotovoltaica o solar tèrmica). Amb aquesta informació i les dades de costos econòmics i eficiències de les instal·lacions presentades en la Secció 2.11, s'han generat els mapes del temps de retorn estimat de potencials instal·lacions fotovoltaïques en les cobertes dels edificis de les zones d'estudi (Fig. 10). En aquest cas, un factor important que s'ha tingut en compte és la legislació existent en cada una les zones, actualment molt més beneficiosa en territori andorrà que espanyol.

³ Hores solar pic

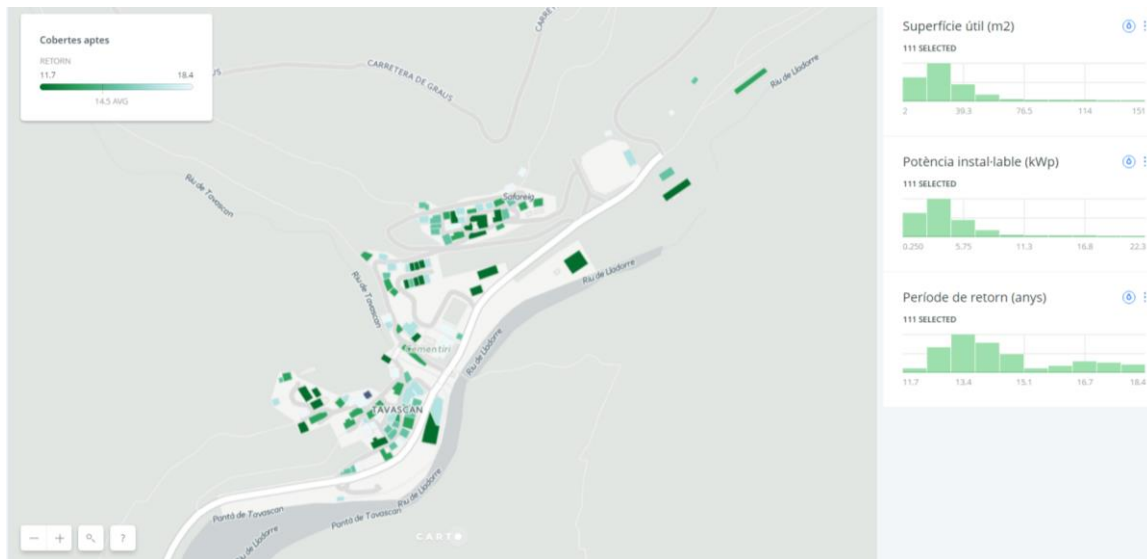


Fig. 10. Períodes de retorn de potencials instal·lacions fotovoltaïques al poble de Tavascan

2.5 Anàlisi d'escenaris alternatius

Tasca: A5/B5

Objectius que pretén assolir: O8

Partint dels SIG amb els períodes de retorn de les instal·lacions, s'ha implementat una eina per analitzar possibles canvis respecte l'escenari actual. Concretament s'ha analitzat quin seria l'impacte (en termes de períodes de retorn) de fer canvis en la legislació vigent sobre generació fotovoltaïca. La Fig. 11 mostra els períodes de retorn actuals d'hipotètiques instal·lacions fotovoltaïques a Escaldes-Engordany tenint en consideració l'actual legislació andorrana, la qual estableix una tarifa de compra d'entre 0,20-0,24 € el kWh d'electricitat generada⁴. L'escenari representat en la Fig. 12 considera una reducció en la tarifa rebuda per les grans instal·lacions.

⁴ <http://www.mediambient.ad/energia/generacio-d-energia-electrica-d-origen-fotovoltaic>

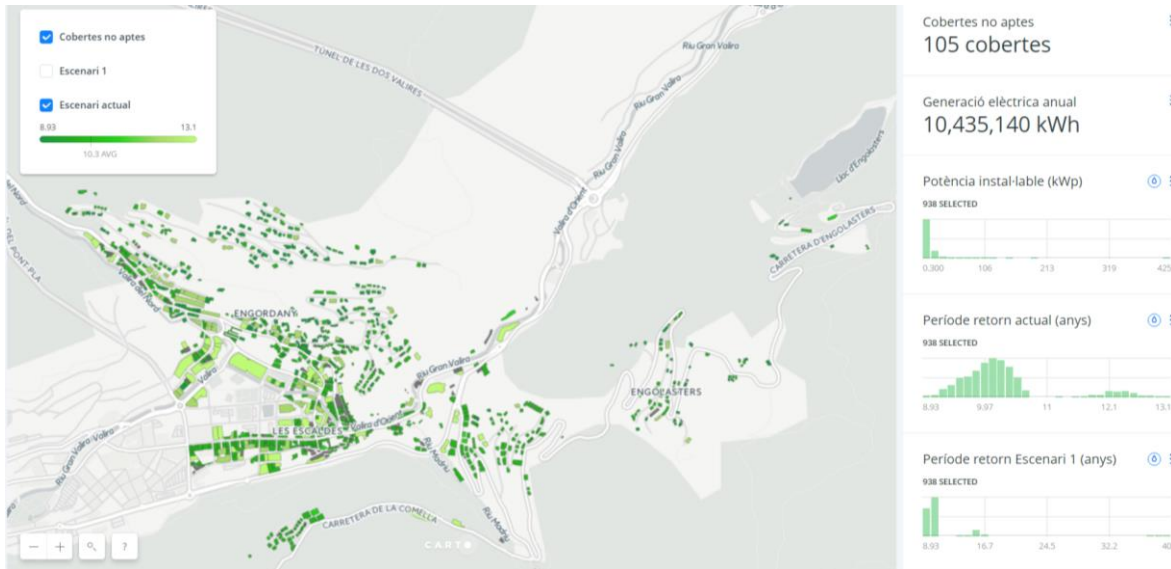


Fig. 11. Períodes de retorn de l'escenari actual

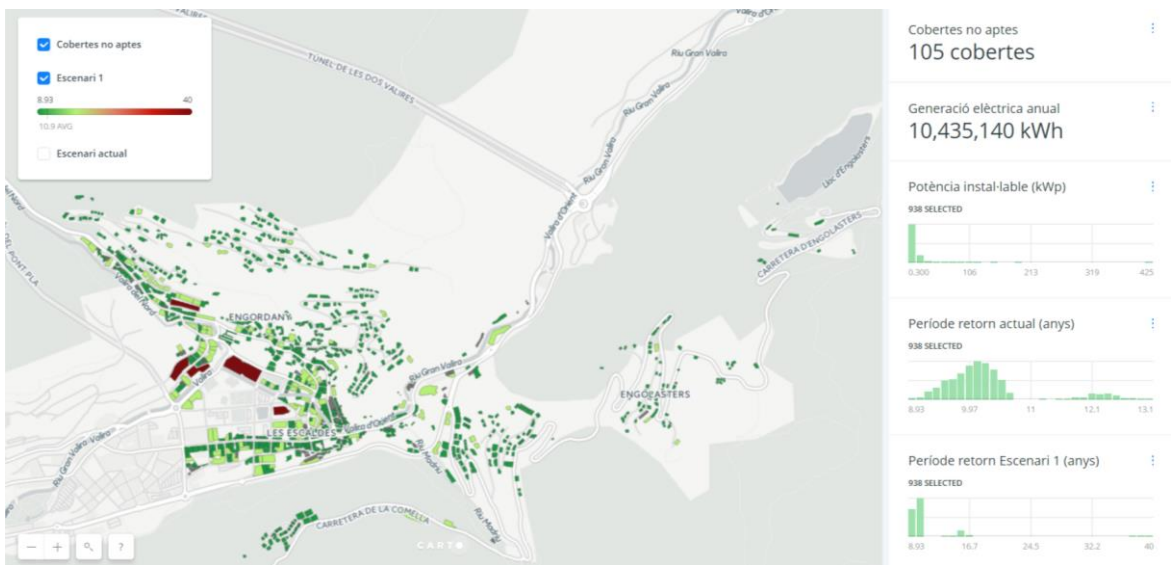


Fig. 12. Períodes de retorn de l'Escenari 1

L'interès d'aquesta eina es centra principalment en l'anàlisi de l'impacte de possibles canvis en la legislació. En aquesta línia, s'ha iniciat una col·laboració amb l'Oficina de l'Energia i el Canvi Climàtic d'Andorra per treballar conjuntament en aquest àmbit estratègic pel país i assegurar la transferència de resultats cap a l'administració pública. Específicament, s'està fent ús d'aquesta eina per definir les tarifes de preus de la nova convocatòria de l'any 2017.

2.6 Modelització de les corbes de consum elèctric

Tasca: A6

Objectius que pretén assolir: O9, O11

Aquesta activitat s'ha abordat a través de dues línies de treball. Per una banda, s'ha treballat amb dades reals de consum elèctric proporcionades per Forces Elèctriques d'Andorra (FEDA). En aquest sentit, únicament s'ha tingut accés a dades horàries de consum de l'any 2014 d'hotels, administracions i escoles. Aquestes dades han estat tractades per ser representades de forma dinàmica a escala mensual a través de l'eina Carto⁵. La Fig. 13 mostra un mapa d'intensitat del consum elèctric mensual dels edificis d'Escaldes-Engordany (inclou únicament hotels, administració i escoles). Els mapes d'intensitat són molt interessants per tal de realitzar zonificacions en base a consums d'energia. En la Secció 2.12 s'estudien les corbes de generació d'hipotètiques instal·lacions i es creuen amb les corbes de consum per analitzar el potencial d'autoabastiment elèctric mitjançant energia fotovoltaica.



Fig. 13. Consum elèctric mensual dels edificis d'Escaldes-Engordany l'any 2014. Inclou únicament hotels, administració i escoles ([Link al mapa interactiu](#))

D'altra banda, s'ha treballat en la modelització de les corbes horàries de les diferents tipologies d'edificis basant-se en dades històriques proporcionades per FEDA i en estudis de països pròxims (REE, 1998). La corba horària de consum elèctric del conjunt d'Andorra s'estima partint dels perfils mensuals dels diferents sectors i a continuació s'utilitzen els

⁵ <https://carto.com/>

perfils horaris en funció de si ens trobem en dia festiu o feiner. S'ha desenvolupat una macro amb VBA per tal de poder escollir el perfil horari a modelitzar segons mes, any i dia festiu o feiner. La Fig. 14 presenta la corba horària modelitzada del consum elèctric per un dia feiner d'hivern. Cal destacar aquest detall ja que degut a canvis de llum i de temperatura durant l'any i d'activitat durant la setmana no tots els dies de l'any es comporten de la mateixa manera. En aquest exemple s'ha considerat un dia feiner del mes de gener on generalment s'assoleixen valors màxims anuals de consum. Si es comparen les dades del model amb els consums històrics s'observa com els consums nocturns estan infravalorats mentre que les puntes diàries estan ben representades. Tot i que és necessari afinar els resultats, aquest model pot ser molt útil per tal d'observar l'impacte de modificar les corbes de consum dels diferents sectors o tipologies d'edificis.

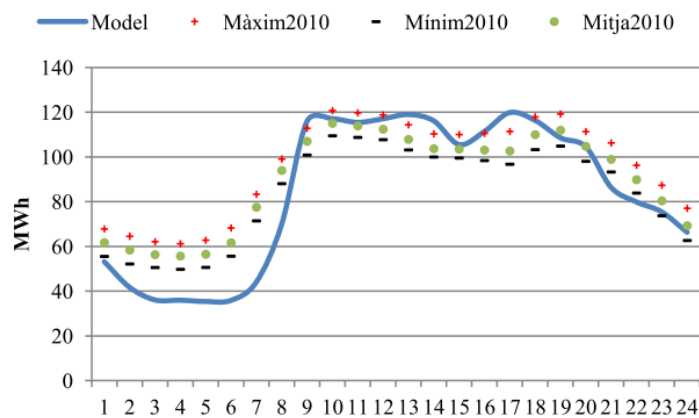


Fig. 14. Corba de consum horària d'un dia feiner del mes de gener

Per poder millorar la precisió d'aquest model cal prioritzar el treball en dues línies principals:

1. Informació dels cadastres. És necessari millorar la informació present en els cadastres i que els comuns comparteixin aquestes dades. En aquest sentit, únicament s'ha tingut accés als cadastres de les parròquies d'Ordino i Escaldes-Engordany. També ha estat necessari realitzar un important treball de camp per completar informació present en els cadastres sobre usos dels diferents edificis. Aquesta tasca està descrita en profunditat en el treball final de màster "Canvi climàtic i consums energètics del parc edificat a Andorra: el cas d'Escaldes-Engordany" (Borges, 2016).
2. Disposar d'un ampli ventall de dades reals de consum elèctric de les diferents tipologies d'edificis segons sectors d'activitat i usos. En aquest sentit, la instal·lació de comptadors digitals per part de FEDA hauria de fer possible disposar d'aquestes dades en un futur pròxim.

2.7 Potencial de generació FV autòctona i estalvi d'emissions

Tasca: A7

Objectius que pretén assolir: O10, O11, O12

Per tal de determinar el potencial màxim de generació elèctrica mitjançant energia solar fotovoltaica, s'ha convertit la irradiació incident sobre les cobertes en electricitat tenint en compte les especificacions dels mòduls considerats. Per aquests càlculs s'han utilitzat mòduls fotovoltaics de 250 Wp; 1,7 m², una eficiència global del sistema del 80% i s'ha considerat una àrea útil de coberta del 75% per excloure elements tècnics i arquitectònics presents en les cobertes. La Fig. 15 mostra el potencial de generació elèctrica anual de les cobertes dels edificis del poble de Tavascan.

Els resultats obtinguts en les zones analitzades fins al moment mostren un potencial de generació elèctrica mitjançant energia solar fotovoltaica de 21 GWh/any a Escaldes-Engordany i de 780 MWh/any a Tavascan. Tenint en compte els residents de cada zona i els consums mitjans d'electricitat d'Andorra i Catalunya, podem concloure que cobrint el total de les cobertes mitjançant mòduls fotovoltaics, es satisfaria el 21% i el 127% de la demanda d'Escaldes i Tavascan, respectivament.



Fig. 15. Potencial de generació elèctrica anual de les cobertes dels edificis del poble de Tavascan

Per determinar l'estalvi d'emissions associat a les potencials instal·lacions, s'han considerat les emissions del mix de generació elèctrica dels països que exporten electricitat a Andorra. Tenint en compte les dades de l'any 2015, el factor d'emissions de l'electricitat importada d'Espanya és de 302 gCO₂/kWh (OCCC, 2016) mentre que el de la francesa de 44 gCO₂/kWh (Rte, 2016). Considerant les importacions de cada un dels països i la generació autòctona, el factor d'emissions de l'electricitat consumida a Andorra és de 181 gCO₂/kWh.

La Fig. 16 mostra el potencial d'estalvi d'emissions que aportarien les instal·lacions fotovoltaïques a un període de 20 anys al poble de Tavascan.

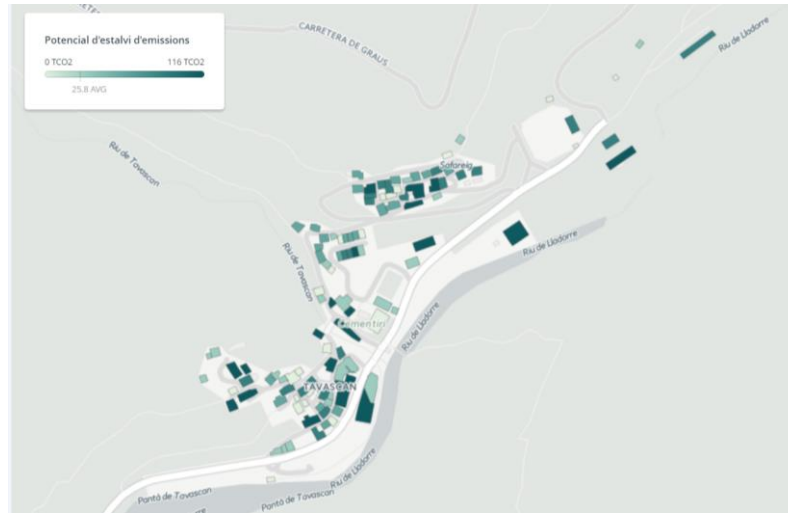


Fig. 16. Potencial d'estalvi d'emissions de CO₂ al poble de Tavascan

2.8 Elaboració plataforma web pública

Tasca: A8/B6

Objectius que pretén assolir: O7

El punt final d'aquest projecte i el que li aporta un valor afegit és el desenvolupament de la plataforma web on es difonen els principals resultats de l'estudi i també informació general sobre l'energia solar tèrmica i fotovoltaica. D'aquesta manera es posa a disposició de qualsevol ciutadà la informació generada i es fomenta la implementació de projectes d'energia solar.

Tot i que el contingut de la web encara no és el definitiu, l'estructura s'ha definit tenint en compte els resultats pendents de generar en els propers mesos. En la pestanya inicial es presenta una petita contextualització del projecte i es mostren en diferents mapes interactius els principals resultats d'interès per a la societat. Els diferents mapes inclouen una sèrie de *widgets* que realitzen càlculs dinàmics aportant informació de la zona emmarcada en el mapa i permetent així poder analitzar i comparar ràpidament els resultats a diferents escales. La Fig. 17 mostra el mapa de potencial d'aprofitament fotovoltaic a la parròquia d'Ordino i les opcions de visualització d'altres zones geogràfiques estudiades i altres resultats obtinguts.



Fig. 17. Potencial d'aprofitament fotovoltaic a la parròquia d'Ordino

La resta de pestanyes de la web es centren en fer pedagogia sobre l'energia solar, explicar les particularitats de l'energia solar a Andorra i finalment s'inclou un recull d'enllaços d'interès per aportar material tècnic existent d'interès i facilitar informació sobre la legislació i les ajudes vigents al nostre país en matèria d'energia solar.

A finals de Gener de 2017, aquesta web presenta els resultats obtinguts a Tavascan, Escaldes-Engordany i Ordino. Val a dir que actualment s'està treballant en les parròquies d'Andorra la Vella i Sant Julià de Lòria i a mitjà termini s'espera poder incloure tot Andorra. Gràcies a que la gestió de la web es fa des del propi OBSA, a mesura que anem generant i validant resultats aquests son immediatament integrats a la web.

2.9 Validació del potencial del recurs caracteritzat

Tasca: B1

Objectius que pretén assolir: O7, O10, O11, O12

A mesura que obtenim resultats de cada una de les zones, es realitza una validació inicial d'aquests. La millor aproximació per validar els resultats d'irradiació solar obtinguts a través de les simulacions és a partir de mesures reals realitzades amb piranòmetres. Les primeres validacions s'han realitzat amb les dades disponibles de les estacions meteorològiques existents. La Fig. 18 mostra la comparativa entre els resultats de les simulacions realitzades amb ArcGis i les mesures de les estacions meteorològiques de Roc de Sant Pere i Envalira.

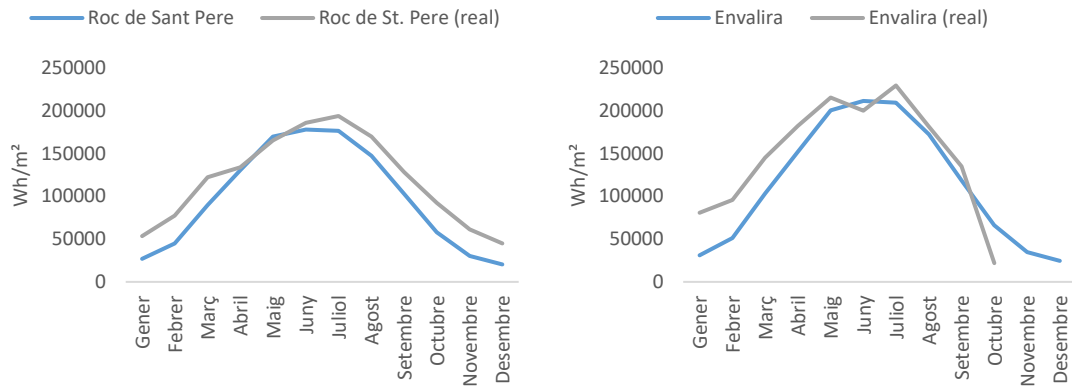


Fig. 18. Comparativa entre simulació i mesures reals de la irradiació solar mitjana mensual a les estacions de Roc de Sant Pere i Envalira

Un patró interessant observat són els resultats obtinguts durant els mesos d'hivern. Així com en els mesos centrals de l'any la simulació s'ajusta molt bé a les mesures reals, durant els mesos d'hivern aquesta s'allunya de la realitat. L'ajust mensual dels valors utilitzats de transmissivitat durant les simulacions és el factor determinant per tal de poder reduir les discrepàncies entre el model resultant i la realitat.

Per tal de complementar les mesures existents de radiació a Andorra, s'ha instal·lat un piranòmetre a la parròquia de Sant Julià de Lòria (veure Fig. 19). Aquestes noves dades serviran per completar les mesures existents al país. El nostre objectiu és, un cop disposem de la sèrie anual de 2017 validada, publicar periòdicament les dades a la plataforma web del projecte. En paral·lel, aquesta instal·lació ens servirà de gran utilitat per testejar l'enviament de dades en temps real, aplicable més endavant a molts altres camps en l'àmbit de la recerca i la innovació. En aquest sentit s'ha treballat també amb altres sensors i amb microcontroladors de baix cost amb interfície wifi integrada per tal de mesurar i enviar dades remotament.

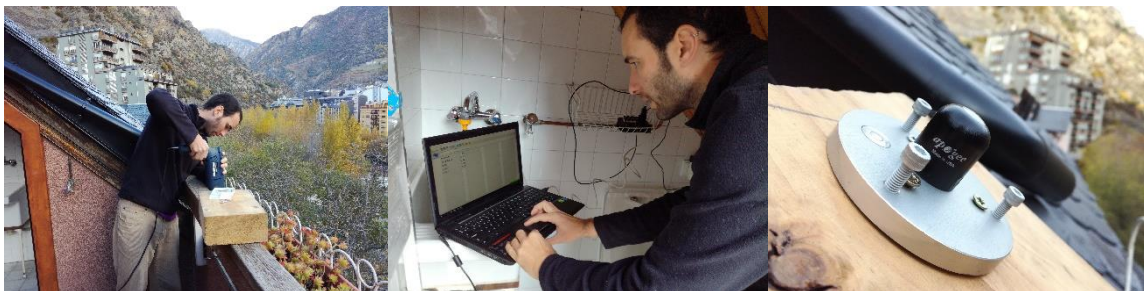


Fig. 19. Recull fotogràfic de la instal·lació i posta en servei del piranòmetre

2.10 Estudi d'ombres en edificis característics

Tasca: B2

Objectius que pretén assolir: O2, O3, O4, O5, O6, O7, O8, O10, O11, O12

Un altre mètode per validar i complementar els resultat obtinguts amb les simulacions ha estat la realització d'estudis d'ombres en edificis puntuals. Mitjançant l'ús del programari PVSYST s'han estudiat les ombres provocades en els edificis per diferents elements arquitectònics com xemeneies o zones addicionals del propi edifici. La Fig. 20 mostra el model 3D realitzat amb PVSYST per a l'estudi de les ombres del Centre Esportiu d'Ordino.

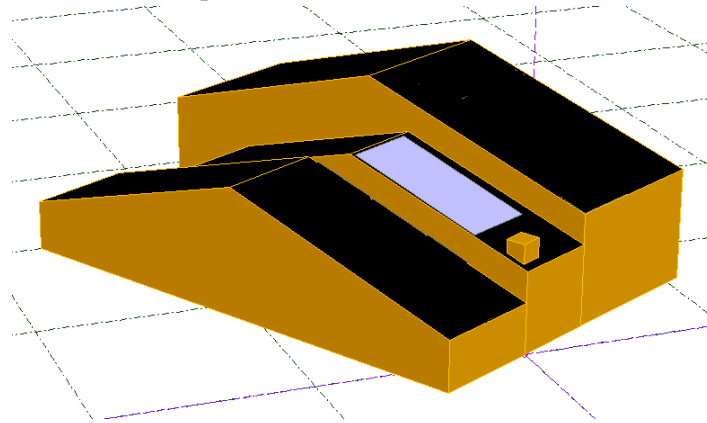


Fig. 20. Model PVSYST del Centre Esportiu d'Ordino

D'altra banda, s'han realitzat mesures de l'horitzó llunyà muntanyós amb l'objectiu de validar el potencial del recurs solar caracteritzat a través de les simulacions. En la tarda per la singularitat de l'edifici.

Fig. 21 s'observa l'horitzó llunyà realitzat en una vivenda ubicada darrera de Caldea, podent-se apreciar clarament l'ombra provocada durant la tarda per la singularitat de l'edifici.

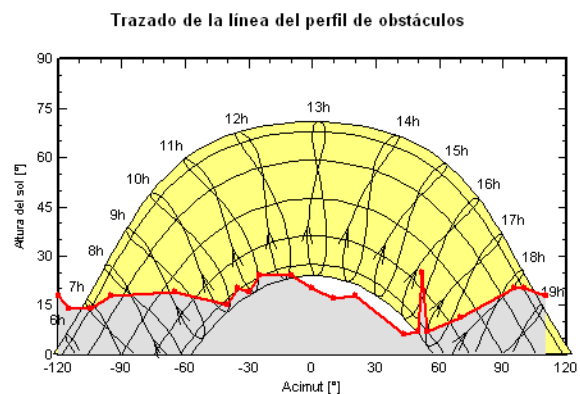


Fig. 21. Horitzó solar realitzat a una vivenda ubicada darrera de Caldea

2.11 Estudi dels costos econòmics i eficiències de les instal·lacions

Tasca: B3

Objectius que pretén assolir: O5, O6, O8, O10, O11, O12

Les característiques tècniques i els costos econòmics de les instal·lacions caracteritzades s'han establert gràcies a l'experiència de l'empresa SUD Pirineus S.L. D'altra banda, per determinar les zones aptes de les cobertes on poder realitzar s'ha establert un llindar mínim d'hores d'insolació. La Taula 3 presenta les característiques principals considerades en els càlculs relatius a l'energia solar fotovoltaica.

Llindar zones aptes:	>1000 HSP	
Mòduls fotovoltaics:	1,7 m ²	250 Wp
Eficiència instal·lacions:	80%	
Cost instal·lacions:	Potència (kWp)	€/Wp
	P<=2	2,34
	2>P<=6	1,94
	6>P<=20	1,79
	20>P<=50	1,65
P>50	1,6	
Cost manteniment:	25	€/kWp·any

Taula 3. Característiques econòmiques i tècniques considerades en els càlculs

2.12 Modelització de les corbes de generació elèctrica FV

Tasca: B4

Objectius que pretén assolir: O10, O11

La realització de les simulacions de radiació a escala mensual aporta la possibilitat d'analitzar l'estacionalitat en la producció d'energia solar fotovoltaica. Finalment s'ha optat per aquest nivell de resolució veient-nos principalment limitats pels temps de computació. Poder disposar d'una resolució diària o inclús horària seria molt interessant per l'anàlisi de la generació elèctrica però amb la metodologia utilitzada i els processadors disponibles és totalment inviable.

L'anàlisi del potencial màxim de generació elèctrica (veure Fig. 22) mensual mitjançant energia solar fotovoltaica és de gran interès especialment si tenim la possibilitat de creuar aquestes dades amb les de consum.

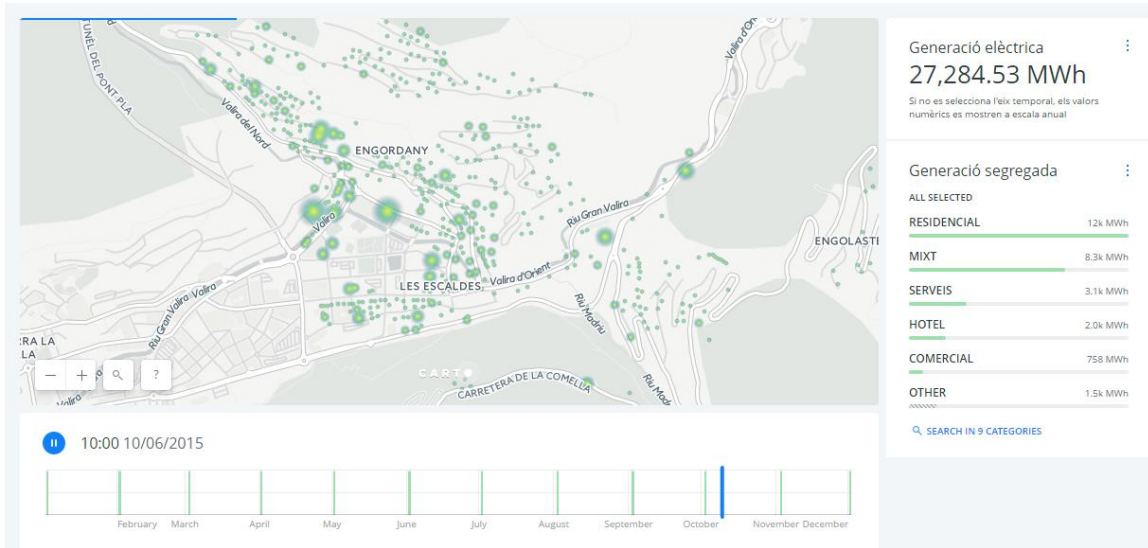


Fig. 22. Potencial màxim de generació elèctrica mensual mitjançant energia solar fotovoltaica en les cobertes dels edificis d'Escaldes-Engordany (Mapa interactiu disponible en la web <http://www.obsa.ad/solar>)

Les dades espacialitzades de consum elèctric mensual de la parròquia d'Escaldes-Engordany presentades en la Secció 2.6 permeten comparar el potencial de generació mitjançant solar fotovoltaica amb el consum elèctric i obtenir així el perfil mensuals de generació-consum (Fig. 23).

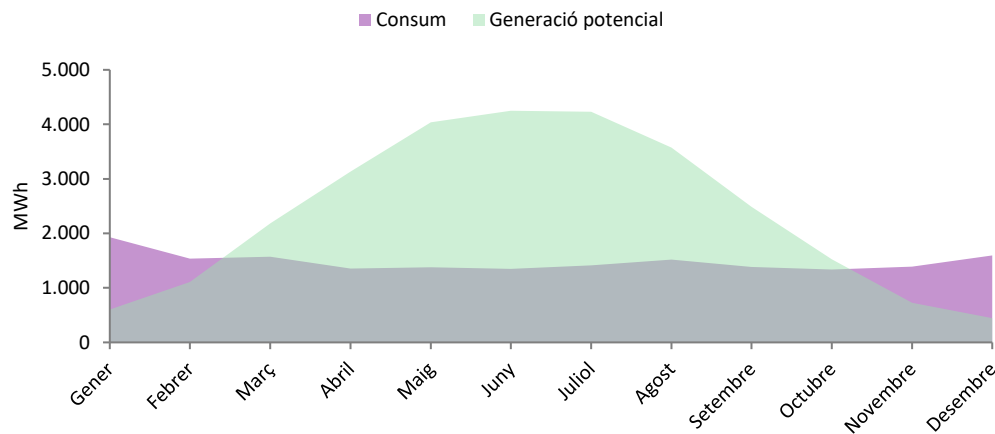


Fig. 23. Perfil mensual de generació fotovoltaica i consum elèctric de la parròquia d'Escaldes-Engordany (any 2014)

Val a dir que en la part representada de consum elèctric, únicament és té en compte el relatiu a hotels, administracions i escoles degut a les dades proporcionades per FEDA. En la Fig. 24 s'aprecia la distribució geogràfica dels punts representats de consum i generació a escala anual. Tenir accés a dades reals del consum elèctric de la resta de sectors és de vital

importància per tal de poder completar l'anàlisi en el conjunt dels sectors de l'economia andorrana.

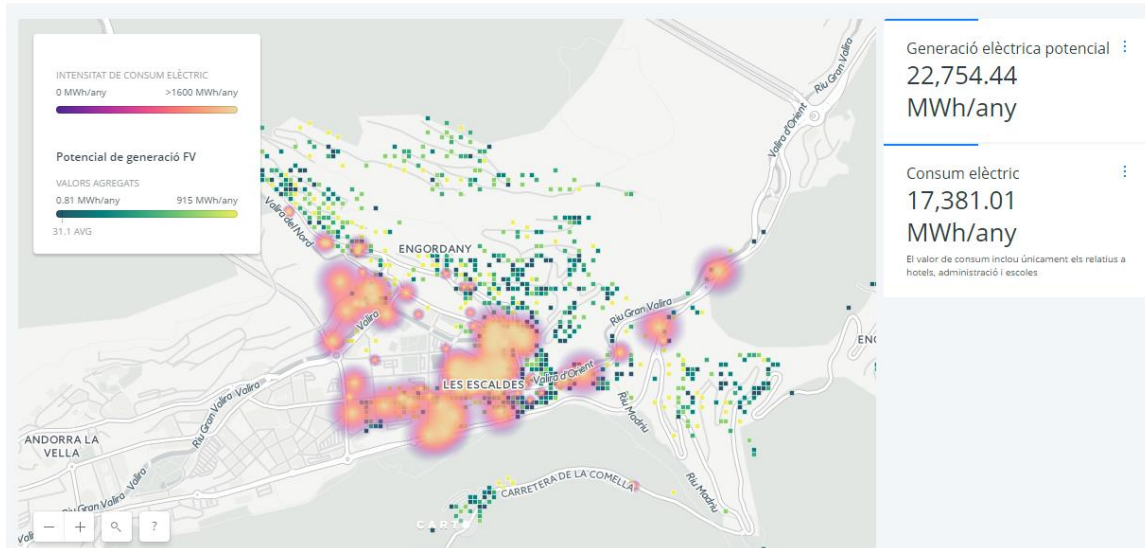


Fig. 24. Potencial de generació fotovoltaica i consum elèctric de la parròquia d'Escaldes-Engordany (any 2014)

2.13 Accions de transferència de coneixement cap a la societat

Objectius que pretén assolir: Activitat transversal a tots els objectius

A banda de les activitats purament de recerca, s'ha treballat durant el transcurs del projecte en diverses activitats enfocades a la transferència de coneixement cap a la societat. A continuació s'enumeren les diferents accions:

- a) Durant el transcurs del projecte s'ha fet difusió d'aquest a través dels comptes de Twitter oficials de cadascun dels socis del projecte (@OBSA_AND, @SUDPIRINEUS).

- b) Participació en el blog *Open Thoughts* gestionat per un dels col·laboradors de l'OBSA (IN3-UOC) explicant breument aquest projecte com a bona pràctica de transferència de coneixement cap a la societat (<http://openthoughts-analytics.blogs.uoc.edu/the-need-to-bring-research-closer-to-society/>).
- c) Aquest projecte va ser presentat públicament a les I Jornades de la Innovació i les noves Tecnologies d'Andorra (INNTEC 2016) en la jornada inaugural realitzada a la sala del Prat del Roure. La Fig. 25 mostra una fotografia de la part de la presentació destinada a aquest projecte.

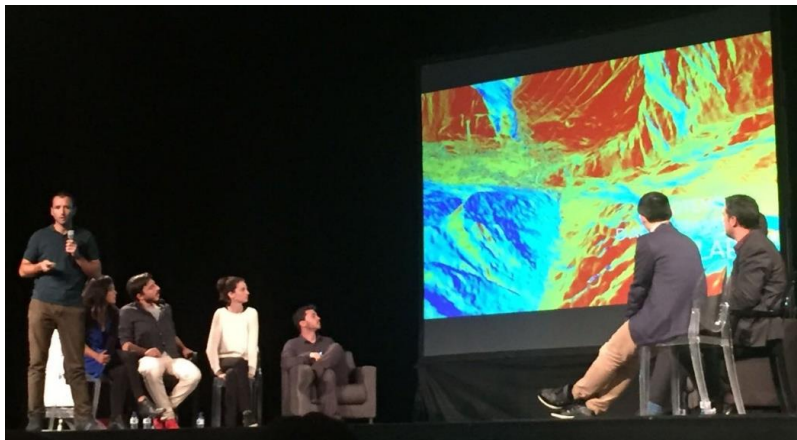


Fig. 25. Presentació del projecte a les jornades INNTEC 2016

- d) Assistència al Smart City Expo World Congress 2016 realitzat a Barcelona del 15 al 17 de novembre de 2016 col·laborant en el muntatge tècnic de l'estand d'ACTUA. Vàrem aprofitar l'ocasió per fer difusió de la recerca desenvolupada en aquest projecte i de l'OBSA en general. Va ser també una bona oportunitat per conèixer de més a prop les eines amb les que treballa el grup de recerca *Media Lab* del *Massachusetts Institute of Technology*. Concretament, la maqueta d'Andorra la Vella-Escaldes preparada especialment pel congrés té un gran potencial en la difusió de resultats d'aquest i altres projectes.
- e) En la línia del comentat en el punt anterior, s'han adaptat alguns dels resultats derivats d'aquest projecte per ser visualitzats en una maqueta de grans dimensions d'Andorra la Vella-Escaldes. L'ús de la maqueta per presentar els resultats pot ser una eina molt interessant per captar l'interès d'aquest tipus d'estudis més enllà d'un àmbit purament científic. El fet que aquesta maqueta

sigui propietat d'ACTUA, fa que fins al moment no haguem pogut fer-ne tanta difusió com haguéssim desitjat. De totes maneres, tenir l'ocasió de treballar amb ella ha estat de gran ajut per avançar en el desenvolupament tècnic de cara a poder projectar diferents capes de resultats en ella. La Fig. 26 mostra la projecció dels resultats d'irradiació solar sobre la maqueta.

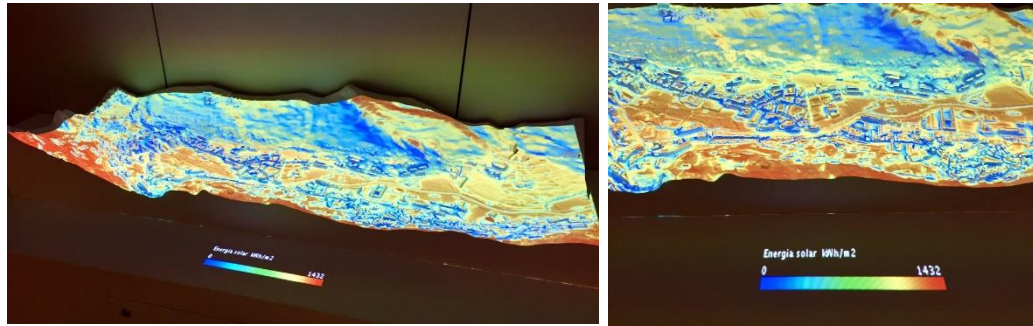


Fig. 26. Fotos de la maqueta amb la projecció de la irradiació anual

- f) Com a punt final del projecte es realitzarà una roda de premsa conjunta amb els diferents socis i col·laboradors del projecte per tal de presentar a la societat civil els principals resultats obtinguts i fer el llançament oficial de la plataforma web. La col·laboració amb l'Oficina de l'energia i el Canvi Climàtic d'Andorra permetrà a aquest projecte incrementar el seu potencial de difusió i poder arribar així a un públic molt més ampli.

3. Publicacions i assistència a congressos

Ward, A., Galabert, M., Travesset-Baro, O. (abstract acceptat). Estimació de les necessitats energètiques d'una família d'Andorra la Vella a la segona meitat del segle XIX. III Congrés internacional d'història dels Pirineus, 16-18 de juny de 2017, La Seu d'Urgell-Andorra la Vella.

Francisco, G., (juny 2017). Potencial d'aprofitament solar en cobertes d'edificis d'Andorra la Vella i Ordino. Treball Final de Grau. Grau en Energia. Universitat Politècnica de Catalunya.

Oliva, J., (juny 2017). Potencial d'aprofitament solar en cobertes d'edificis de Sant Julià de Lòria (Principat d'Andorra). Treball Final de Màster. Màster en Ciència i Tecnologia de la Sostenibilitat. Universitat Politècnica de Catalunya.

Travesset-Baro, O., Francisco, G., Vilella, M., Pons, M., 2017. Building rooftops photovoltaic potential in mountainous regions: a case study from the Pyrenees (*Submitted extended abstract in the 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition a Amsterdam*).

Borges, P., 2016. Canvi climàtic i consums energètics del parc edificat a Andorra: el cas d'Escaldes-Engordany. Treball Final de Màster. Màster en Ciència i Tecnologia de la Sostenibilitat. Universitat Politècnica de Catalunya.

Pons, M., Travesset-Baro, O., Vilella, M., 2016. Un llarg recorregut en projectes de recerca a Andorra. I Jornades de la Innovació i les noves Tecnologies d'Andorra (INNTEC 2016), 22 de setembre de 2016, Escaldes-Engordany.

Travesset-Baro, O., Jover, E., Rosas-Casals, M., 2016. Long-term energy security in a national scale using LEAP. Application to de-carbonization scenarios in Andorra. European Geosciences Union General Assembly 2016, 20 d'abril de 2016, Viena.

4. Valoració global del projecte

Tal com s'ha comentat anteriorment, el gruix dels resultats obtinguts fins al moment es centren en el poble de Tavascan i les parròquies d'Escaldes-Engordany i Ordino. A curt termini però, els resultats s'estendran a Sant Julià de Lòria i Andorra la Vella i a mitjà termini a la resta d'Andorra.

Els efectes positius del present projecte es poden subdividir en diferents punts en funció de l'escala de temps i el col·lectiu social beneficiat:

- De cara als ciutadans, el projecte ajudarà a clarificar en quines zones la instal·lació de panells solars és eficaç i competitiva des d'un punt de vista econòmic.
- A curt i mig termini el present estudi promocionarà els projectes relacionats amb l'energia solar, ajudant a dinamitzar tot un sector d'activitat i de retruc l'economia en general.
- Representa també un important guany socioeconòmic pel que fa referència a la seguretat energètica tant per la disminució de la dependència energètica de les zones d'estudi com per la diversificació de les fonts de subministrament.
- En el mig i llarg termini aquest projecte també és beneficiós per la reducció d'emissions de CO₂ que pot implicar ja sigui per l'increment de generació elèctrica autòctona a través de panells solars fotovoltaics o per la substitució de combustibles fòssils en l'obtenció d'aigua calenta sanitària.
- Per a l'administració, els resultats d'aquest estudi són de gran interès a l'hora de definir polítiques de planificació energètica.
- Com a efectes addicionals, és destacable l'interès científicotècnic d'aquest projecte ja que aporta resultats fins ara poc explorats sobre l'afectació de l'orografia en el potencial de radiació solar de zones muntanyoses. En aquest sentit és molt positiva la projecció acadèmica del projecte, a través de la implicació de la Universitat Politècnica de Catalunya, que dona aquest component a un projecte de caire principalment tècnic.

Malgrat que el Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra realitza una estimació inicial del potencial de generació elèctrica mitjançant instal·lacions fotovoltaïques en edificis, aquest es limita a aportar una xifra global per tot el país (estimada entre 12 i 18 GWh anuals). És important seguir treballant per afinar en l'estimació d'aquests potencials i sobretot millorar l'escala dels resultats permetent aportar informació detallada a escala d'edifici i accessible a nivell d'usuari.

El projecte fa un especial èmfasi en potenciar l'ús i coneixement de l'energia solar per part de la ciutadania. La construcció d'una plataforma web <http://www.obsa.ad/solar> aportant informació rigorosa i objectiva s'espera que sigui un element cabdal d'informació pels ciutadans i útil per a convèncer als usuaris de l'interès econòmic i ambiental d'instal·lar aquesta tecnologia renovable. Els resultats integrats en la plataforma web amb informació específica per cada edifici presenten un evident interès tècnic ja que en l'actualitat, i per exemple en el cas d'Andorra, tan sols hi ha disponible un mapa d'irradiació estàtic (<http://www.mapesenergia.ad/>) de dubtosa utilitat.

Conèixer amb més detall el potencial fotovoltaic i solar tèrmic de les cobertes dels edificis andorrans, permetrà a l'administració pública disposar del potencial real d'aquest recurs i facilitarà als particulars la identificació dels recursos energètics dels seus immobles, fomentant així l'establiment d'instal·lacions més respectuoses amb el medi ambient.

A banda dels resultats obtinguts, aquest tipus de projecte són de gran importància per fomentar la col·laboració entre grups de recerca i empreses tant internes del país com d'altres zones del Pirineu. En aquest sentit, la col·laboració entre l'OBSA i Sud Energies Renovables ha estat molt fructífera aportant-nos un a l'altre aspectes complementaris per tenir èxit amb un projecte com aquest. El fet que en aquesta convocatòria, únicament els socis andorrans tinguéssim accés a finançament, ha estat un handicap important pel treball realitzat amb els participants de Catalunya. Val a dir però, que en el cas de la UPC, el fort lligam existent des de fa anys amb el grup de recerca SUMMLab ha minimitzat els efectes d'aquest inconvenient.

5. Bibliografia

- Borges, P., 2016. Canvi climàtic i consums energètics del parc edificat a Andorra: el cas d'Escaldes-Engordany. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Brito, M., Gomes, N., Santos, T., Tenedório, J., 2012. Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Sol. Energy* 86, 283–288.
- Calvet, L., Pagès-Bernaus, A., Travesset-Baro, O., Juan, A.A., 2016. A Simheuristic for the Heterogeneous Site-Dependent Asymmetric VRP with Stochastic Demands. Springer International Publishing, pp. 408–417.
- Cellura, M., Di Gangi, a., Longo, S., Orioli, a., 2012. Photovoltaic electricity scenario analysis in urban contests: An Italian case study. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 2041–2052.
- Fu, P., Rich, P.M., 1999. Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. 19th Annu. ESRI User Conf. 1–24.
- Govern d'Andorra, 2007. Pla Estratègic de l'Energia d'Andorra 2006-2015.
- Govern d'Andorra, 2012. Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra.
- OCCC, 2016. Nota informativa sobre la metodologia del mix elèctric por parte de la Oficina Catalana del Cambio Climático.
- Quintero-Araujo, C.L., Pagès-Bernaus, A., Juan, A.A., Travesset-Baro, O., Jozefowicz, N., 2016. Planning Freight Delivery Routes in Mountainous Regions. Springer International Publishing, pp. 123–132.
- Redweik, P., Catita, C., Brito, M., 2013. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Sol. Energy* 97, 332–341.
- REE, 1998. Atlas de la demanda Electrica Española.
- Rte, 2016. Le réseau de l'intelligence électrique. Key Figures [WWW Document]. URL <http://www.rte-france.com/en/eco2mix/chiffres-cles-en> (accessed 6.7.16).
- Travesset-Baro, O., Gallachóir, B.P.Ó., Jover, E., Rosas-Casals, M., 2016a. Transport energy demand in Andorra. Assessing private car futures through sensitivity and scenario analysis. *Energy Policy* 96, 78–92.
- Travesset-Baro, O., Jover, E., Rosas-Casals, M., 2016b. Long-term energy security in a national scale using LEAP. Application to de-carbonization scenarios in Andorra. In: European Geosciences Union General Assembly 2016.

- Travesset-Baro, O., Pons, M., Rosas-Casals, M., 2016c. Impact of the car purchase subsidy policy in Andorra: an ex-post analysis of CO2 emissions reduction. In: International Conference on Urban and Regional Resilience (RESURBE III).
- Travesset-Baro, O., Rosas-Casals, M., Jover, E., 2015. Transport energy consumption in mountainous roads. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 34, 16–26.