



Informe final

Avaluació i modelització de la contaminació atmosfèrica a Andorra

Equip de treball

Marc Pons	Director de l'Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra
Guillem Francisco	Investigador de l'Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra
Oriol Travesset	Cap de projectes de l'Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra
Marc Vilella	Investigador de l'Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra
Fèlix Sanz	Investigador en pràctiques
Bruna Font	Investigadora en pràctiques

Desembre, 2018



Aquesta obra està subjecta a una llicència CC Reconeixement - No Comercial - CompartirIgual (by-nc-sa)

No es permet un ús comercial de l'obra original ni de les possibles obres derivades, la distribució de les quals s'ha de fer amb la mateixa llicència CC que regula l'obra original

RESUM

A partir dels registres disponibles a dia d'avui, en aquest projecte s'estudia l'evolució històrica dels principals contaminants atmosfèrics (NO_2 , PM_{10} , O_3 , CO , SO_2). S'analitzen les correlacions existents amb els factors causants com el trànsit, les calefaccions de gasoil i la meteorologia (posant especial èmfasi en l'efecte de les inversions tèrmiques).

A partir dels comptatges de vehicles, les calefaccions de gasoil, les zones industrials, dades meteorològiques i mitjançant l'eina ADMS-Urban, s'ha realitzant una modelització de la dispersió dels contaminants a la Vall Central. Aquesta modelització permet estimar la distribució espacial dels principals contaminants, conèixer-ne els causants, estudiar la seva incidència sobre la població i proposar mesures de millora.

Per tal d'enriquir les dades disponibles referents a la intensitat de vehicles, s'ha dissenyat, implementat i testejat una xarxa experimental de comptadors de vehicles basats en tècniques de visió per computador amb l'objectiu de complementar les dades de comptatges de vehicles aportades per l'Àrea de Mobilitat del Govern d'Andorra.

ÍNDIX

1.	CONTEXTUALITZACIÓ DEL PROJECTE	7
1.1	Emissions atmosfèriques i les seves conseqüències	7
1.1.1	Les emissions com a problema global.....	7
1.1.2	Les emissions com a problema local	8
1.2	Objectius del projecte.....	8
2.	INVENTARI DE LES EMISSIONS CONTAMINANTS.....	10
2.1	Introducció	10
2.2	Emissions dels vehicles.....	10
2.2.1	Parc de vehicles d'Andorra	10
2.2.2	Vehicles dels turistes	14
2.2.3	Activitat dels vehicles.....	15
2.2.4	Dades meteorològiques.....	17
2.3	Emissions de les calefaccions i l'ACS	17
2.4	Emissions del CTR	19
2.5	Resultats	20
2.5.1	Emissions dels vehicles.....	20
2.5.2	Emissions de les calefaccions i l'ACS	21
2.5.3	Emissions del CTR	22
2.5.4	Totalitat d'emissions a la Vall Central	22
3.	DISPERSIÓ DELS CONTAMINANTS I EXPOSICIÓ DE LA POBLACIÓ	26
3.1	Introducció	26
3.2	Emissions industrials.....	27
3.3	Emissions dels vehicles.....	30
3.3.1	Comptatges de l'Àrea de Mobilitat.....	33
3.3.2	Comptatges OBSA.....	35
3.3.2.1	Arquitectura de xarxa.....	35
3.3.2.2	<i>Hardware</i>	36
3.3.2.3	<i>Software</i>	37
3.3.2.4	Algorisme de comptatge.....	38
3.3.2.5	Base de dades resultant.....	39

3.3.3	Mapa d'intensitat de vehicles (DOYMO)	41
3.4	Emissions de les calefaccions i l'ACS	44
3.5	Metodologia i assumpcions de la modelització	46
3.5.1	<i>Street Canyon</i>	46
3.5.2	Concentracions de fons	47
3.5.3	Terreny	48
3.5.4	Meteorologia	49
3.5.5	Altres assumpcions	51
3.6	Escenaris	52
3.6.1	Escenari A	52
3.6.2	Escenari B	53
3.6.3	Escenari C	53
3.6.4	Escenari D	54
3.6.5	Escenari E	55
3.6.6	Escenari F	56
3.7	Resultats	57
3.7.1	Concentracions d'NO ₂ en els diferents escenaris	58
3.7.2	Exposició de la població	66
3.8	Verificació del model	68
4.	CONTAMINACIÓ ATMOSFÈRICA, METEOROLOGIA I TRÀNSIT	71
4.1	Introducció	71
4.2	Recopilació i construcció de la base de dades	72
4.2.1	Mesures de contaminants	72
4.2.2	Mesures de temperatura	73
4.2.3	Altres dades meteorològiques	73
4.2.4	Situacions sinòptiques	73
4.2.5	Comptatge de vehicles	74
4.3	Anàlisi descriptiu	74
4.4	Efecte de la inversió tèrmica	78
4.5	Nivells d'immissió segons situació sinòptica	80
4.6	Correlació entre variables	83
4.7	Efecte del vent	84
4.8	Relació entre contaminants i trànsit	85

5. CONCLUSIONS	89
REFERÈNCIES	92

1. CONTEXTUALITZACIÓ DEL PROJECTE

1.1 Emissions atmosfèriques i les seves conseqüències

Les emissions generades degut a l'activitat humana tenen una sèrie d'impactes tant a escala global com local. La major problemàtica a escala global són les emissions de diòxid de carboni (CO₂) i altres gasos d'efecte hivernacle (GEH), principals causants del canvi climàtic. D'altra banda, a escala local, les emissions contaminants com el CO, NO_x, SO₂, PM₁₀ o PM_{2.5} són responsables d'importants conseqüències sobre la salut humana i els ecosistemes.

1.1.1 Les emissions com a problema global

Tot i no considerar-se contaminants pel fet de ser presents en l'atmosfera de manera natural, els GEH són la principal problemàtica a escala global de les emissions atmosfèriques. La seva capacitat d'absorbir la radiació solar, evitant així la reflexió natural de la radiació sobre la superfície terrestre, és la causant de l'augment de la temperatura global.

L'any 2007, el Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Clima (GIEC), va identificar a les zones de muntanya com a zones particularment sensibles al canvi climàtic degut a la gran sensibilitat dels seus ecosistemes. Segons els escenaris previstos per finals del segle XXI per el GIEC, Andorra es situaria en el A1B que preveu un augment de les temperatures de entre 2,4°C i 3,7 °C, així com una disminució de les precipitacions d'entre 6% i 19% (Miquel, Armengol, Dobarro, & Natàlia, 2014). Tot i l'impacte insignificant de les seves emissions a escala global, el Principat d'Andorra ha establert compromisos internacionals en aquest àmbit adherint-se l'any 2011 al Conveni marc de les Nacions Unides sobre Canvi Climàtic i posteriorment compromentent-se a la reducció d'emissions de gasos d'efecte hivernacle en un 37% l'any 2030 respecte a l'escenari de referència (Govern d'Andorra, 2015).

El sector de l'energia és responsable de més del 75% de les emissions d'efecte hivernacle nacionals, amb una contribució molt destacada del sector del transport (Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic, 2016). Per aquest motiu, la gestió dels recursos energètics i les polítiques en l'àmbit del transport s'han situat com a eixos principals en les accions i iniciatives en la lluita contra el canvi climàtic.

1.1.2 Les emissions com a problema local

A dia d'avui existeixen múltiples evidències científiques que confirmen la relació directa entre la contaminació de l'aire i problemes de salut en la població. Els nuclis urbans són majoritàriament els més afectats degut a l'alta concentració de vehicles per metre quadrat i a la morfologia urbana que sovint dificulta la dispersió dels contaminants. Malalties respiratòries, cardiovasculars (Brook et al., 2010), asma i al·lèrgies (Gehring et al., 2010), obesitat (Giles-Corti, Kelty, Zubrick, & Villanueva, 2009) o autisme (Volk, Lurmann, Penfold, Hertz-Picciotto, & McConnell, 2013) són alguns dels problemes en la salut provocats per l'alta contaminació en zones urbanes.

En el context andorrà, la Unitat de Medi Atmosfèric del Departament de Medi Ambient monitoritza els nivells de qualitat de l'aire a través de mesuraments automàtics a la Vall Central (Andorra la Vella i Escaldes-Engordany) i dels mesuraments manuals del diòxid de nitrogen (NO_2) corresponents a la xarxa perenne, també de la Vall Central. Entre els anys 2005 i 2017, l'any 2006 va ser el més desfavorable pel que fa a l'estat de la qualitat de l'aire d'Andorra. Des del 2006, els nivells de contaminació han davallat significativament fins a establir-se en els darrers anys. L'any 2017 representa una continuïtat en la qualitat de l'aire en comparació a l'exercici precedent. El temps en que la qualitat de l'aire va ser excel·lent o bona representa el 91% de l'any, mentre que la qualitat regular representa el 8% del temps. S'han donat un total de 31 hores amb qualitat de l'aire dolenta (únicament els anys 2013 i 2014 no van registrar cap hora amb qualitat de l'aire dolenta). Aquestes dades situen l'any 2017 amb una qualitat de l'aire similar a l'enregistrada l'any 2016 (Govern d'Andorra, 2017b). L'estratègia del medi atmosfèric per al període 2017-2030 (Govern d'Andorra, 2017a) fixa les accions prioritàries per tal de millorar la qualitat de l'aire en general i en especial en les zones de proximitat al trànsit i/o amb poca capacitat de dispersió dels pol·luents emesos per la circulació de vehicles amb motor de combustió interna.

1.2 Objectius del projecte

L'objectiu general d'aquest projecte és analitzar i modelitzar les dinàmiques de contaminació atmosfèrica a la Vall Central així com estudiar-ne els possibles impactes sobre el territori i la població.

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

- O1.** Caracterització de les fonts d'emissió de contaminants atmosfèrics a les parròquies d'Andorra la Vella i d'Escaldes-Engordany.
- O2.** Disseny, implementació i posta en funcionament d'una xarxa experimental de comptadors de vehicles basats en tècniques de visió per computador amb l'objectiu de complementar les dades de comptatges de vehicles aportades per l'Àrea de Mobilitat d'Andorra.
- O3.** Modelització de la dispersió dels contaminants atmosfèrics a la Vall Central.
- O4.** Calibració i validació del model amb les mesures reals existents (estacions automàtiques i xarxa perenne).
- O5.** Realització de la cartografia dels nivells de contaminació atmosfèrica i densitat de població a escala urbana.
- O6.** Estudiar la relació entre nivells de contaminació i situacions meteorològiques específiques a través de dades reals (estacions automàtiques).

2. INVENTARI DE LES EMISSIONS CONTAMINANTS

2.1 Introducció

En aquest capítol s'han estudiat les principals fonts d'emissions contaminants a la Vall Central (Andorra la Vella i Escaldes-Engordany). S'ha realitzat un inventari d'emissions incloent les principals fonts de contaminació: les calefaccions i l'aigua calenta sanitària (ACS) que utilitzen fuel domèstic i el Centre de Tractament de Residus (CTR) de la Comella. El sector del transport s'estudia amb especial detall tant en aquest capítol com en la resta del projecte, degut a ser un dels eixos principals en les accions de lluita contra el canvi climàtic.

2.2 Emissions dels vehicles

Amb l'objectiu d'estimar el total d'emissions dels vehicles al llarg d'un dia laborable a la Vall Central s'ha realitzat un inventari d'emissions seguint una metodologia Tier 2 de l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). L'estudi ha estat elaborat amb les dades d'estoc del parc de vehicles d'Andorra (actualitzat a 31-12-2015) i les inspeccions tècniques de vehicles d'on s'obtenen patrons de quilometratge segons tipologia. D'altra banda, s'ha establert un estoc de vehicles de referència pels turistes que visiten el país tenint en consideració la composició del parc de vehicles espanyol.

El quilometratge total realitzat tant pels nacionals com pels turistes en la Vall Central es basa en les dades proporcionades pel model implementat per la UTE Suport, DOYMO i Euroconsult.

L'inventari final d'emissions s'ha elaborat mitjançant l'eina Copert v.5.1 (*European Environment Agency*) i inclou els principals contaminants que contempla la normativa EURO (CO, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}), així com les emissions de NO₂ i CO₂. Aquest últim, tot i no tractar-se d'un contaminant, s'ha inclòs amb l'objectiu de poder ser comparat amb estimacions prèvies realitzades a escala nacional.

2.2.1 Parc de vehicles d'Andorra

D'acord a les dades nacionals de vehicles registrats a finals de l'any 2015 i a les inspeccions tècniques de vehicles (Departament d'Indústria, 2016), s'han caracteritzat quatre sub-

sectors representant la globalitat del sector del transport a Andorra: parc de turismes, transport de mercaderies, transport de passatgers i vehicles a dues rodes.

S'ha construït un model d'estoc que representa el parc de turismes d'Andorra de l'any 2015. Travesset-Baro et al. (2016) presenten una descripció detallada de la implementació i validació del model, en aquest cas destinat a l'estimació del consum d'energia i on l'any base és el 2013. Aquest model utilitza l'estructura del parc, el perfil d'activitat (km/any) i el consum energètic específic de cada vehicle (MJ/km) com a variables explicatives. El parc de turismes del 2015 s'ha desagregat en diferents categories (veure Fig. 1) en funció de la motorització (gasoil, gasolina, electricitat, híbrid o híbrid endollable), la cilindrada (<1400 cc, 1400-2000 cc, >2000 cc) i l'edat (0-30 anys), factors amb un fort impacte en el consum final d'energia i en les emissions del parc.

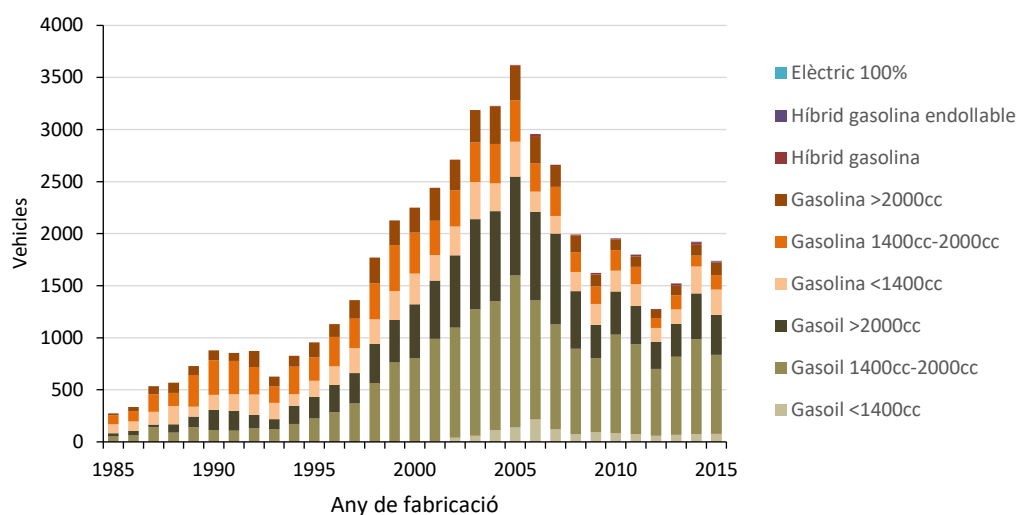


Fig. 1. Parc de turismes d'Andorra segons categories

La resta de vehicles registrats a Andorra s'ha segregat en tres sub-sectors: transport de mercaderies (format per camions i furgonetes), transport de passatgers (format per autobusos) i vehicles a dues rodes. En conjunt, representen menys del 30% dels vehicles registrats l'any 2015 (Departament d'Indústria, 2016). En aquest cas, les categories incloses en cada un dels sub-sectors s'han tractat de forma agregada a excepció de les furgonetes

que s'han dividit segons el combustible utilitzat (gasoil o gasolina). Val a dir que la resta de sub-sectors i categories utilitzen únicament un tipus de combustible.

Per tal de caracteritzar cada sub-sector s'ha treballat amb les dades de vehicles registrats des de l'any 1951 i les ITV's (Inspeccions Tècniques de Vehicles) realitzades fins l'any 2015 (Departament d'Indústria, 2016). La mostra de cada sub-sector i categoria utilitzada en el model s'ha limitat als vehicles amb any de fabricació posterior a 1984, assumint que els automòbils anteriors a aquesta data són vehicles de museu, errors del registre o vehicles en desús. Aquesta hipòtesi s'ha validat a través de les ITV's, confirmant que aquest grup de vehicles no han passat les inspeccions corresponents, representen una part menyspreable de l'estoc o realitzen un nombre de quilòmetres anuals insignificants. La Taula 1 mostra l'estoc i el combustible del transport de mercaderies, transport de passatgers i vehicles a dues rodes.

Sub-sector i categoria	Estoc	Combustible utilitzat
Transport de mercaderies		
<i>Camions</i>	703	Gasoil
<i>Furgonetes gasoil</i>	3886	Gasoil
<i>Furgonetes gasolina</i>	177	Gasolina
Autobusos	208	Gasoil
Vehicles a dues rodes	10777	Gasolina

Taula 1. Resta de categories considerades en el model

A cadascuna de les categories mencionades anteriorment se li assigna un quilometratge estimat a partir de les dades de les ITV's (més detall en Secció 2.2.3). D'altra banda, per poder estimar les emissions contaminants de les diferents tipologies de vehicles cal fer una classificació del parc addicional basada en les categories definides per la normativa EURO. Cada categoria té uns valors límits d'emissions associats, els quals utilitza COPERT per tal d'establir els factors d'emissions de cada categoria de vehicle. Aquesta classificació s'ha realitzat partint de les característiques tècniques del vehicles registrats (categoria de vehicle, combustible utilitzat i any de fabricació). La Fig. 2 mostra l'estoc segons tipus de vehicles observant-se la preponderància dels turismes.

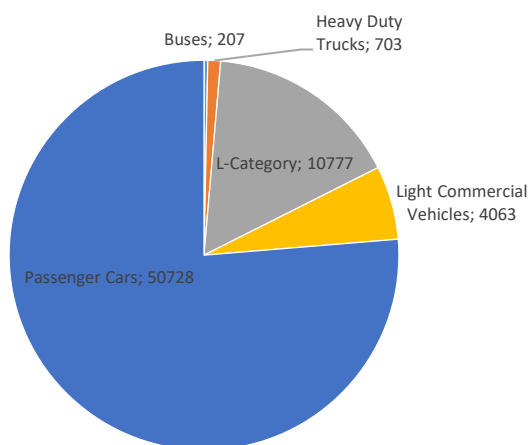


Fig. 2. Estoc segons tipus de vehicle

En la Fig. 3, es presenta la distribució de la totalitat del parc de vehicles d'Andorra desagregat segons les categories definides per la normativa EURO. El full de càlcul adjunt (*estoc_vehicles.xlsx*) inclou la base de dades de vehicles implementada i una visualització d'aquesta.

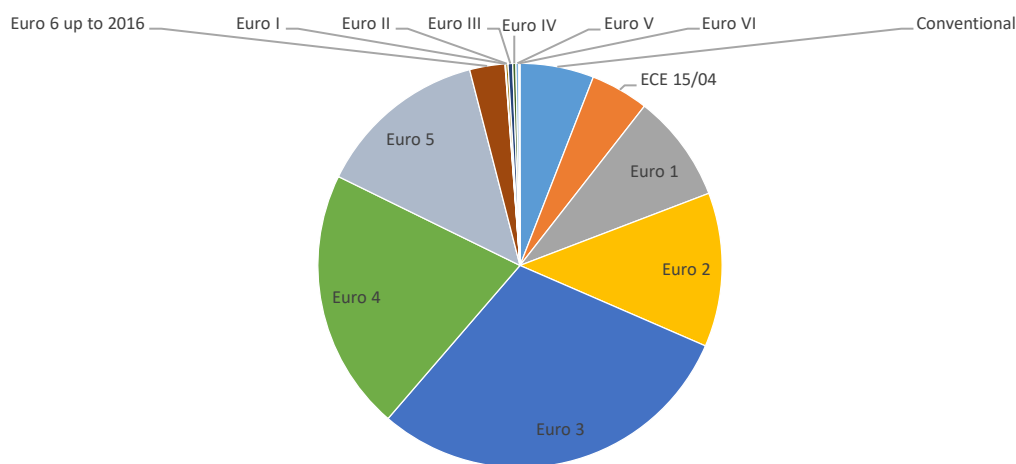


Fig. 3. Distribució de l'estoc de vehicles del parc andorrà segons categories EURO

2.2.2 Vehicles dels turistes

Per tal de representar les emissions associades als turistes, s'ha treballat amb les dades del parc de vehicles espanyol com a referència (DGT, 2018). Es tenen en compte únicament els turismes, entenent que és el vehicle majoritari utilitzat pels turistes. S'han considerat els turismes de gasoil i gasolina amb any de fabricació superior a 1984. Per tal d'establir les categories EURO, s'ha partit de l'any de fabricació, el tipus de combustible i la distribució de categories observada a Andorra. Aquesta última assumpció ha estat necessària ja que la *Dirección General de Tráfico* no aporta aquesta informació en les seves estadístiques ni suficient detall de la tipologia de vehicles per deduir-la. La Fig. 4 mostra la distribució de l'estoc de turismes del parc espanyol segons categories EURO.

El nombre total de turismes circulant en un dia laborable per la Vall Central ha estat proporcionat pel model implementat per la UTE Suport, DOYMO i Euroconsult¹.

¹ Comunicació personal

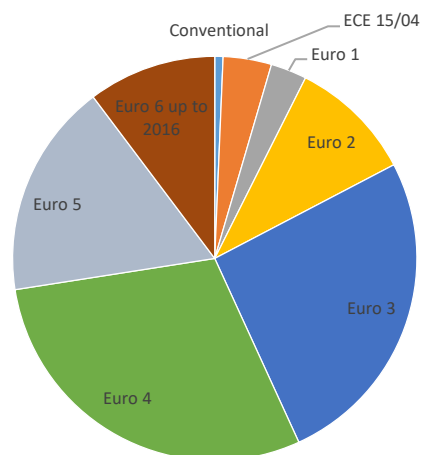


Fig. 4. Distribució de l'estoc de turismes del parc espanyol segons categories EURO

2.2.3 Activitat dels vehicles

El quilometratge realitzat tant pels nacionals com pels turistes està basat en les dades proporcionades pel model implementat per la UTE Suport, DOYMO i Euroconsult¹ i representa l'activitat mitjana d'un dia laborable. La Taula 2 presenta els valors considerats.

Total de veh-km en la Vall Central	317.422 km
Distància recorreguda per vehicles de turistes	18.560 km

Taula 2. Activitat dels vehicles nacionals i turistes un dia laborable a la Vall Central

La distribució del quilometratge segons categories de vehicles es basa en dades de les ITV's d'Andorra. D'igual manera que en estudis similars realitzats en altres països (Daly & Ó Gallachóir, 2011; Hickman, Hassel, Joumard, Samaras, & Sorenson, 1999), els vehicles de gasoil i els de cilindrades més grans tendeixen a recórrer majors distàncies. S'observa també una caiguda en els quilòmetres realitzats al llarg de la vida dels vehicles, de magnitud similar en els turismes de gasoil i gasolina. D'altra banda, per tots dos

combustibles, la caiguda de quilometratges és major en vehicles de gran cilindrada que en les mitjanes i baixes (Travesset-Baro et al., 2016).

Partint del quilometratge total de turistes i locals, dels perfils d'activitat de cada categoria i de l'estoc de vehicles, s'obté l'activitat mitjana de cada categoria de vehicles. Les Fig. 5 i Fig. 6 mostren l'activitat mitjana dels diferents vehicles, en el primer cas segons la seva tipologia i en el segon en base a la categoria EURO.

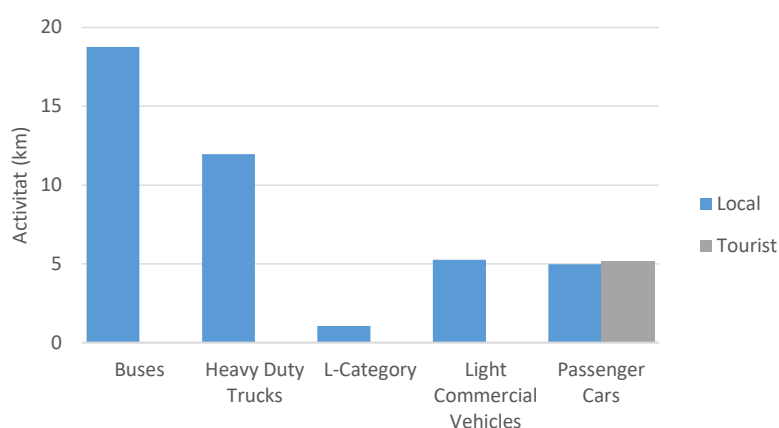


Fig. 5. Activitat mitjana de les diferents categories de vehicles

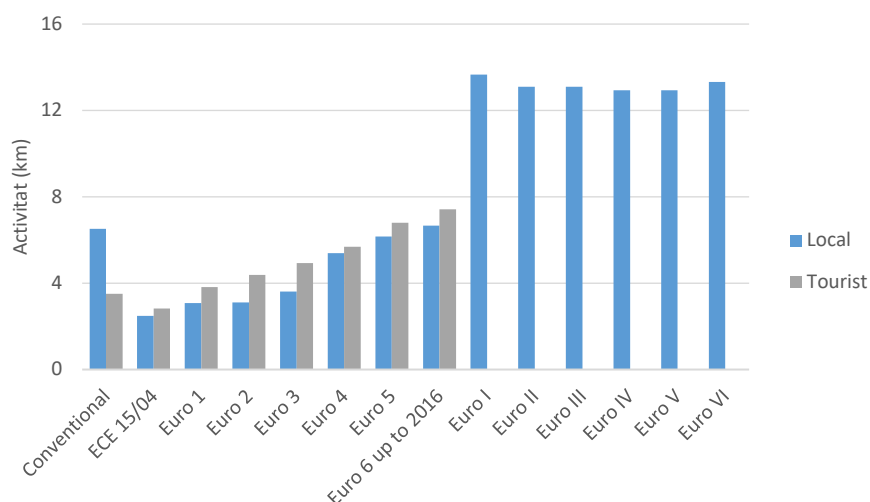


Fig. 6. Activitat mitjana de les diferents categories segons normativa EURO

Els valors presentats en les figures són aparentment baixos, però cal tenir en compte que representen la mitjana de quilometratge d'un dia tenint en compte tot l'estoc de vehicles del país i centrant-se únicament a la Vall Central.

2.2.4 Dades meteorològiques

Copert v.5.1 utilitza valors de temperatura i humitat relativa per tal de calcular càrregues associades a aire condicionat i evaporació de combustible. Les dades meteorològiques han estat obtingudes de l'estació de Roc de Sant Pere per la totalitat de l'any 2016 (Govern d'Andorra, 2018b). La Taula 3 mostra els valors utilitzats en el càlcul.

Month	Min Temperature [°C]	Max Temperature [°C]	Humidity [%]
January	-4,3	17,5	70,3%
February	-4,2	20,1	58,3%
March	-3,2	19,5	54,5%
April	0,0	21,8	59,3%
May	-0,7	26,0	57,8%
June	4,7	30,7	58,1%
July	7,8	34,5	56,7%
August	7,3	33,2	52,0%
September	6,9	32,1	60,1%
October	3,7	26,3	67,1%
November	-1,6	19,3	71,4%
December	-4,0	15,1	56,8%

Taula 3. Dades meteorològiques utilitzades en els càlculs realitzats amb Copert

2.3 Emissions de les calefaccions i l'ACS

L'origen de les emissions contaminants de les calefaccions i l'ACS a Andorra és la crema de fuel domèstic. Segons l'Enquesta de Pressupostos Familiars (EPF) (Govern d'Andorra,

2012), l'any 2009² el 83% i el 45% dels habitatges del país disposaven de calefacció i ACS amb fuel domèstic, respectivament. A les emissions del sector residencial cal sumar-hi també les donades en el sector terciari i en menor mesura la sector secundari.

Amb l'objectiu d'estimar les emissions contaminants de les calefaccions i l'ACS a la Vall Central, el present estudi parteix de la totalitat de fuel domèstic importat a escala nacional l'any 2017 (Departament d'Estadística, 2018) i es pondera tenint en compte la població estimada resident a Andorra la Vella i Escaldes-Engordany (veure Taula 4).

Importació nacional de fuel domèstic	51.635.427 litres
Fuel domèstic consumit a la Vall Central	25.041.049 litres

Taula 4. Estimació de fuel domèstic consumit a la Vall Central

A partir del consum de fuel domèstic anual a la Vall Central i els factors d'emissions associats a la crema d'aquest (AIR Languedoc-Roussillon, 2007) presentats en la Taula 5, s'han calculat les emissions anuals de cada un dels contaminants (CO, NO_x, SO₂, PM₁₀ i PM_{2.5}).

Contaminant	Factor	Unitats
CO	41	g/GJ
NO _x	50	g/GJ
SO ₂	95	g/GJ
PM ₁₀	0,3	g/GJ
PM _{2.5}	0,3	g/GJ

Taula 5. Factors d'emissió del fuel domèstic en l'àmbit residencial. Font: AIR Languedoc-Roussillon (2007)

A continuació la totalitat de cada contaminant es distribueix en un primer nivell segons si prové de l'àmbit residencial o terciari (37% i 63%, respectivament) i en un següent nivell només en el cas del residencial, si ha estat generat per calefacció o ACS (81% i 19%, respectivament). Els pesos per tal de distribuir aquests valors s'extreuen dels consums associats a cada àmbit estimats a partir del model LEAP-Andorra (Travesset-Baro, 2017). En el cas del sector terciari s'ha considerat que la totalitat d'emissions està associada a

² L'any 2009 és l'últim en el que s'inclou aquesta informació a l'EPF

calefacció. Finalment, i amb l'objectiu d'estimar la variabilitat anual de les emissions al llarg de l'any, s'han expressat els resultats a escala mensual. Per aconseguir-ho, s'han distribuït les emissions provinents de la calefacció basant-se en el nombre de graus dia estimats al pàrquing del Fener mitjançant l'eina PVGIS (JRC, 2018). Per la seva banda, les emissions provinents de l'ACS s'han distribuït de forma homogènia al llarg de l'any.

2.4 Emissions del CTR

Les emissions del CTR s'han obtingut directament de les mesures realitzades diàriament pel propi centre. Aquest ha proporcionat els valors mitjans diaris de l'any 2017 de les concentracions de CO, NOx, SO₂, PMs³, el cabal i la velocitat d'emissió. La Fig. 7 mostra la concentració mitjana diària de les emissions del CTR durant l'any 2017.

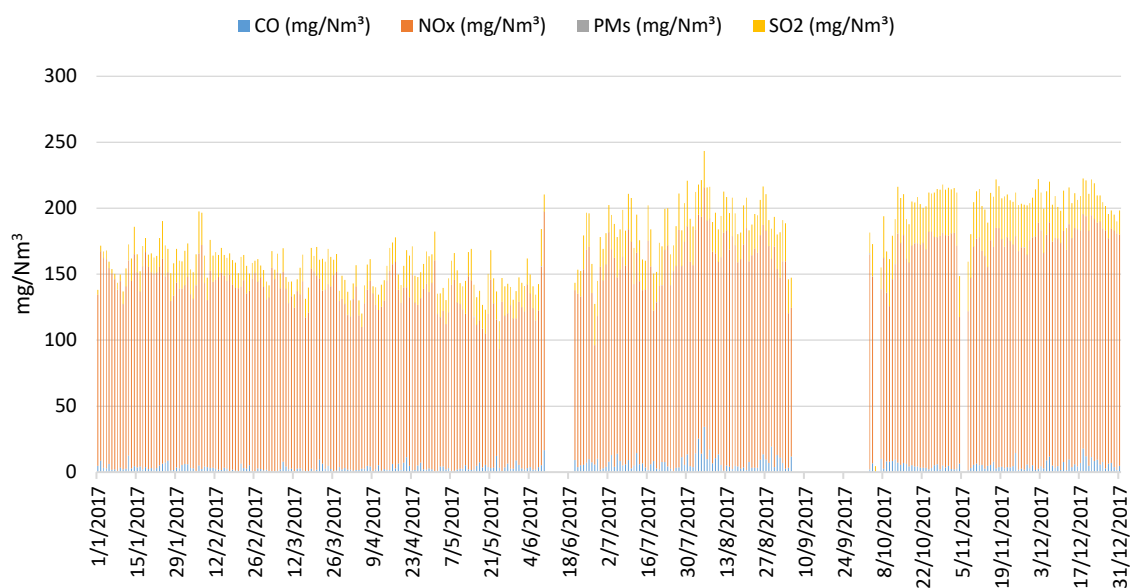


Fig. 7. Concentració mitjana diària de cada contaminant. Font: CTRASA (2018)

³ La mesura proporcionada no discerneix entre mida de les partícules

Mitjançant la concentració i el cabal s'han calculat les emissions (en tones) de cada contaminant a escala diària.

2.5 Resultats

2.5.1 Emissions dels vehicles

La Taula 6 presenta les emissions contaminants dels vehicles que circulen per la Vall Central un dia laborable calculades amb l'eina Copert v.5.1. Aquestes es presenten segregades segons turistes o nacionals, categories de vehicles i combustible utilitzat.

Emissions en tones	CO	CO ₂	NO ₂	NOx	PM ₁₀	PM _{2.5}	Total
Local	0,471	66,695	0,054	0,220	0,016	0,013	67,415
Buses	0,005	2,452	0,002	0,018	0,001	0,001	2,476
<i>Diesel</i>	0,005	2,452	0,002	0,018	0,001	0,001	2,476
Heavy Duty Trucks	0,009	3,987	0,004	0,033	0,001	0,001	4,031
<i>Diesel</i>	0,009	3,987	0,004	0,033	0,001	0,001	4,031
L-Category	0,087	1,153	0,000	0,003	0,000	0,000	1,243
<i>Petrol</i>	0,087	1,153	0,000	0,003	0,000	0,000	1,243
Light Commercial Vehicles	0,024	5,215	0,004	0,016	0,002	0,001	5,258
<i>Diesel</i>	0,004	4,904	0,004	0,014	0,002	0,001	4,926
<i>Petrol</i>	0,020	0,312	0,000	0,001	0,000	0,000	0,333
Passenger Cars	0,347	53,888	0,043	0,151	0,012	0,010	54,407
<i>Diesel</i>	0,029	36,966	0,042	0,122	0,010	0,009	37,137
<i>Petrol</i>	0,318	16,741	0,001	0,028	0,001	0,001	17,089
<i>Petrol Hybrid</i>	0,001	0,180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,181
Tourist	0,019	3,991	0,003	0,010	0,001	0,001	4,021
Passenger Cars	0,019	3,991	0,003	0,010	0,001	0,001	4,021
<i>Diesel</i>	0,002	2,636	0,003	0,008	0,001	0,001	2,647
<i>Petrol</i>	0,017	1,355	0,000	0,001	0,000	0,000	1,374
Total general	0,490	70,686	0,057	0,230	0,016	0,014	71,436

Taula 6. Emissions contaminants dels vehicles en un dia laborable

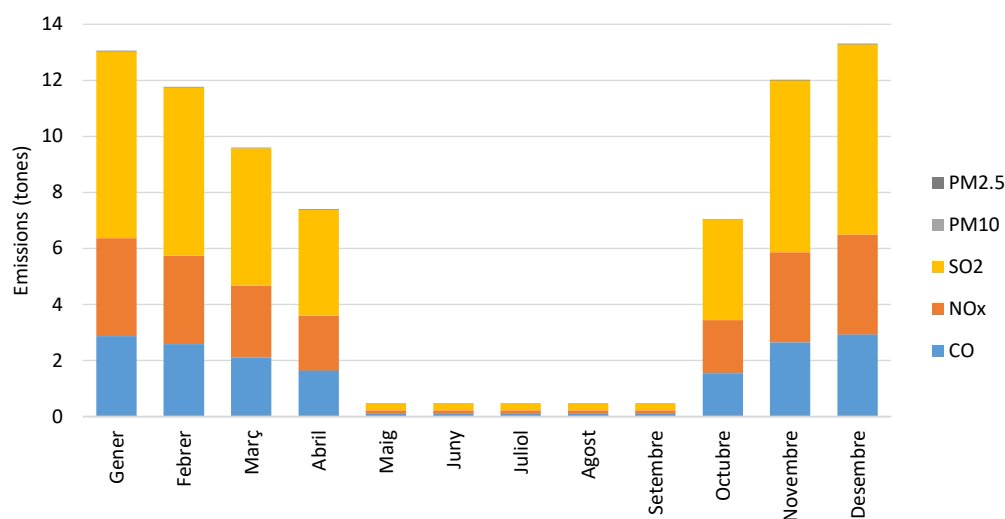
Fins on arriba el nostre coneixement, aquesta és la primera estimació d'emissions contaminants provinents dels vehicles realitzada a la Vall Central, pel que és complicat poder comparar o validar els resultats obtinguts.

Una comparativa possible és amb les emissions de CO₂, motiu pel qual s'han inclòs en els càlculs. Segons l'inventari nacional d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (Govern d'Andorra, 2013), l'any 2011 les emissions anuals de CO₂ associades al transport intern nacional ascendien a 115.000 tCO₂. En el present càlcul el valor obtingut per un dia i únicament en la Vall Central és de 70,7 tCO₂. Si ho extrapoléssim a la totalitat d'un any⁴ estaríem parlant de 25.805 tCO₂, aproximadament una quarta part de les estimades en l'inventari oficial realitzat a escala nacional per l'any 2011.

Paral·lelament als resultats presentats en la Taula 6, s'inclou juntament amb l'informe un full de càlcul (*resultats_copert.xlsx*) amb els resultats complets proporcionats per Copert i una visualització interactiva d'aquests.

2.5.2 Emissions de les calefaccions i l'ACS

A partir de la metodologia i les assumpcions descrites en la Secció 2.3 s'obtenen les emissions contaminants de les calefaccions i l'ACS a escala mensual. En la Fig. 8 pot observar-se la variabilitat mensual condicionada per l'ús de les calefaccions.



⁴ Considerant tots els dies iguals

Fig. 8. Emissions contaminants de les calefaccions i l'ACS

2.5.3 Emissions del CTR

La Fig. 9 mostra les principals emissions contaminants del CTR durant l'any 2017 a escala diària calculades tal com es detalla en la Secció 2.4 a partir de la concentració mitjana diària i el cabal.

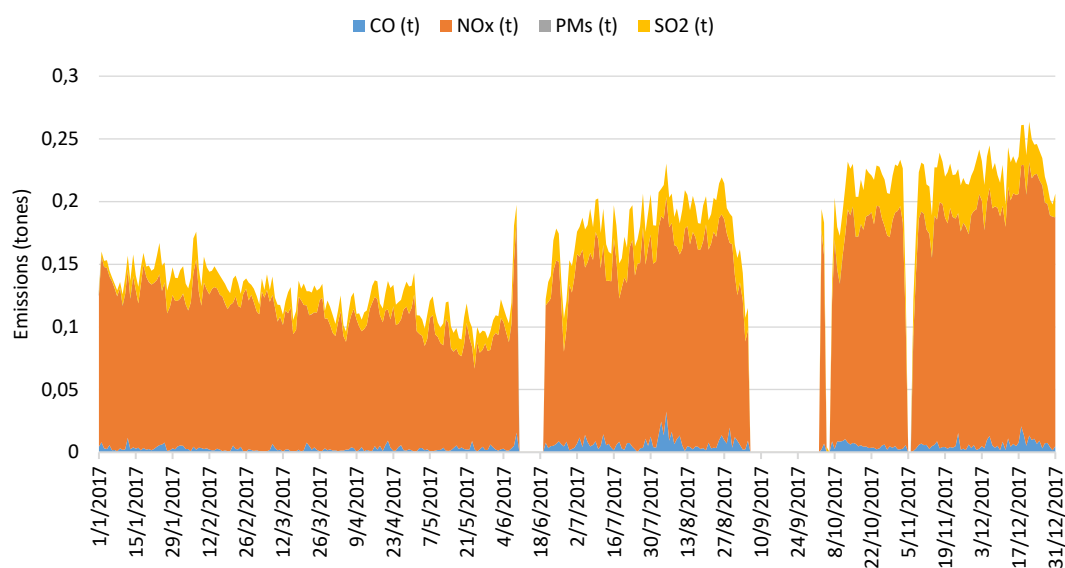


Fig. 9. Principals emissions contaminants del CTR l'any 2017 a escala diària

En el full de càlcul (*emissions_ctr.xlsx*) adjuntat a aquest informe s'inclou la sèrie de l'any 2017 de les principals emissions contaminants del CTR així com el cabal i la velocitat d'emissió.

2.5.4 Totalitat d'emissions a la Vall Central

Finalment s'han recopilat les emissions de les diferents fonts en una mateixa base de dades (*resultats_inventari.xlsx*). S'ha tingut en compte l'estacionalitat de les emissions, considerant un dia laborable tipus d'hivern (gener) i un d'estiu (juliol). La Fig. 10 mostra les emissions dels diferents contaminants en un dia tipus d'estiu i hivern mostrant el pes de cada una de les fonts. D'altra banda la Fig. 11 mostra el pes de les diferents fonts d'emissions en els principals contaminants. En aquesta es pot observar com en la majoria

de contaminants, el sector del transport hi té un pes determinant tant a l'hivern com a l'estiu. Per exemple, en el cas de l'NO_x, entre el 50% i el 60% de les emissions provenen dels vehicles. Aquest valor és substancialment superior a la mitjana de la UE-28 (veure Fig. 12) que es situa en el 39%. En el cas del CO aquest fet s'accentua encara més superant valors del 80% mentre que la mitjana UE-28 és del 20% (EEA, 2018).

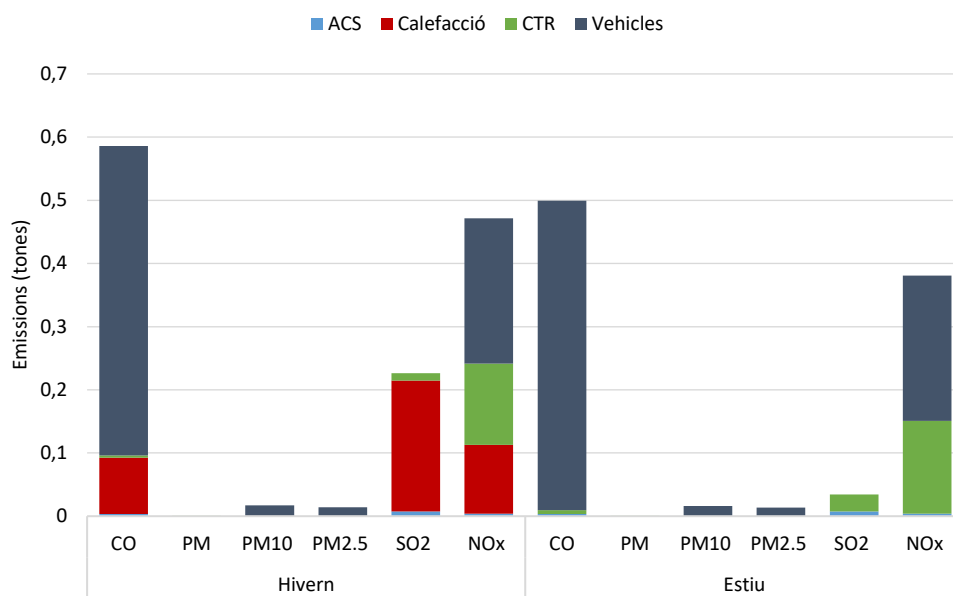


Fig. 10. Emissions contaminants en un dia tipus d'estiu i hivern a la Vall Central

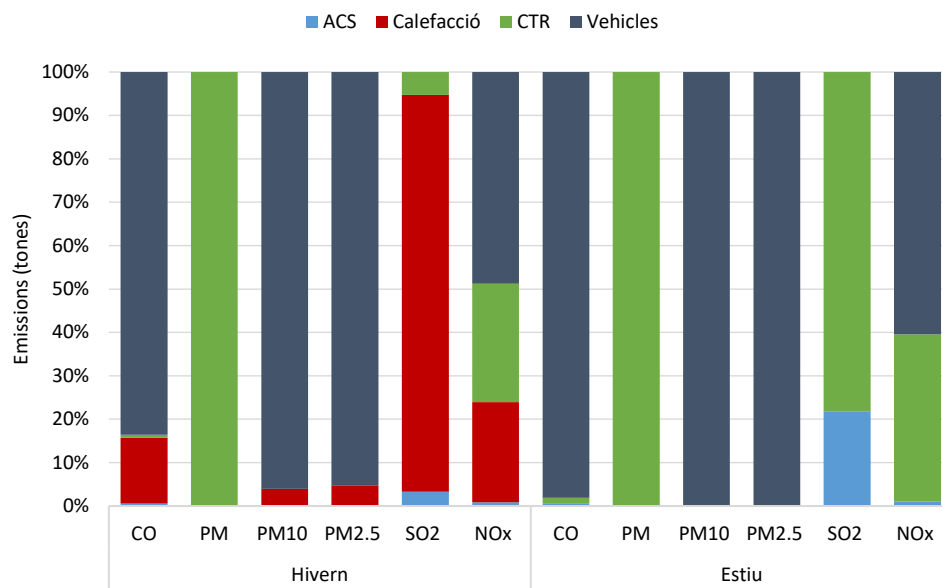


Fig. 11. Emissions contaminants (en %) en un dia tipus d'estiu i hivern a la Vall Central

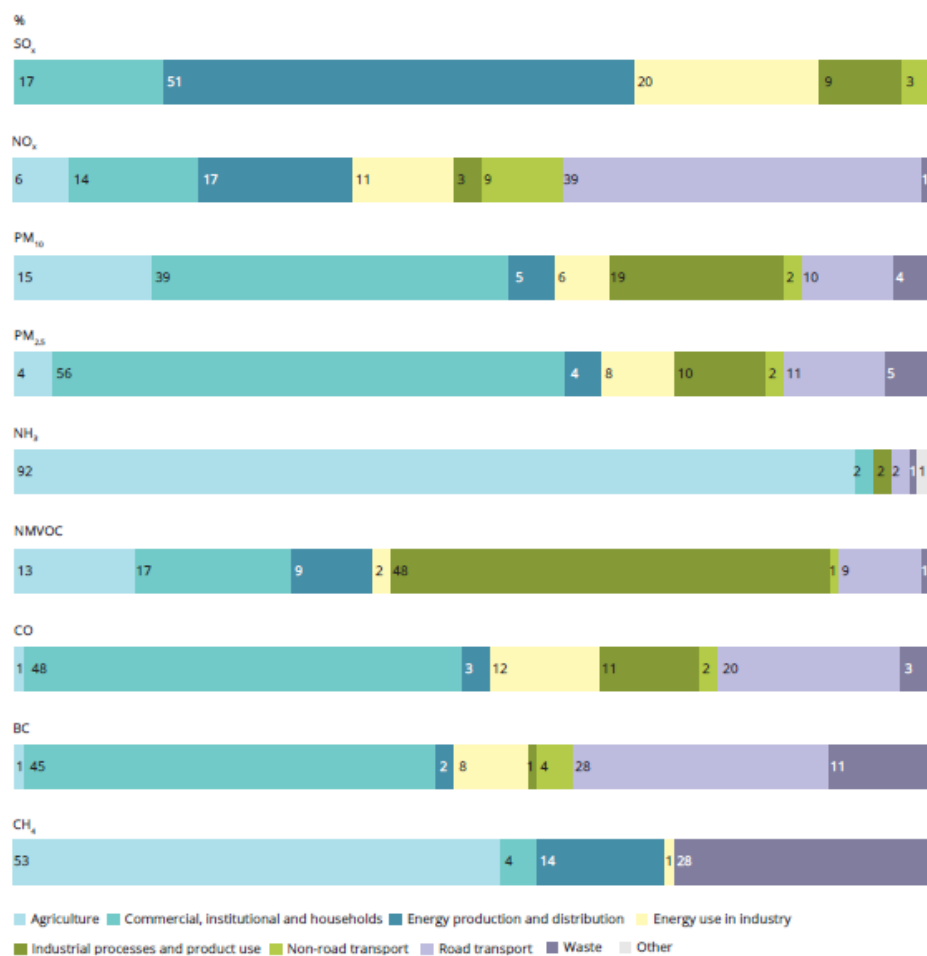


Fig. 12. Contribució de les principals fonts d'emissions a la UE-28. Font: EEA (2018)

El full de càlcul (*resultats_inventari.xlsx*) entregat amb aquest informe integra la totalitat dels resultats de l'inventari d'emissions contaminants de la Vall Central i permet explorar-los amb detall a través de la visualització proporcionada.

3. DISPERSIÓ DELS CONTAMINANTS I EXPOSICIÓ DE LA POBLACIÓ

3.1 Introducció

En aquest capítol s'ha realitzat una modelització dels nivells de concentració de contaminants i de la dispersió d'aquests en la Vall Central. L'anàlisi s'ha centrat en el diòxid de nitrogen (NO₂) degut a la importància d'aquest contaminant i a que és l'únic del qual es disposa d'una mostra significativa de mesures distribuïdes en el territori.

Per a la realització d'aquest anàlisi s'ha treballat amb dues eines del *Cambridge Environmental Research Consultants* (CERC⁵). En una primera fase s'han comptabilitzat i espacialitzat les principals emissions de les diferents fonts mitjançant l'eina EMIT (versió 3.4.1). Aquesta permet calcular les emissions en zones urbanes i compilar els resultats per a ser utilitzats en la modelització de la dispersió dels contaminants. Aquesta segona fase ha estat realitzada amb el software ADMS-Urban (versió 4.1.1.0).

ADMS-Urban és un model gaussià de dispersió de contaminants en l'atmosfera. La modelització de fonts industrials, domèstiques i del trànsit es realitza a través de punts, línies, àrees, volums i malles amb les quals es caracteritzen les diferents fonts d'emissions. Aquest model està dissenyat per permetre estudiar des d'escenaris simples (p.ex., un punt d'emissió aïllat o una sola carretera) fins a escenaris complexos en grans zones urbanes (p.ex., múltiples fonts industrials, domèstiques i de trànsit). Les aplicacions típiques del model inclouen el desenvolupament i testejat de polítiques sobre qualitat de l'aire, el disseny de plans d'acció de qualitat de l'aire, la investigació sobre la gestió de la qualitat de l'aire per a una àmplia gamma de fonts d'emissió, l'estudi dels impactes de la qualitat de l'aire en la salut i la realització de projeccions futures sobre a escala de carrer (CERC, 2017). La Fig. 13 mostra les principals dades d'entrada del model: el trànsit (considerant els diferents tipus de vehicles existents), les carreteres, les fonts industrials, la meteorologia, les concentracions de fons i el terreny.

⁵ <http://www.cerc.co.uk/>

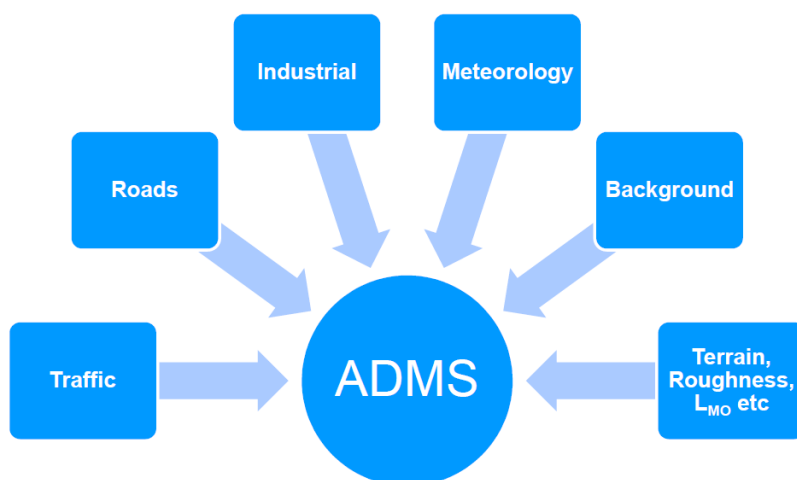


Fig. 13. Principals dades d'entrada en el model ADMS-Urban. Font: Williams (2014)

En la modelització realitzada en el present estudi s'han considerat tres grups de fonts d'emissió de contaminants les quals s'han caracteritzat amb els tres tipus de fonts que inclou el model (*road sources*, *industrial sources* i *grid sources*). Les emissions procedents dels vehicles s'han representat a través de *road sources*, les calefaccions i ACS mitjançant una *grid source* i finalment les emissions del CTR a partir d'un *industrial source*.

A continuació es descriu la metodologia desenvolupada per a la realització de la modelització. En les Seccions 3.3, 3.4 i 3.2 s'explica la caracterització de les emissions de les diferents fonts i en la Secció 3.5 es detallen les variables i principals assumpcions de la modelització.

3.2 Emissions industrials

En ADMS-Urban les emissions industrials es caracteritzen mitjançant *point sources*. La llicència adquirida per aquest projecte limita a 25 punts aquesta font (veure Taula 7). Aquest fet no és un problema ja que Andorra és un país amb molt poca activitat industrial.

Package	Source Limits					
	Roads	Grid Cells	Point	Line	Area	Volume
B	600	3000	25	5	10	25

Taula 7. Límit de fonts permeses per la llicència d'ADMS-urban adquirida

En el present estudi s'ha identificat únicament el CTR com a font d'emissió industrial prou significativa com per ser tinguda en compte. S'ha caracteritzat a partir de la totalitat d'emissions d'un dia d'hivern (veure Secció 2.5.4). A continuació es mostren les característiques considerades del punt d'emissió industrial:

- Emissions (dia d'hivern): $128,86 \text{ kgNO}_x^6 \rightarrow 12,886 \text{ kgNO}_2^7 \rightarrow 0,1491 \text{ gNO}_2/\text{s}$
- Velocitat= 12 m/s
- Diàmetre= 3 m
- Alçada sobre terreny= 5 m
- Temperatura= 80 °C

La Fig. 14 mostra el punt d'emissió en la zona d'estudi representat amb ADMS-Mapper.

⁶ Basat en Secció 2.4

⁷ En emissions industrials la relació NO₂-NO_x es considera del 10% (D. Carslaw et al., 2013)

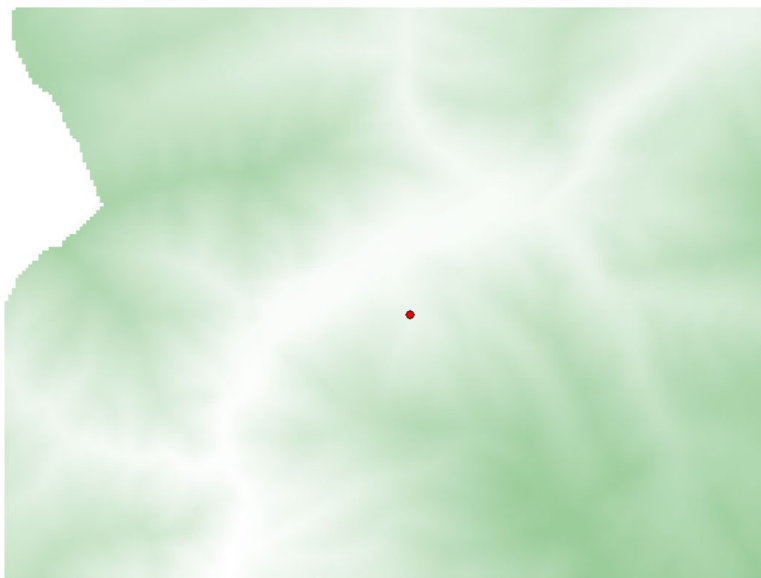


Fig. 14. Punt d'emissió industrial (CTR) ubicat sobre el terreny

La Fig. 15 mostra la sortida del model (concentració d' NO_2) considerant únicament les fonts industrials, el terreny i unes condicions meteorològiques d'inversió tèrmica i vent suau (2 m/s) de nord-est.

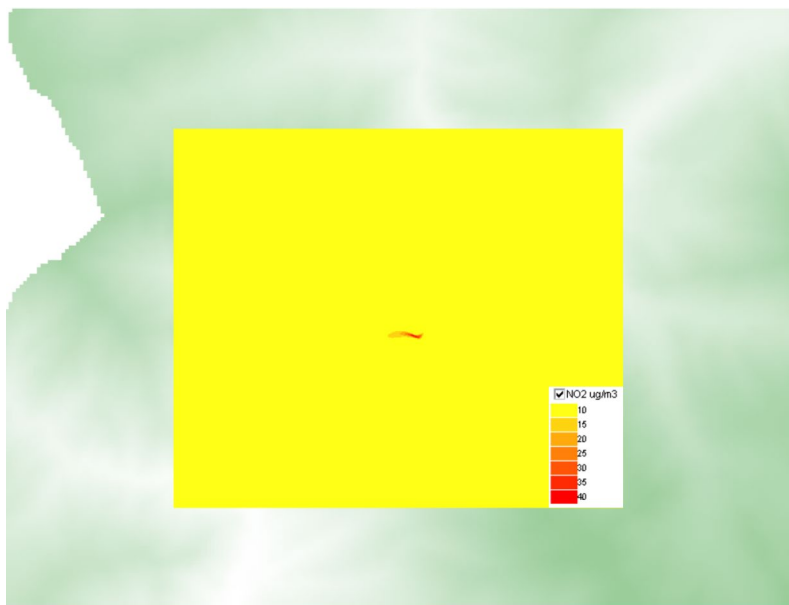


Fig. 15. Concentració d'NO₂ resultant de la modelització de les emissions industrials

3.3 Emissions dels vehicles

La caracterització de les emissions dels vehicles és la més complicada de realitzar i alhora la més important, ja que com s'ha vist en el Capítol 2 aglutina la major part de les emissions contaminants de la Vall Central.

L'inventari espacialitzat de les emissions dels vehicles s'ha realitzat amb l'eina EMIT. Per a realitzar el càlcul de les emissions es necessita la malla de carreteres amb el nombre de vehicles per cada una d'elles, la velocitat, el tipus de vehicles que hi circulen així com els factors d'emissió associats a cada categoria de vehicles. EMIT inclou cada un d'aquests aspectes a través dels elements definits a continuació:

- *AADT (Annual Average Daily Traffic)*: nombre de vehicles diaris de cada tipologia que circulen per cada una de les carreteres. Aquesta variable es calcula en cada un dels escenaris permetent representar escenaris mitjans o puntes de trànsit.
- *Route type*: % de cada categoria de vehicles circulant per cada carretera. En aquest apartat s'ha definit un nou element per representar el parc de vehicles andorrà (basat en la descripció de la Secció 2.2.1) i el format NAEI 14 Eng[3] U17

proporcionat per l'EMIT. Aquest inclou 546 sub-categories de vehicles segons tipologia, tipus de combustible, categoria EURO, cilindrada o pes del vehicle. La Fig. 16 mostra el pes dels diferents vehicles agrupats en categories. S'ha considerat que en totes les carreteres modelitzades la distribució del tipus de vehicles que hi circulen és igual.

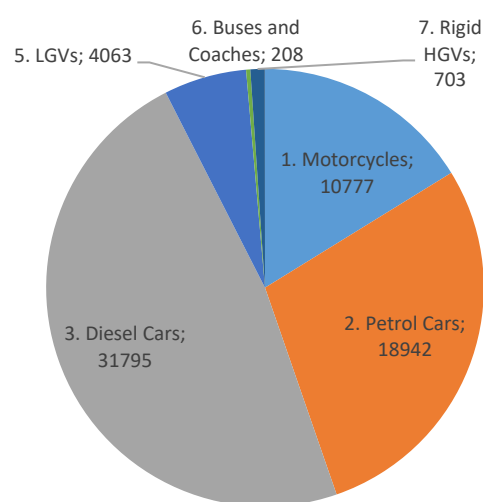
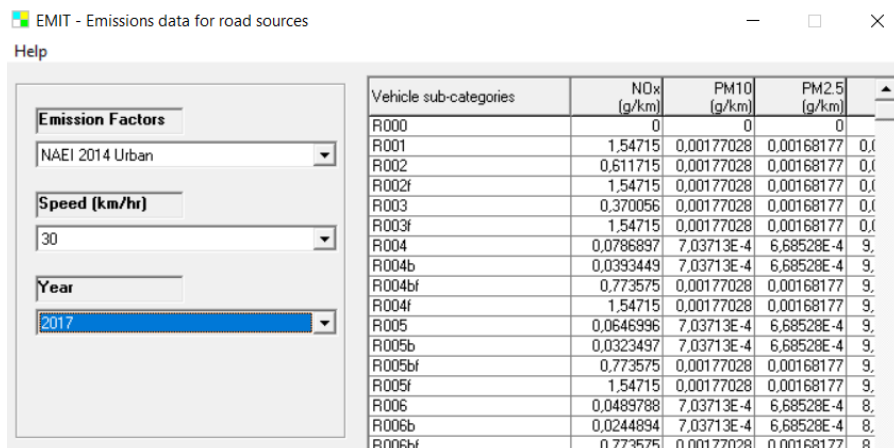


Fig. 16. Vehicles del parc andorrà agrupats per categories

- *Emission factors*: emissions de cada categoria de vehicles. Està associat també a la velocitat mitjana dels vehicles en aquella carretera i a l'any que determina la composició de cada categoria. Per establir els factors d'emissió s'utilitza la base de dades *NAEI 2014 urban* la qual inclou factors construïts amb dades del *UK National Atmospheric Emissions Inventory*⁸. La Fig. 17 presenta una petita mostra de la base de dades utilitzada.

⁸ <http://naei.beis.gov.uk/data/ef-transport>



Vehicle sub-categories	NOx (g/km)	PM10 (g/km)	PM2.5 (g/km)
R000	0	0	0
R001	1,54715	0,00177028	0,00168177
R002	0,611715	0,00177028	0,00168177
R002f	1,54715	0,00177028	0,00168177
R003	0,370056	0,00177028	0,00168177
R003f	1,54715	0,00177028	0,00168177
R004	0,0786897	7,03713E-4	6,68528E-4
R004b	0,0393449	7,03713E-4	6,68528E-4
R004bf	0,773575	0,00177028	0,00168177
R004f	1,54715	0,00177028	0,00168177
R005	0,0646996	7,03713E-4	6,68528E-4
R005b	0,0323497	7,03713E-4	6,68528E-4
R005bf	0,773575	0,00177028	0,00168177
R005f	1,54715	0,00177028	0,00168177
R006	0,0489788	7,03713E-4	6,68528E-4
R006b	0,0244894	7,03713E-4	6,68528E-4
R006bf	0,773575	0,00177028	0,00168177

Fig. 17. Mostra dels factor de NAEI 2014 Urban per l'any 2017 i una velocitat de 30 km/h

Cal assenyalar que en la construcció de la malla final de carreteres que s'introdueix a ADMS-Urban s'han realitzat algunes simplificacions:

- S'han unificat carrils de pujada i baixada com una sola font d'emissió (mitjana de velocitat i suma de l'AADT de cada comptatge).
- La velocitat mitjana dels vehicles només es coneix en les carreteres on es disposa de comptatges de l'Àrea de Mobilitat. En la resta s'ha considerat de 30 km/h tenint en compte que són zones urbanes.
- L'amplada de les carreteres s'ha estimat en base al nombre de carrils i considerant 4 metres/carril.
- Per estimar el nombre de vehicles per cada carretera es prioritzen els comptatges de l'Àrea de Mobilitat i a continuació es tenen en compte els comptatges OBSA.
 - Quan no es disposa de cap comptatge s'agafen els comptatges de DOYMO. Aquests s'associen a un factor lligat a la CG1- Margineda que s'utilitza com a referència per ser utilitzat en altres escenaris més enllà de la intensitat mitjana diària.
- En totes les carreteres s'ha considerat la mateixa *Route type*.

La Fig. 18 mostra les emissions d'NO₂ (en g/km/s) de cada una de les carreteres caracteritzades calculades amb l'eina EMIT. Inclou també les localitzacions dels comptatges realitzats per l'Àrea de Mobilitat i l'OBSA.

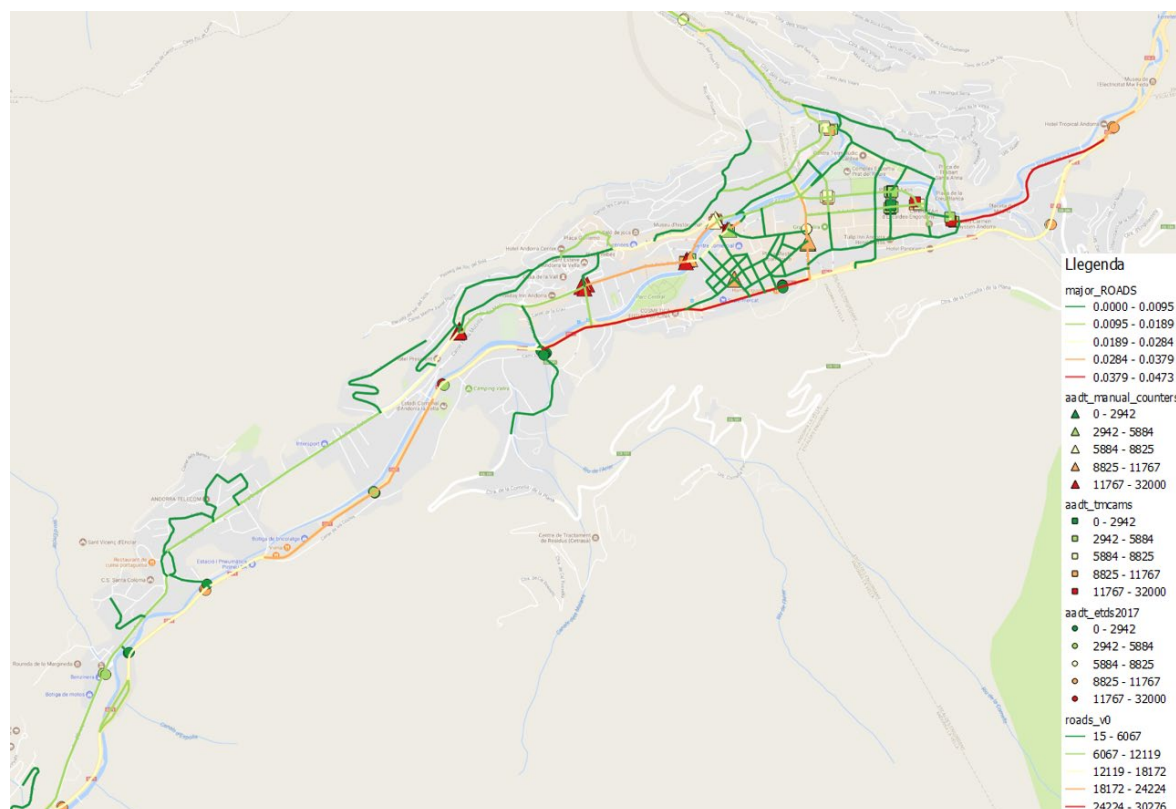


Fig. 18. Emissions d'NO₂ (en g/km/s) de les carreteres caracteritzades

L'element més difícil d'estimar és l'AADT de cada carretera. En aquest projecte s'ha calculat utilitzant tres fonts de dades: (1) comptatges de l'Àrea de Mobilitat, (2) comptatges OBSA i (3) aranya d'intensitat de vehicles de DOYMO. Aquestes fonts es presenten amb major detall a continuació.

3.3.1 Comptatges de l'Àrea de Mobilitat

La font principal per estimar el nombre de vehicles circulant per les diferents carreteres és l'Àrea de Mobilitat del Ministeri d'Ordenament Territorial. Tal com es mostra en la Fig. 19 s'han utilitzat dades procedents de 36 punts de comptatge d'Estat de Trànsit Diari (ETD's). Per cada punt es disposa de dades minutals (nombre de vehicles i velocitat mitjana) dels

anys 2016 i 2017. Val a dir que per al present estudi s'han utilitzat únicament les dades referents a 2017.

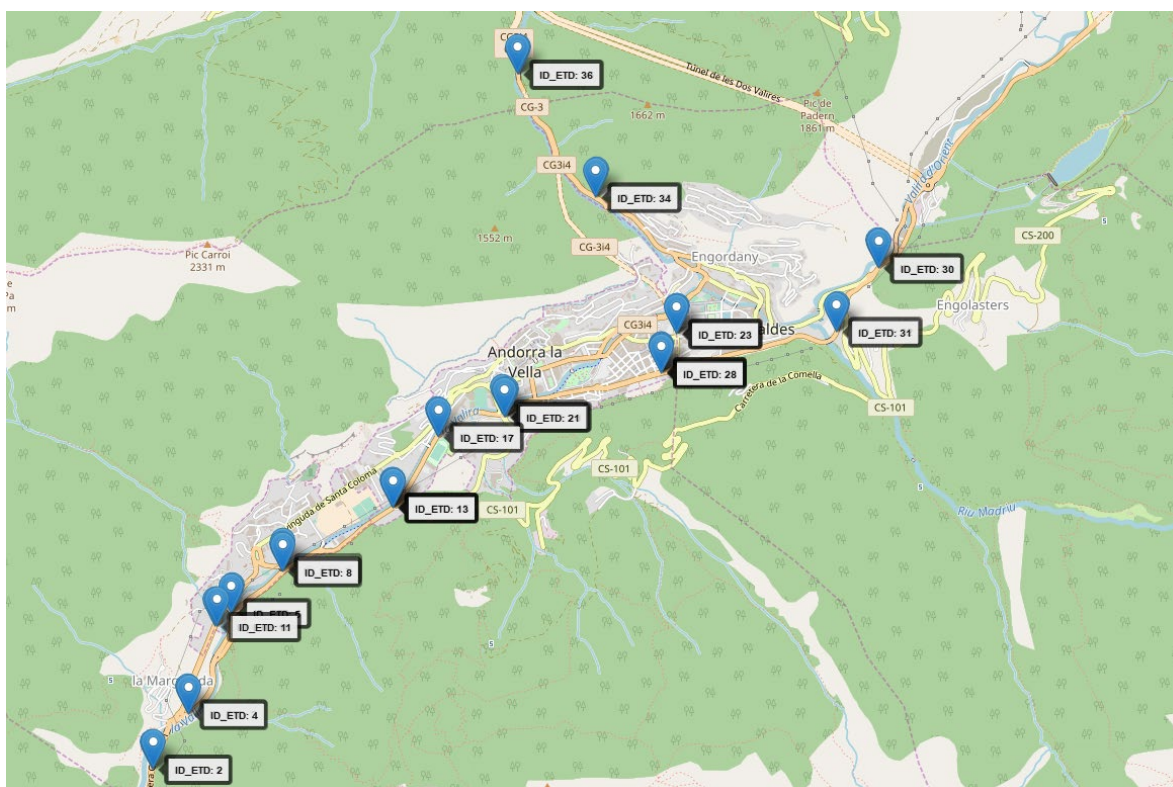


Fig. 19. Comptadors de vehicles de l'Àrea de Mobilitat utilitzats en l'estudi

Les dades de cada un dels mesos i cada punt de comptatge han estat proporcionades per l'Àrea de Mobilitat en fulls de càlcul independents. La primera tasca realitzada en aquest projecte ha consistit en estructurar aquesta informació en una base de dades SQLite (*mobilitat.db*) que s'ha inclòs com a annex a aquest informe. La base de dades està formada per 2 taules amb els comptatges de cada any (*counts2016*, *counts2017*) i 1 taula amb informació sobre les estacions de comptatge (*etds*).

Com s'observa en la Fig. 19 els comptatges de l'Àrea de Mobilitat estan majoritàriament situats en les carreteres generals permetent caracteritzar les principals carreteres de la zona d'estudi. Una de les limitacions és l'absència de punts de comptatge en l'interior de les zones urbanes pel que des de l'OBSA s'ha desenvolupat i desplegat una xarxa de comptadors basats en visió per computador.

3.3.2 Comptatges OBSA

Amb l'objectiu de densificar els comptatges de vehicles i poder disposar de dades de l'interior de la Vall Central s'han dissenyat i instal·lat comptadors de baix cost que han estat en funcionament, en la major part dels casos, durant un període de quatre mesos (juliol-octubre de 2017).

Els comptadors dissenyats per l'OBSA són dispositius que utilitzen la visió per computació per a detectar, comptar, i en una segona fase, fer *tracking* dels vehicles. Estan basats en un computador de placa reduïda que processa i interpreta el vídeo captat per una càmera.

3.3.2.1 Arquitectura de xarxa

Tot i que finalment cada comptador emmagatzema els comptatges en una base de dades pròpia i les dades s'han d'anar a recopilar periòdicament, inicialment es va dissenyar i configurar una arquitectura de xarxa. Aquesta va ésser finalment descartada degut a la impossibilitat de connectar els comptadors a Internet mitjançant xarxes particulars o xarxes públiques tipus AndorraWiFi. A continuació es descriu l'arquitectura de xarxa dissenyada inicialment i posteriorment descartada.

La xarxa de comptadors estaria pensada amb una arquitectura client/servidor. El conjunt de nodes comptadors enviarien periòdicament (cada 15 min) els comptatges a un *broker* (servidor) que els emmagatzemaria en una base de dades SQL. Aquesta comunicació es realitzaria mitjançant el protocol MQTT, basat en un model publicació/subscripció especialment dissenyat per a transmissió de dades amb un ample de banda reduït, sobre el protocol TLS que aportaria totes les funcionalitats d'una connexió segura: encriptació i autenticació. En la Fig. 20 es mostra l'esquema de comunicació.

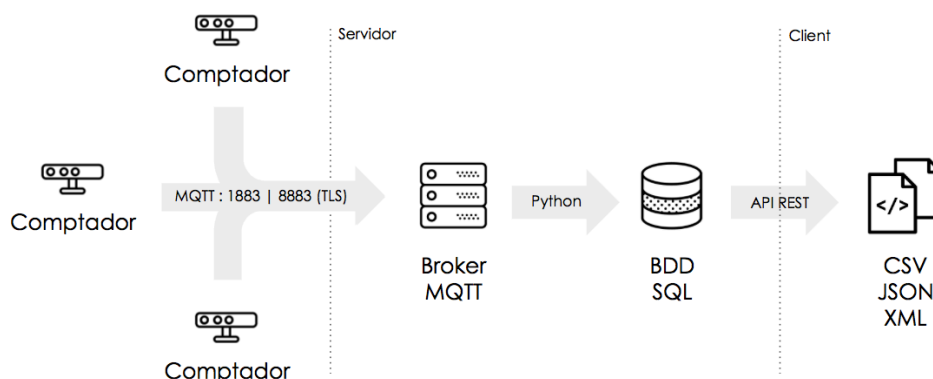


Fig. 20. Esquema de comunicació de la xarxa de comptadors

3.3.2.2 Hardware

L'element principal dels comptadors implementats és una Raspberry Pi 3 model B, un computador de placa reduïda àmpliament utilitzat en entorns *maker* amb un processador 1.2 GHz QuadCore ARM Cortex-A53 i 1 GB de memòria RAM. Disposa, entre d'altres, de port Fast Ethernet i WiFi integrat, així com interfícies per a un display i una càmera. Aquest dispositiu és suficientment potent per realitzar tasques bàsiques de visió per computador i alhora suficient petit per a que els comptadors tinguin unes dimensions reduïdes i puguin ser emplaçats en fanals o sota coberta. Un altre dels factors clau d'aquest és el seu preu reduït, permetent instal·lar un nombre més gran de comptadors a la xarxa.

La càmera que utilitza és un model especialment dissenyat per a la Raspberry Pi, sense filtre infraroig que permet una millor visibilitat de nit. La resolució teòrica de la càmera és *FullHD*, tot i que a la pràctica s'escala el vídeo per accelerar-ne el processat.

La Raspberry Pi té un consum al voltant dels 2W en estat de repòs, incrementant-se considerablement depenent del nombre de perifèrics connectats i de l'estrès al que es sotmeti el processador. Per alimentar el comptador s'utilitza una font d'alimentació que proporciona 5V i 10W. A més, s'hi han afegit uns dissipadors i ventiladors per evitar un sobreescalfament, i posterior error, del processador. La Fig. 21 mostra un dels comptadors implementats.

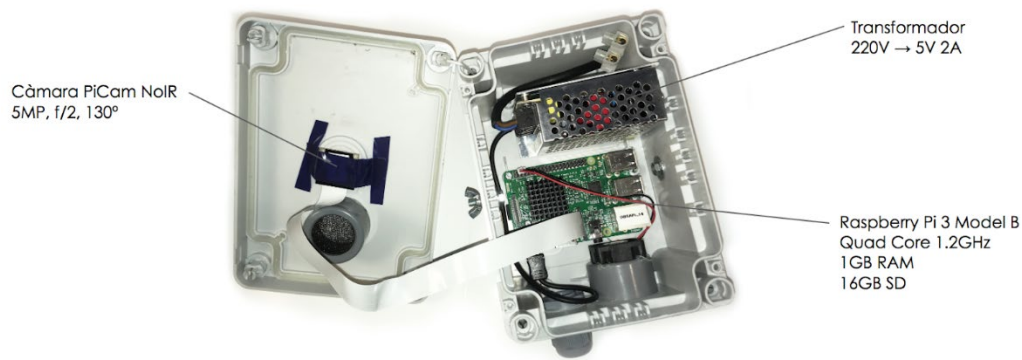


Fig. 21. Comptador de vehicles implementat en aquest projecte

Tot el sistema va integrat dins una caixa de distribució elèctrica de protecció IP56 a la qual s'hi han obert unes vies de ventilació i s'hi ha afegit un sistema rudimentari de fixació que permet inclinar el comptador per assolir una visió òptima de les zones de comptatge.

3.3.2.3 Software

El sistema operatiu utilitzat és Raspbian, una distribució de Linux Debian especialment optimitzada per a la Raspberry Pi. Raspbian inclou de forma nativa Python 2.7, tot i que per poder utilitzar les últimes funcionalitats, tant del llenguatge com de visió per computador, s'ha instal·lat també Python 3 en un entorn virtual.

El comptador analitza les xarxes WiFi disponibles i intenta connectar-s'hi. Si la connexió no pot ser establerta entra en mode auto-hotspot, creant una xarxa WiFi pròpia que permet connectar-s'hi via SSH o FTP i configurar-ne el funcionament o els paràmetres de comptatge, així com obtenir les dades emmagatzemades.

Els comptadors funcionen en base a un programa escrit en Python, que a més gestiona les llibreries de visió per computador, així com la comunicació amb el servidor i la base de dades. Per a tenir funcionant l'*script* de manera contínua, inclòs després d'un reinici sobtat del comptador, el software funciona com a servei *daemon* de Linux.

Per a realitzar les tasques de visió per computador s'utilitza OpenCV, una llibreria de codi obert molt completa escrita en C/C++ però amb interfície per Python que tot i que la compilació de les dependències és un procés llarg, l'ús de la seva API és relativament senzill.

Els comptatges de vehicles s'emmagatzemen cada 15 minuts en una base de dades interna. S'utilitza SQLite, un motor de bases de dades SQL autònom, d'alta fiabilitat i de gran abast contingut en un sol fitxer, que el fa idoni per aplicacions *embedded*.

3.3.2.4 Algorisme de comptatge

El comptador utilitza un algoritme molt utilitzat en tasques de visió per computador, que tot i no ser el més fiable sí és el més eficient en la relació resultats/recursos.

*Background subtraction*⁹ és una tècnica que detecta les variacions entre dos *frames* diferents d'un vídeo i genera una màscara dels elements que s'han mogut. Aquests elements, anomenats *blobs*, s'han de filtrar per a eliminar soroll i/o *outliers* i classificar-los segons tamany i forma per a discriminar quins són d'interès per l'anàlisi. Un fet a tenir en compte al realitzar la classificació és la variació del tamany aparent de l'objecte degut a la perspectiva de la càmera, pel que s'ha d'aplicar un classificador d'interpolació.

Identificats els *blobs* d'interès (els que corresponen a vehicles) per a cada *frame*, s'han de relacionar amb els *blobs* dels *frames* anteriors per obtenir-ne la correspondència i detectar el moviment que han seguit, el que s'anomena *tracking* d'objectes. Una primera opció és assignar-los per posició, en funció de la distància dels seus centroides, però aquesta tècnica s'ha demostrat ser poc satisfactòria degut a les variacions dels centroides d'un mateix *blob* entre diferents *frames*, així com a la diferència de resultats segons l'ordre dels *blobs*. Una millora és aplicar un *Kalman filter*, un algorisme que utilitza múltiples observacions periòdiques i genera estimacions de variables desconegudes que solen ser més precises que les que es basen en una única mesura, estimant una distribució de probabilitat conjunta sobre les variables per cada període de temps. És a dir, s'utilitzen les posicions

⁹ https://docs.opencv.org/3.4/db/d5c/tutorial_py_bg_subtraction.html

anteriors i conegudes del *blob* per estimar la posició futura. Utilitzant aquesta tècnica s'aconsegueix una millora de la fiabilitat en l'assignació de posicions actual/futura, suavitzant la detecció del moviment, al mateix temps que permet corregir una oclusió parcial dels objectes. Utilitzant el *mètode hongarès*¹⁰ s'aconsegueix optimitzar l'assignació entre diferents *blobs*, obtenint el menor cost possible per al conjunt de totes les assignacions.

Tenint el *tracking* de cada objecte, és a dir la seva trajectòria, es poden aplicar diferents condicions per desencadenar esdeveniments. S'observa si la trajectòria intersecciona amb una línia virtual de comptatge que es col·loca a cada carril de la carretera, i en donar-se el cas s'incrementa en un el comptador per a aquell carril. El valor d'aquest comptador es guarda en una base de dades i es reinicia en intervals de 15 minuts.

3.3.2.5 Base de dades resultant

La Fig. 22 mostra els comptadors instal·lats i dels quals es disposa de l'històric de dades. Val a dir que el nombre de comptadors instal·lats va ser superior però per diferents casuístiques (p. ex., talls d'alimentació, problemes d'emmagatzematge, etc.) alguns no van funcionar correctament.

¹⁰ <https://web.eecs.umich.edu/~pettie/matching/Kuhn-hungarian-assignment.pdf>

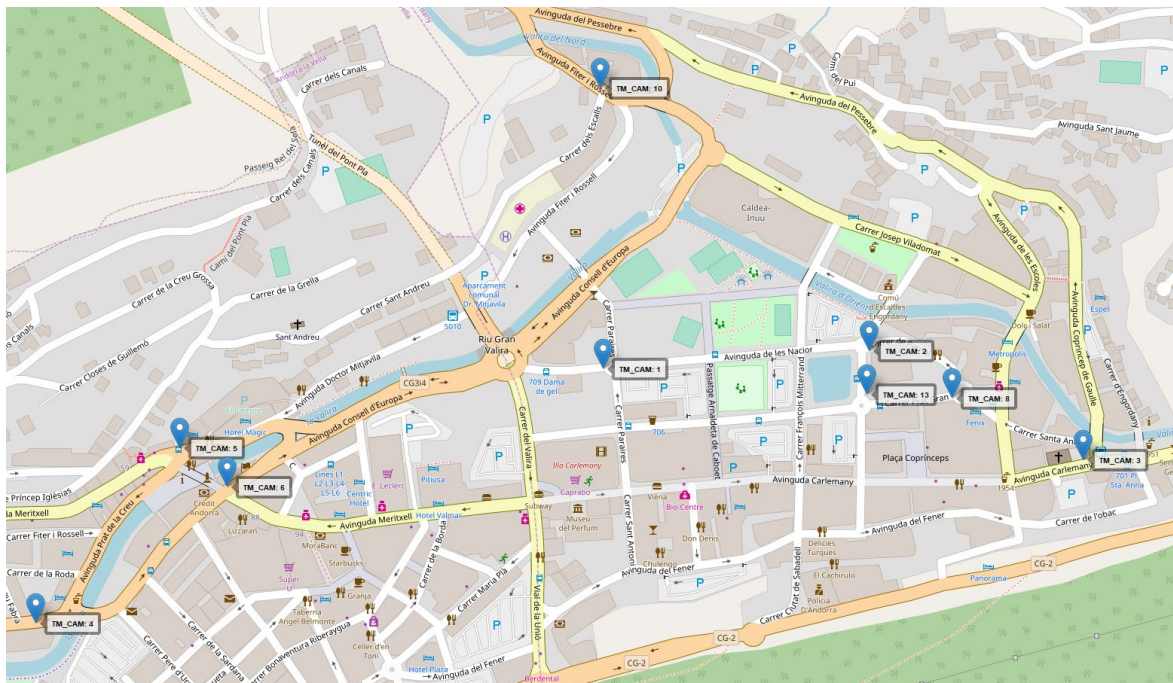


Fig. 22. Comptadors OBSA amb dades disponibles

Els comptatges a escala 15-minutal realitzats durant juliol i octubre de 2017 han estat inclosos en una base de dades SQLite (*obsa_counters.db*) adjuntada com annex en aquest informe. Aquesta base de dades inclou la taula *counts* amb els comptatges 15-minutals de cada comptador i la taula *tmcams* amb informació de cada punt de comptatge.

Per a la instal·lació dels comptadors s'ha comptat amb el suport dels departament de manteniment d'Andorra la Vella i d'Escaldes-Engordany. Aquests es van instal·lar principalment en fanals i l'aspecte més crític va ser disposar d'alimentació les 24 hores del dia. Per solucionar aquest aspecte els comptadors van ser connectats a la xarxa de les llums de Nadal motiu pel qual durant el mes de novembre van haver-se de desinstal·lar. La Fig. 23 mostra la instal·lació de dos dels comptadors desenvolupats per l'OBSA.



Fig. 23. Instal·lació dels comptadors desenvolupats per l'OBSA

3.3.3 Mapa d'intensitat de vehicles (DOYMO)

Els comptatges de l'Àrea de Mobilitat i l'OBSA permeten construir una malla simplificada de carreteres amb la intensitat de vehicles que hi circulen per elles. L'escala temporal d'aquestes dues fonts de dades permet construir escenaris d'intensitat de vehicles en diferents condicions (p. ex., feiner/festiu, estiu/hivern, matí/tarda, etc.). Per tal de completar la informació en la totalitat de carreteres de la Vall Central s'utilitza el mapa d'Intensitat Mitjana Diària (IMD) proporcionat per l'empresa DOYMO la qual treballa des de fa anys per l'Àrea de Mobilitat. La Fig. 24 presenta el mapa d'IMD de l'any 2017. L'inconvenient d'aquesta font de dades és que aporta únicament informació mitjana del nombre de vehicles, impossibilitant extreure'n informació amb major detall temporal.

Per tal de poder representar escenaris amb un major detall temporal, s'ha associat a través d'un factor de ponderació cada una de les dades d'IMD al valor d'intensitat proporcionat per la suma de les ETD1 i ETD2 (Margineda sentit Espanya i Margineda sentit França). Això permet al model poder representar escenaris d'hores específiques on pot haver-hi per exemple pics de trànsit.

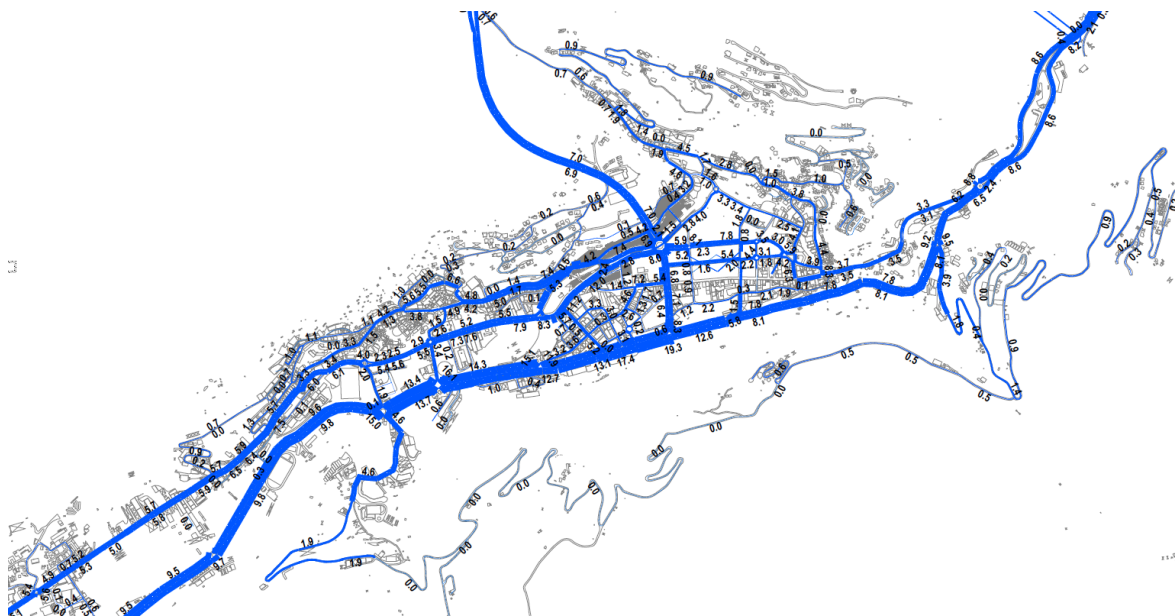


Fig. 24. Mapa de la Intensitat Mitjana Diària del trànsit a Andorra al llarg del 2017.

Font: DOYMO¹¹

La Fig. 25 mostra les carreteres modelitzades en la zona d'estudi representades amb ADMS-Mapper.

¹¹ Comunicació personal

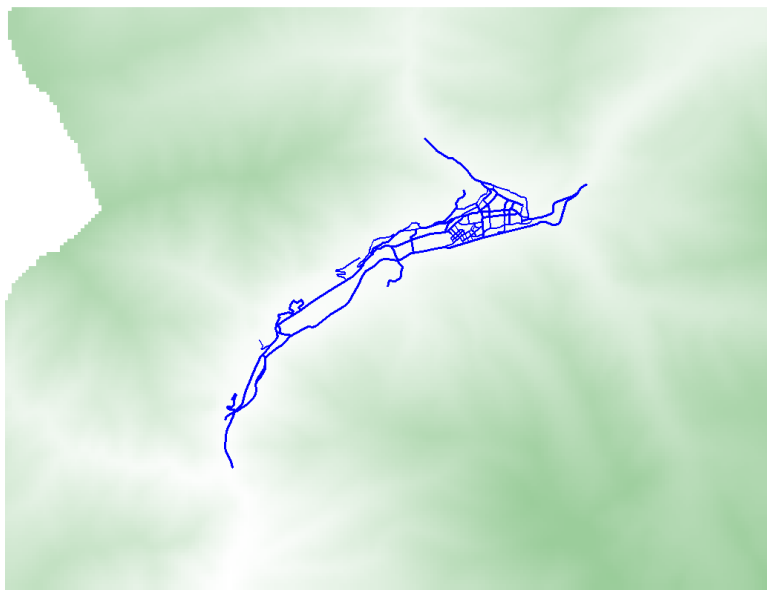


Fig. 25. *Road sources* representant les emissions dels vehicles introduït a ADMS-Urban

La Fig. 26 mostra la sortida del model (concentració d' NO_2) construït amb ADMS-Urban considerant únicament les emissions procedents dels vehicles, el terreny i unes condicions meteorològiques d'inversió tèrmica i vent suau (2 m/s) de nord-est.

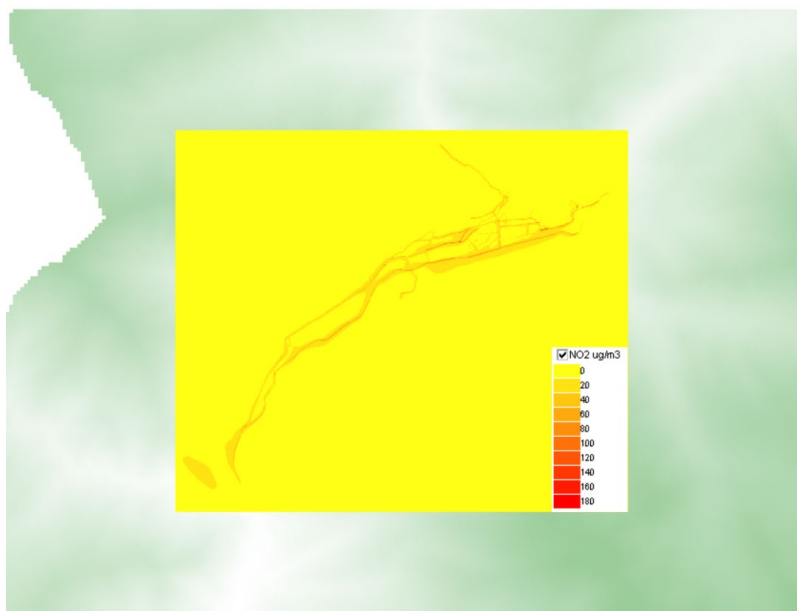


Fig. 26. Concentració d'NO₂ resultant de la modelització de les emissions dels vehicles

3.4 Emissions de les calefaccions i l'ACS

Les emissions de les calefaccions i l'ACS es caracteritzen en ADMS-Urban a través d'una *grid source* (veure Fig. 27).



Fig. 27. *Grid source* representant les emissions de les calefaccions i l'ACS introduït a ADMS-Urban

Aquesta malla de resolució 100x100 metres s'ha generat amb EMIT i inclou els contaminants (NO_x i NO_2) emesos en cada una de les quadrícules. Les emissions de cada quadrícula s'han estimat a través de la metodologia següent:

- Es parteix de la capa CESI (Codi Edifici Seguretat de les Instal·lacions) filtrada per Andorra la Vella i Escaldes-Engordany.
- Es considera cada edifici com un punt d'emissió.
- Les emissions de cada punt es calculen en funció del total d'emissions (veure Secció 2.3), l'àrea del polígon que representa l'edifici i les hores mitjanes de funcionament de la calefacció:

$$Emissions_i(g\text{NO}_x/h) = Emissions_{dia\ hivern}/5^{12} \cdot (\text{Àrea}_{edifici}/\text{Àrea}_{total})$$

¹² Mitjana d'hores considerades de funcionament de la calefacció

- S'exporten les emissions calculades amb EMIT a una *grid source* de 100x100 metres (*depth of grid source*= 5 metres) en format .spt per ser importada a ADMS-Urban (veure Fig. 27).

La Fig. 28 mostra la sortida del model (concentració d'NO₂) construït amb ADMS-Urban considerant únicament les emissions procedents de les calefaccions i ACS, el terreny i unes condicions meteorològiques d'inversió tèrmica i vent suau (2 m/s) de nord-est.

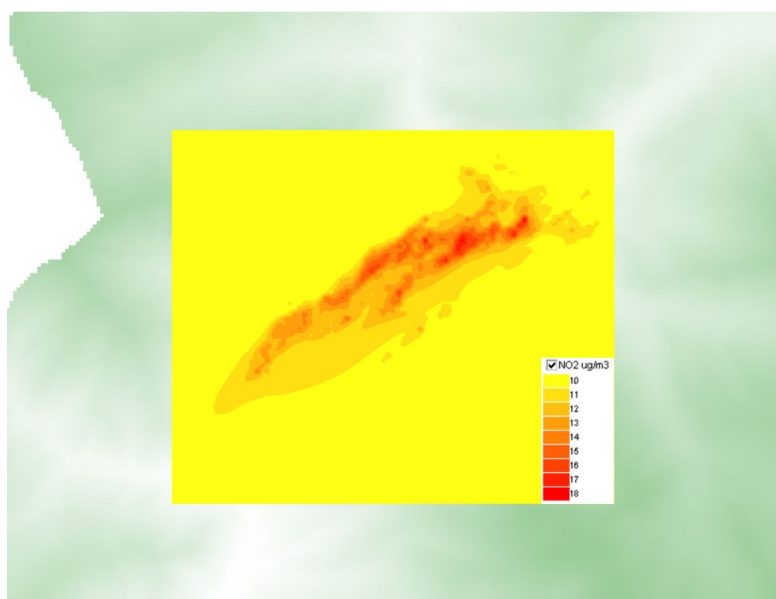


Fig. 28. Concentració d'NO₂ resultant de la modelització de les emissions de les calefaccions i l'ACS

3.5 Metodologia i assumpcions de la modelització

A continuació es detallen aspectes clau de la modelització realitzada amb ADMS-Urban així com les diferents assumpcions realitzades.

3.5.1 *Street Canyon*

ADMS-Urban representa les turbulències addicionals ocasionades a l'interior de carrers amb edificis alts a banda i banda a través del *basic street canyon model* (CERC, 2017). Aquest model té en compte l'amplada de les carreteres i l'alçada dels edificis propers. Per

aquest estudi s'ha generat un SIG amb l'alçada mitjana dels edificis que envolten cada carretera i s'ha inclòs al *road source* utilitzat en la modelització. La Fig. 29 mostra l'alçada mitjana dels edificis propers a cada una de les carreteres.



Fig. 29. Alçada mitjana dels edificis propers a les carreteres

3.5.2 Concentracions de fons

La simulació de cada un dels escenaris construïts amb ADMS-Urban cal iniciar-la amb uns nivells de concentració de fons (*background concentrations*). Aquest és el valor de concentració present en el nostre sistema prèviament a iniciar la simulació.

Habitualment el *background* es defineix per cada hora específica en que s'inicia la simulació basant-se en dades d'alguna estació no urbana. En el cas d'Andorra, l'única estació automàtica rural és la d'Engolasters i no disposa de mesura d'NO₂. Per aquest motiu

s'ha considerat com a *background* la mitjana del valor mínim de concentració nocturna durant l'any 2017, moment en que les emissions són més baixes. Aquest valor s'ha establert en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ basat en l'estació de Referència 942 de l'Aparcament del Prat Gran (veure Fig. 30).

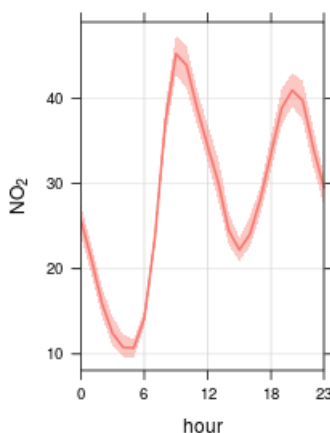


Fig. 30. Nivell de concentració mitjana d'NO₂ a escala horària de l'any 2017 (estació 942)

3.5.3 Terreny

En espais urbans ubicats en zones amb una orografia complexa, l'efecte del terreny i/o la variació espacial de la seva rugositat pot tenir efectes considerables en la dispersió dels contaminants incrementant-ne o reduint-ne les seves concentracions (CERC, 2017).

La inclusió de l'elevació i la rugositat del terreny en ADMS-Urban es realitza a través de fitxers *.ter* i *.ruf*, respectivament. En aquest estudi s'ha construït el fitxer d'elevacions (*.ter*) a partir del model digital d'elevacions (MDE) de resolució 5x5 metres proporcionat a la web del SIGMA¹³ (Sistema d'Informació Geogràfica i Mediambiental d'Andorra). La Fig. 31 mostra el terreny representat en ADMS-Mapper. La resolució de la malla del terreny s'ha establert en 64x64, valor per defecte i suficient en la majoria d'anàlisis (CERC, 2017).

¹³ <https://www.iea.ad/sigma>

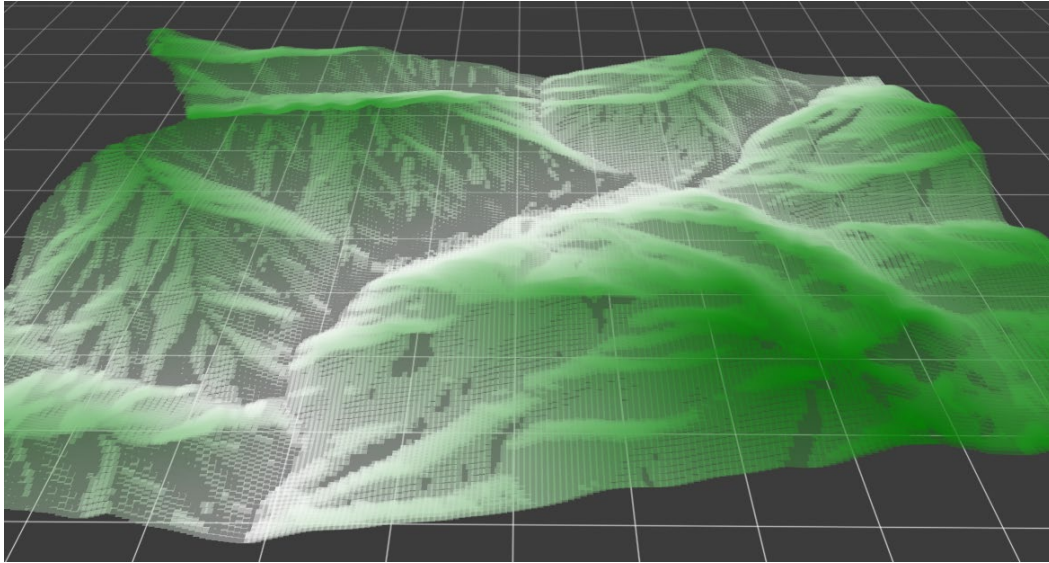


Fig. 31. Terreny de la zona d'estudi representat en ADMS-Mapper

D'altra banda, en absència de major informació, la rugositat del terreny s'ha considerat homogènia al llarg del territori i amb un valor de 1 (valor per defecte considerat en ciutats per ADMS-Urban).

3.5.4 Meteorologia

Les condicions meteorològiques s'introdueixen a ADMS-Urban a través de fitxers *.met*. Aquests fitxers representen les condicions de l'atmosfera durant l'interval de temps de la simulació i han de ser construïts per l'usuari. Poden introduir-se tres tipus de dades meteorològiques:

- Sèries representant condicions meteorològiques diferents
- Seqüències horàries de condicions meteorològiques cobrint un cert període (p. ex., un any)
- Dades estadístiques cobrint un cert període temporal

El mínim de dades meteorològiques necessàries per realitzar una simulació en ADMS-Urban són: velocitat del vent (U), direcció del vent (ΦI) i:

- Dia julià, hora i cobertura de núvols (T_{DAY} , T_{HOUR} , CL)
- o
- Flux de calor sensible (F_{THETA0})
- o
- Inversa de la longitud de Monin-Obukhov ($RECIPLMO$)

També poden ser incloses en el model altres variables com l'altura de la capa límit, la radiació solar, la precipitació, la humitat relativa, etc.

En absència de fitxers meteorològics que descriguin les condicions atmosfèriques a la zona d'estudi, s'ha construït un arxiu *.met* amb l'objectiu de representar diferents situacions atmosfèriques comunes en territori andorrà. Per a tal efecte, s'han utilitzat les categories d'estabilitat de Pasquill-Gifford (P-G). Aquest és un mètode d'estimació de l'estabilitat atmosfèrica, a partir de consideracions de turbulència, tant mecàniques (degudes al vent) com tèrmiques (degudes a la insolació). P-G defineix set categories tal com es mostra en la Taula 8.

Categoria P-G	Estabilitat	Gradient vertical de temp., dT/dz ($^{\circ}C/100m$)
A	Fortament inestable	$<-1,9$
B	Moderadament inestable	De $-1,9$ a $-1,7$
C	Lleugerament inestable	De $-1,7$ a $-1,5$
D	Condicions neutrals	De $-1,5$ a $-0,5$
E	Lleugerament estable	De $-0,5$ a $1,5$
F	Moderadament estable	De $1,5$ a $4,0$
G	Fortament estable	$>4,0$

Taula 8. Categories d'estabilitat de Pasquill-Gifford i gradients verticals de temperatura.

Font: Velo (2005)

La dispersió de contaminants és afavorida per la inestabilitat atmosfèrica, mentre que l'estabilitat actua com a barrera que impedeix la dispersió en sentit vertical (Velo, 2005).

Les categories d'estabilitat de P-G no es poden introduir directament a ADMS-Urban, tot i que es poden reproduir aproximadament a través dels paràmetres U (velocitat del vent) $RECIP_{LMO}$ (inversa de la longitud de Monin-Obukhov) ϕ (direcció del vent) H (altura de la capa límit). Els valors d'aquests paràmetres i la correspondència aproximada a les categories P-G es presenta en la Taula 9.

U (m/s)	$RECIP_{LMO}$ (m^{-1})	H (m)	Categoria P-G
1	-0,5	1300	A
2	-0,1	900	B
5	-0,01	850	C
5	0	800	D
3	0,01	400	E
2	0,05	100	F
1	0,2	100	G

Taula 9. Valors dels paràmetres per representar les categories d'estabilitat de P-G.

Font: CERC (2017)

En aquest estudi s'ha treballat amb dos situacions meteorològiques, corresponents a les categories D (condicions neutrals) i F (moderadament estable). D'altra banda s'ha adaptat la velocitat i direcció del vent a les condicions habituals a Andorra, 2 m/s de Nord-Est.

3.5.5 Altres assumpcions

A continuació es descriuen altres assumpcions considerades en la modelització amb ADMS-Urban:

- Relació NO_x - NO_2 :
 - La relació en les carreteres ve definida per la sortida de l'eina EMIT. Aquesta estableix el valor en funció de la tipologia de vehicles que circulen per cada carretera.
 - Per fonts industrials i domèstiques es considera un 10% ($NO_2 = 0,1 \cdot NO_x$) (D. Carslaw et al., 2013)
- Malla de sortida:

- La malla de sortida permet definir a l'usuari els punts en els quals es calcularan les concentracions de contaminants. En aquest estudi s'ha treballat amb una malla regular de 500x500 punts. Aquesta configuració porta a ràster de sortida amb una mida de píxel de 16,9 metres. Puntualment, en cas de necessitat, pot incrementar-se la resolució de sortida d'alguns escenaris.

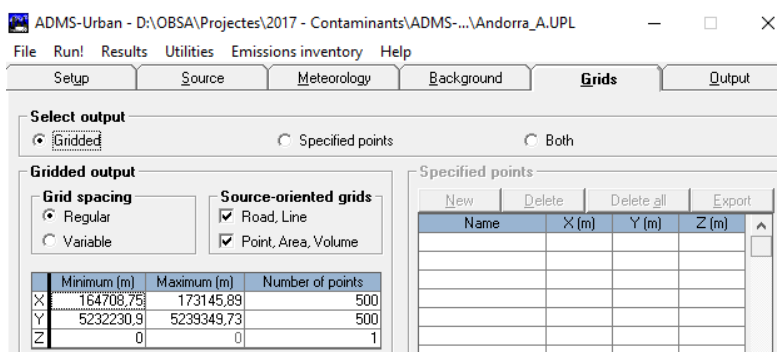


Fig. 32. Configuració de la malla de sortida del model

3.6 Escenaris

Les seccions anteriors d'aquest capítol descriuen en detall la modelització de la dispersió de contaminants a la Vall Central. Aquesta secció explora sis possibles escenaris, quatre (A, B, C i D) representant situacions actuals que es poden donar a la Vall Central i dos d'ells (E i F) estimant l'impacte de diferents mesures per millorar la qualitat de l'aire.

Els escenaris implementats difereixen entre ells en la intensitat de vehicles considerada (p. ex., hora punta o mitjana diària), el parc de vehicles (p. ex., actual o futur), funcionament de les calefaccions (p. ex., enceses, apagades o existència de xarxa de calor) i les condicions meteorològiques (p. ex., condicions neutrals o condicions d'estabilitat amb inversió tèrmica).

3.6.1 Escenari A

L'escenari A és el considerat de referència en aquest estudi.

Té en compte la intensitat mitjana diària de vehicles en les diferents carreteres, la distribució de tipologies del parc de vehicles actual, les calefaccions enceses i les emissions mitjanes del CTR d'un dia de gener.

Aquest escenari representa les condicions meteorològiques a través de la categoria D (condicions neutrals) de Pasquill-Gifford. La concentració d'NO₂ s'ha estimat a través d'un càlcul *long-term*¹⁴ utilitzant un dia complet a escala horària amb les mateixes condicions meteorològiques.

3.6.2 Escenari B

L'escenari B representa un dia feiner d'hivern en hora punta de trànsit amb condicions meteorològiques moderadament favorables a la dispersió dels contaminants.

Té en compte la intensitat de vehicles màxima diària un dia feiner d'hivern (a les 9,00 del matí) en les diferents carreteres, la distribució de tipologies del parc de vehicles actual, les calefaccions enceses i les emissions mitjanes del CTR d'un dia de gener.

Aquest escenari representa les condicions meteorològiques a través de la categoria D (condicions neutrals) de Pasquill-Gifford. La concentració d'NO₂ s'ha estimat a través d'un càlcul *short-term*¹⁵ utilitzant una única hora per representar les condicions meteorològiques.

3.6.3 Escenari C

L'escenari C representa un dia feiner d'hivern en hora punta de trànsit amb condicions meteorològiques desfavorables a la dispersió dels contaminants.

¹⁴ El càlcul *long-term* proporciona com a resultat la mitjana dels valors de concentració calculats per cada hora

¹⁵ El càlcul *short-term* proporciona com a resultat el valor calcular en una hora concreta

Té en compte la intensitat de vehicles màxima diària un dia feiner d'hivern (a les 9,00 del matí) en les diferents carreteres, la distribució de tipologies del parc de vehicles actual, les calefaccions enceses i les emissions mitjanes del CTR d'un dia de gener.

Aquest escenari representa les condicions meteorològiques a través de la categoria F (condicions atmosfèriques estables i en situació d'inversió tèrmica) de Pasquill-Gifford. La concentració d' NO_2 s'ha estimat a través d'un càlcul *short-term*.

La Fig. 33 il·lustra l'efecte de l'estabilitat atmosfèrica en la dispersió dels contaminants durant un dia amb inversió tèrmica del mes de desembre de 2018.



Fig. 33. Efecte de la inversió tèrmica en la dispersió dels contaminants (Andorra, 7/12/2018)¹⁶

3.6.4 Escenari D

L'escenari D representa un dia feiner d'estiu en hora punta de trànsit amb condicions meteorològiques moderadament favorables a la dispersió dels contaminants.

¹⁶ Imatge cedida per Anna Albalat (investigadora CENMA-IEA)

Té en compte la intensitat de vehicles màxima diària d'un dia feiner (a les 9,00 del matí) en les diferents carreteres, la distribució de tipologies del parc de vehicles actual, les calefaccions apagades i les emissions mitjanes del CTR.

Aquest escenari representa les condicions meteorològiques a través de la categoria D (condicions neutrals) de Pasquill-Gifford i la concentració d'NO₂ s'ha estimat a través d'un càlcul *short-term*.

3.6.5 Escenari E

L'escenari E representa un dia feiner d'hivern en hora punta de trànsit amb condicions meteorològiques desfavorables a la dispersió dels contaminants (equivalent a l'escenari C) però on ha hagut una introducció del 20% de vehicles elèctrics en el parc automobilístic (escenari 2030). La Fig. 34 mostra el parc de vehicles considerat en aquest escenari, on s'hi pot observar els més de 12.000 vehicles elèctrics.

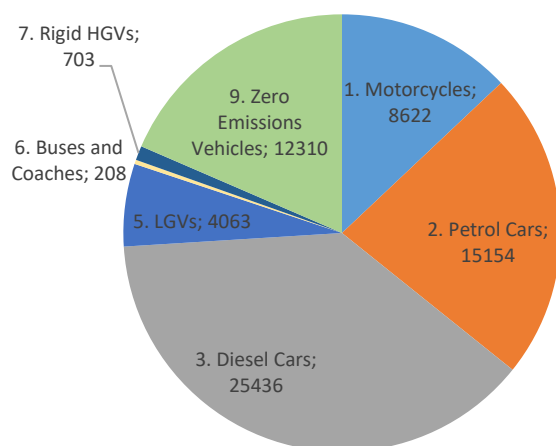


Fig. 34. Vehicles del parc andorrà agrupats per categories de l'Escenari E

Cal assenyalar algunes assumpcions que s'han realitzat a l'hora d'introduir vehicles elèctrics al parc andorrà:

- Únicament s'han substituït turismes dièsel, gasolina i motocicletes.
- S'ha considerat que el nombre total de vehicles del parc roman constant.
- En introduir vehicles elèctrics el criteri de substitució ha estat iniciar la retirada pels més antics i de menor a major cilindrada.

3.6.6 Escenari F

L'escenari F és equivalent a l'escenari E però en aquest cas s'ha considerat que ja està en funcionament la xarxa de calor d'Andorra la Vella. L'entrada en funcionament d'aquesta xarxa de calor està prevista en tres fases (2019, 2020 i 2021). Estarà destinada principalment a edificis públics però també inclourà hotels i sector domèstic. Aquesta xarxa utilitzarà la calor residual del CTR a més de la proporcionada per una central de cogeneració de suport amb gas natural líquuat (veure Fig. 35).

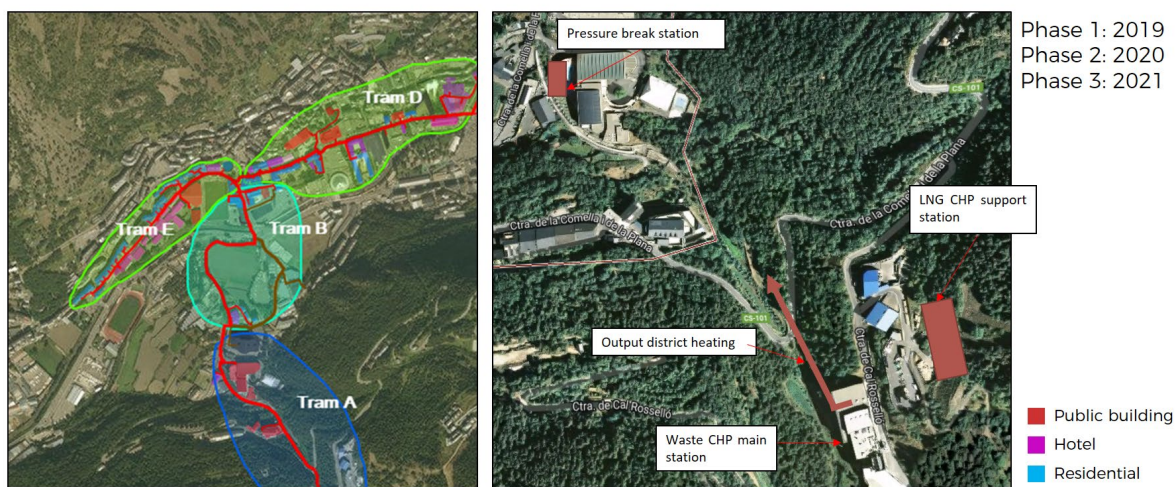


Fig. 35. Esquema de la producció i distribució de calor. Font: FEDA (2018)¹⁷

¹⁷ Comunicació personal

Per tal d'incloure la xarxa de calor en el model s'han eliminat les emissions considerades degudes a calefacció i ACS dels edificis que formaran part de la xarxa. La Fig. 36 mostra els punts d'emissió per representar les calefaccions i l'ACS. Els punts en groc s'han fixat a zero ja que són els que formaran part de la xarxa de calor.

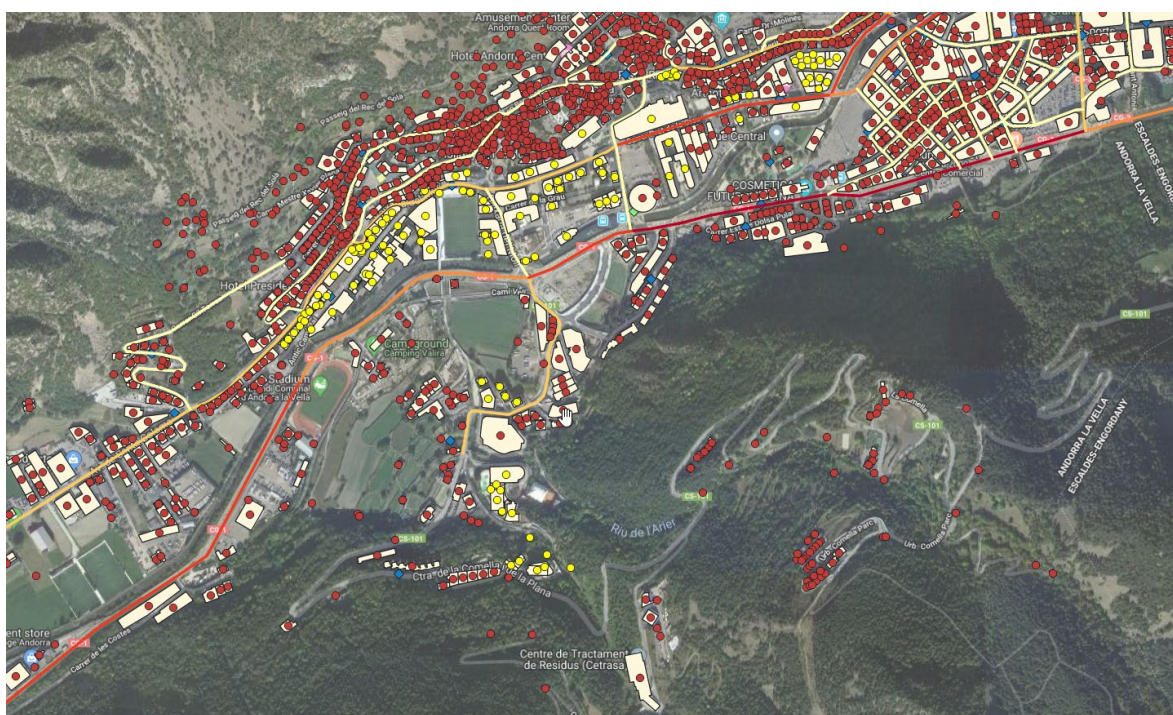


Fig. 36. Punts per representar les emissions de les calefaccions

3.7 Resultats

En aquesta secció es presenten els resultats obtinguts en cada un dels escenaris modelitzats. Els nivells de les concentracions d' NO_2 es representen segons les bandes definides per l'*Air Quality Index* (AQI) utilitzat a nivell europeu (Fraser et al., 2016).

Band Descriptor	O ₃	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂
	1-hour µg/m ³	1-hour µg/m ³	Running 24-hour µg/m ³	Running 24-hour µg/m ³	1-hour µg/m ³
Very Good	0-80	0-40	0-20	0-10	0-100
Good	81-120	41-100	21-35	11-20	101-200
Moderate	121-180	101-200	36-50	21-25	201-350
Bad	181-240	201-400	51-100	26-50	351-500
Very Bad	>240	>400	>100	>50	>500

Fig. 37. Escala i bandes de color utilitzades en aquest estudi, basat en AQI. Font: Fraser et al. (2016)

3.7.1 Concentracions d'NO₂ en els diferents escenaris

En aquesta secció es mostren els resultats obtinguts en els diferents escenaris. Com a annex a aquest informe s'adjunta la planimetria de cada un dels escenaris en format *.pdf* (*escenaris.pdf*) i en ràster.

La Taula 10 mostra el resum de les característiques principals dels escenaris modelitzats. En color blau es ressalten els canvis introduïts respecte l'escenari previ. Per a major detall dels escenaris, veure la Secció 3.6.

Escenari	Trànsit	Parc de vehicles	Calefaccions	Xarxa de calor	Meteorologia ¹⁸
A	Intensitat mitjana	Actual	Enceses	No	Classe D
B	Punta	Actual	Enceses	No	Classe D
C	Punta	Actual	Enceses	No	Classe F
D	Punta	Actual	Apagades	No	Classe F
E	Punta	2030 (20% elèc.)	Enceses	No	Classe F
F	Punta	2030 (20% elèc.)	Enceses	Si	Classe F

Taula 10. Resum de les característiques principals dels escenaris modelitzats (el color blau representa el canvi respecte l'escenari previ)

La Taula 11 presenta la superfície de la zona d'estudi que cau en cada una de les bandes de l'AQI i les variacions que es produeixen entre els diferents escenaris.

¹⁸ Estabilitat atmosfèrica (categoria de Pasquill-Gifford)

Escenari	0-40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Molt bona)	41-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Bona)	101-200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Moderada)	201-400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Dolenta)	>400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Molt dolenta)
A	19096604 m ²	3717 m ²	0 m ²	0 m ²	0 m ²
B	19040283 m ²	64325 m ²	1429 m ²	0 m ²	0 m ²
C	18695214 m ²	401390 m ²	3717 m ²	0 m ²	0 m ²
D	18781553 m ²	315051 m ²	3717 m ²	0 m ²	0 m ²
E	18786413 m ²	310477 m ²	3431 m ²	0 m ²	0 m ²
F	18795847 m ²	301328 m ²	3145 m ²	0 m ²	0 m ²

Taula 11. Superfície de la zona d'estudi que cau en cada una de les bandes de l'AQI

D'altra banda, la Taula 12 mostra els nivells màxims i mitjans de concentració d'NO₂ en els escenaris analitzats.

Escenari	Màxim ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mitjana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
A	63,54	11,36
B	163,91	12,53
C	157,36	15,94
D	154,30	14,43
E	144,88	15,42
F	144,88	15,28

Taula 12. Nivells màxims i mitjans de concentració d'NO₂ en els diferents escenaris

Els valors d'aquestes dues taules s'utilitzen de referència a continuació on s'analitza individualment cada un dels escenaris.

La Fig. 38 mostra els nivells de concentració d'NO₂ en l'**Escenari A**. Aquest escenari considera la intensitat mitjana diària de vehicles, el parc de vehicles actual, les calefaccions enceses i una situació meteorològica sense inversió tèrmica (veure Secció 3.6.1 per major detall).

Els nivells de qualitat de l'aire d'aquest escenari en quant a NO₂ es situen majoritàriament en la banda de 0-40 µg/m³ (Molt bona) amb zones puntuals de 41-100 µg/m³ (Bona). Els nivells més alts s'observen a les zones properes a Prat de la Creu, l'encreuament de Bonaventura Armengol amb Av. Meritxell i al sud de l'Av. de Tarragona.

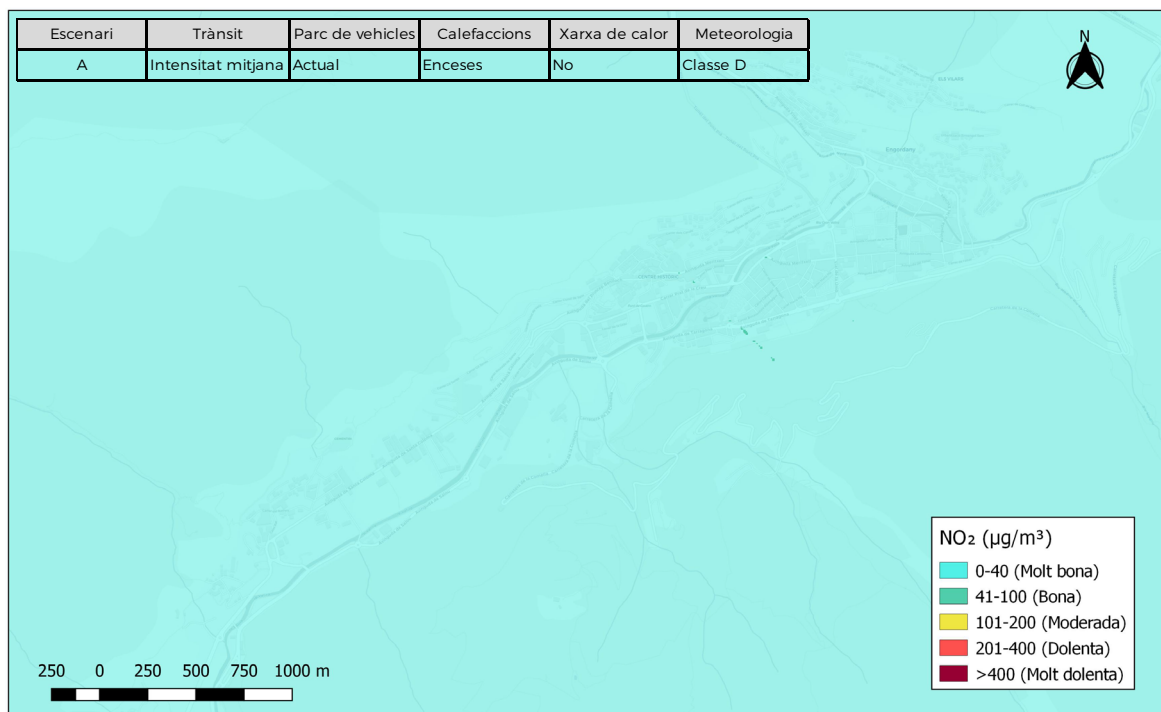


Fig. 38. Nivells de concentració d'NO₂ en l'Escenari A

La Fig. 39 mostra els nivells de concentració d'NO₂ en l'**Escenari B**. Aquest escenari considera l'hora punta de trànsit, el parc de vehicles actual, les calefaccions enceses i una situació meteorològica sense inversió tèrmica (veure Secció 3.6.2 per major detall).

Els nivells de qualitat de l'aire d'aquest escenari es mantenen majoritàriament en la banda "Molt bona" amb part de les zones properes al trànsit en "Bona". En aquest cas, les zones properes a Prat de la Creu, l'encreuament de Bonaventura Armengol amb Av. Meritxell i el sud de l'Av. de Tarragona presenten puntualment nivells d'entre 101-200 µg/m³ (Moderada). Concretament, a la zona alta d'Av. de Tarragona s'hi observen uns patrons en forma de línies diagonals provocats pel vent de nord-est, el terreny i l'absència d'edificis propers.

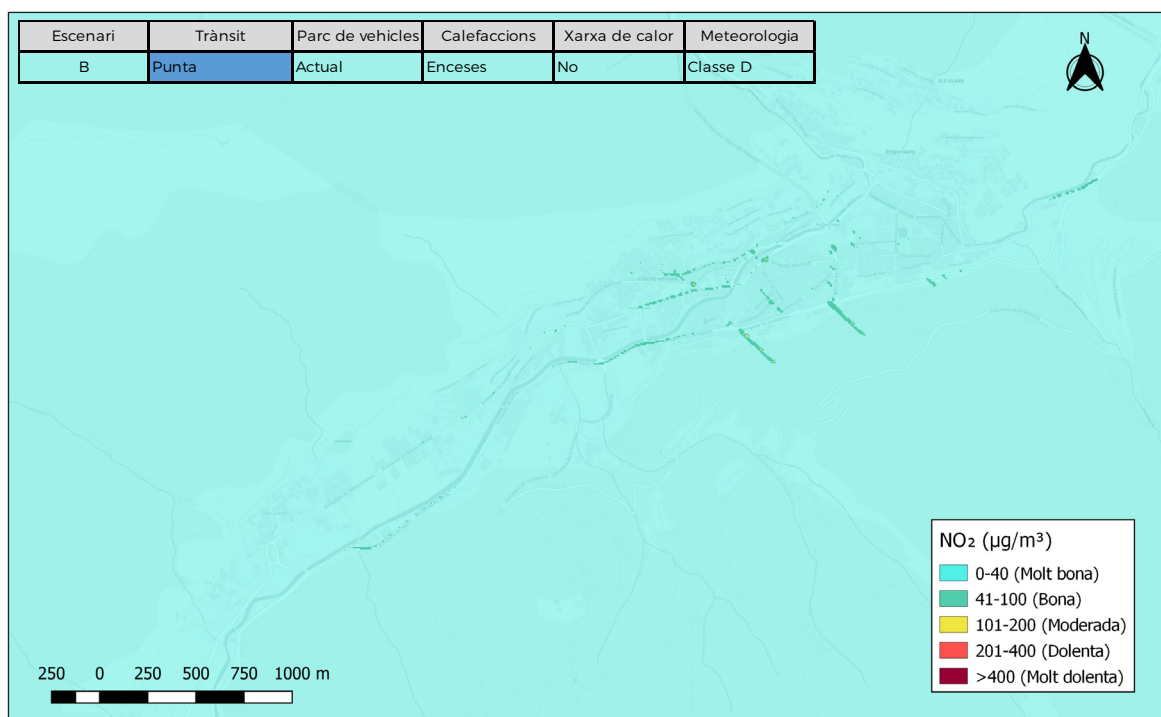


Fig. 39. Nivells de concentració d'NO₂ en l'Escenari B

D'acord a la Taula 11 i Taula 12, aquest escenari presenta una reducció d'un 0,3% de la superfície catalogada com a "Molt Bona" i un increment molt important del nivell màxim observat d'NO₂.

La Fig. 40 mostra els nivells de concentració d'NO₂ en l'**Escenari C**. Aquest escenari considera l'hora punta de trànsit, el parc de vehicles actual, les calefaccions enceses i una situació meteorològica d'inversió tèrmica (veure Secció 3.6.3 per major detall).

Els nivells de qualitat de l'aire d'aquest escenari es situen majoritàriament en les bandes "Molt bona" i "Bona". Els nivells pic d'immissió (dins la banda "Moderada") es donen a la part alta de Prat de la Creu i a la zona propera a la Plaça de l'Església d'Escaldes-Engordany. En aquest cas, zones interiors de la parròquia (p. ex., Prada Ramon) presenten valors més elevats i espais propers al CTR passen de la banda "Molt bona" a "Bona".

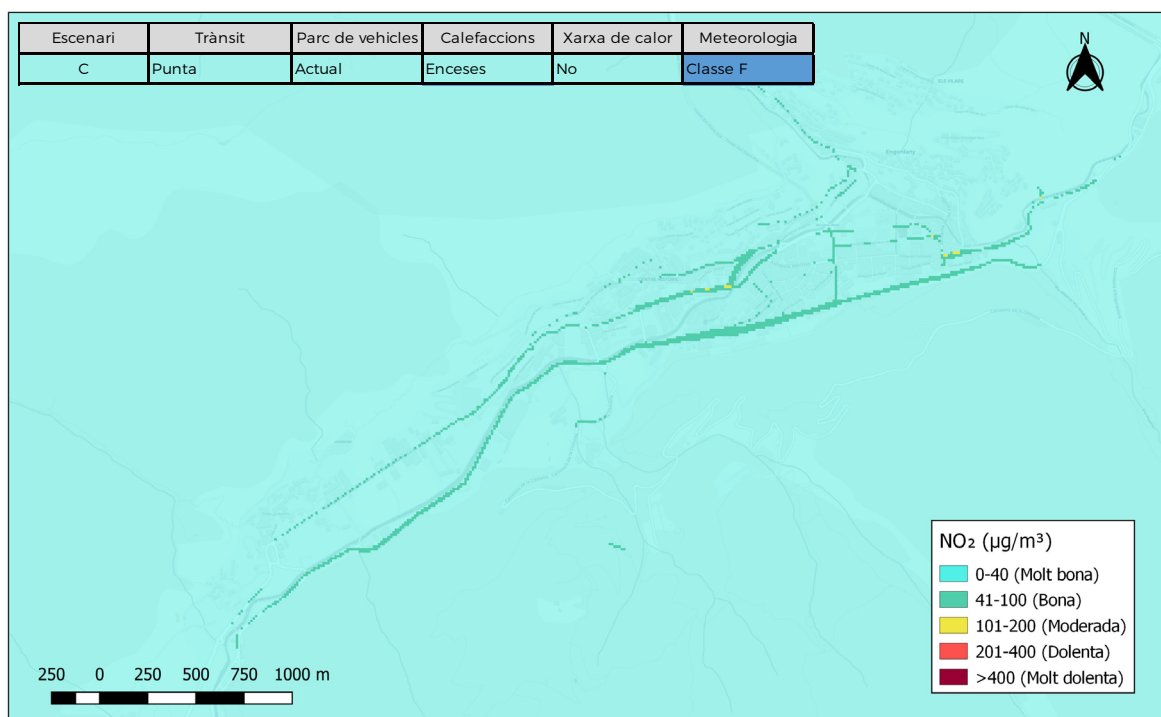


Fig. 40. Nivells de concentració d'NO₂ en l'Escenari C

En conjunt, es redueix un 2% la superfície catalogada com a "Molt bona" respecte a l'escenari A.

La Fig. 41 mostra els nivells de concentració d'NO₂ en l'**Escenari D**. Aquest escenari considera l'hora punta de trànsit, el parc de vehicles actual, les calefaccions apagades i una situació meteorològica d'inversió tèrmica (veure Secció 3.6.4 per major detall).

Els nivells de qualitat de l'aire d'aquest escenari són molt similars als observats en l'escenari C, presentant una lleu reducció dels nivells d'immissió especialment en les zones més urbanitzades. Les zones amb valors més elevats es mantenen a la part alta de Prat de la Creu i a la zona propera a la Plaça de l'Església d'Escaldes-Engordany (banda "Moderada").

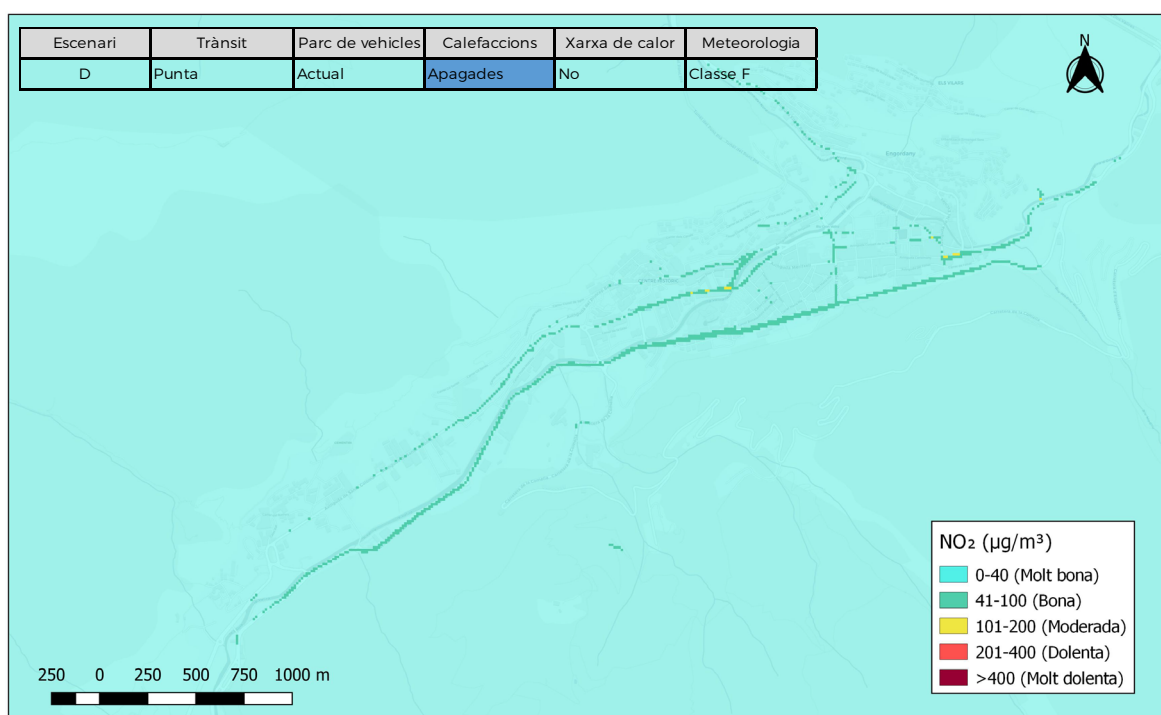


Fig. 41. Nivells de concentració d'NO₂ en l'Escenari D

Aquest escenari mostra una reducció en la banda "Bona" d'un 22% incrementant-se la "Molt bona" en un 0,5% respecte l'escenari C.

La Fig. 42 mostra els nivells de concentració d'NO₂ en l'**Escenari E**. Aquest escenari considera l'hora punta de trànsit, el parc de vehicles previst l'any 2030, les calefaccions enceses i una situació meteorològica d'inversió tèrmica (veure Secció 3.6.5 per major detall).

Els nivells de qualitat de l'aire d'aquest escenari són similars als observats en l'escenari C però presentant una reducció dels nivells d'immissió en les zones més properes a les carreteres. Les zones amb valors més elevats es mantenen a la part alta de Prat de la Creu i a la zona propera a la Plaça de l'Església d'Escaldes-Engordany (banda "Moderada").

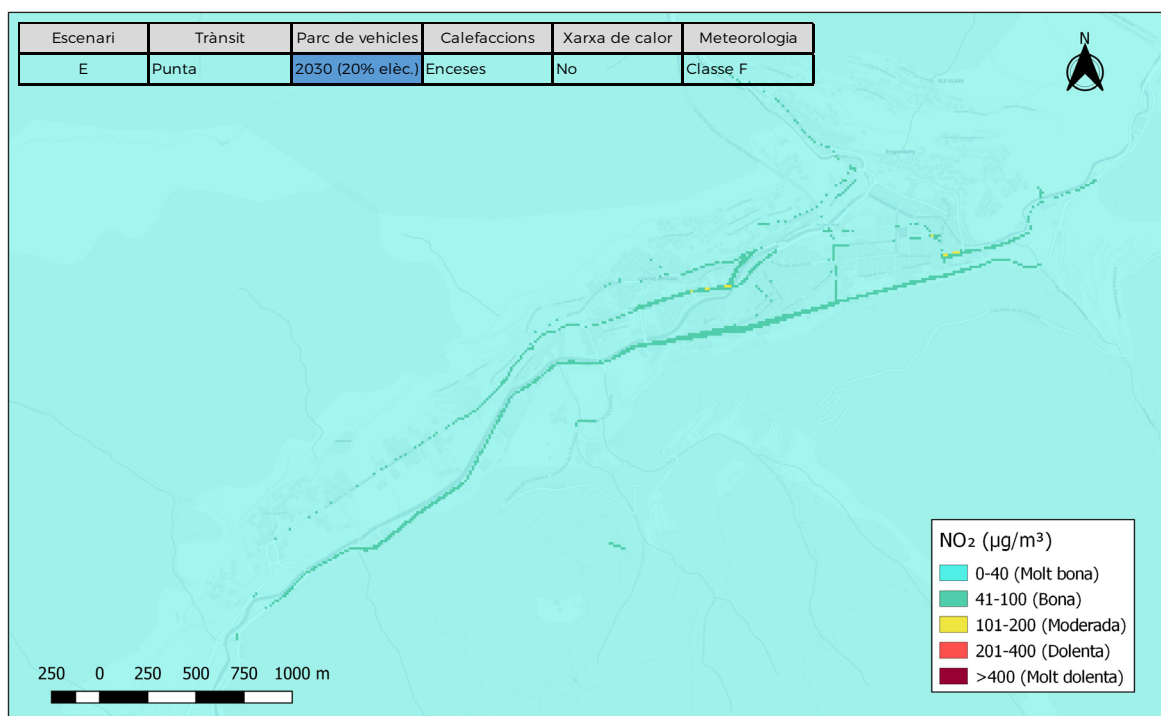


Fig. 42. Nivells de concentració d'NO₂ en l'Escenari E

Aquest escenari mostra com la introducció de vehicles elèctrics aporta una reducció en la banda "Moderada" (8%) i en la "Bona" (23%) incrementant-se la "Molt bona" en un 0,5% respecte l'escenari C. La Taula 12 mostra que aquesta mesura aportaria també una reducció d'un 8% dels nivells màxims d'NO₂.

La Fig. 43 mostra els nivells de concentració d'NO₂ en l'**Escenari F**. Aquest escenari considera l'hora punta de trànsit, el parc de vehicles previst l'any 2030, les calefaccions enceses i una situació meteorològica d'inversió tèrmica. La diferència amb l'escenari E és que en aquest cas la xarxa de calor d'Andorra la Vella ja es considera en funcionament (veure Secció 3.6.6 per major detall).

Els nivells de qualitat de l'aire d'aquest escenari són similars als observats en l'escenari E però presentant una reducció dels nivells d'immissió en les zones que es beneficiaran de la xarxa de calor (Prada Casadet, Baixada del Molí). Tot i que aquesta mesura té poc impacte en el valors mitjans i pics modelitzats (veure Taula 12), té la virtut d'actuar sobre una de les zones de la banda "Moderada" (Prat de la Creu arribant a Bonaventura Armengol). D'aquesta manera, i combinada amb la introducció de vehicles elèctrics, aconsegueix reduir la banda "Moderada" en un 15% respecte l'escenari C.

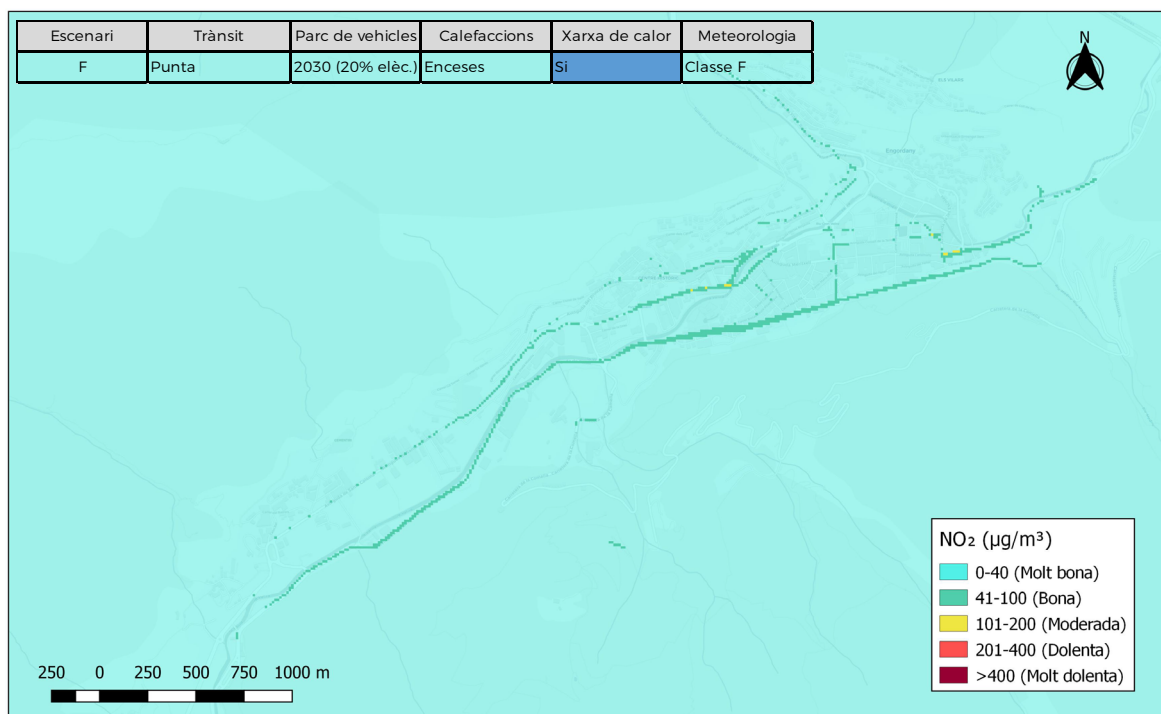


Fig. 43. Nivells de concentració d'NO₂ en l'Escenari F

3.7.2 Exposició de la població

Partint dels resultats obtinguts en l'escenari C, l'objectiu d'aquesta secció és combinar els nivells estimats de concentració d'NO₂ amb un mapa de densitat de població. Això permetrà identificar zones potencialment crítiques on es combinen valors alts d'immissió i de població.

Per tal d'estimar la distribució de densitat de població d'un dia feiner en la zona d'estudi s'ha fet ús de les dades de telefonia mòbil proporcionades per Andorra Telecom. A partir dels registres RNC (*Radio Network Controller*) de 8 a 10 del matí del dilluns dia 12 febrer de 2018 s'ha obtingut el mapa de densitat de població. Els RNCs aglutinen l'activitat que realitzen els usuaris connectats a la xarxa de telefonia mòbil quan aquests estan fent ús d'algun servei (p.ex., trucades, missatges, ús de dades) a més de la informació sobre els canvis de cel·la realitzats. El mapa presentat en la Fig. 44 s'ha construït partint del total d'interaccions registrades en aquella franja horària i normalitzant els resultats per obtenir valors compresos entre 0 i 1.

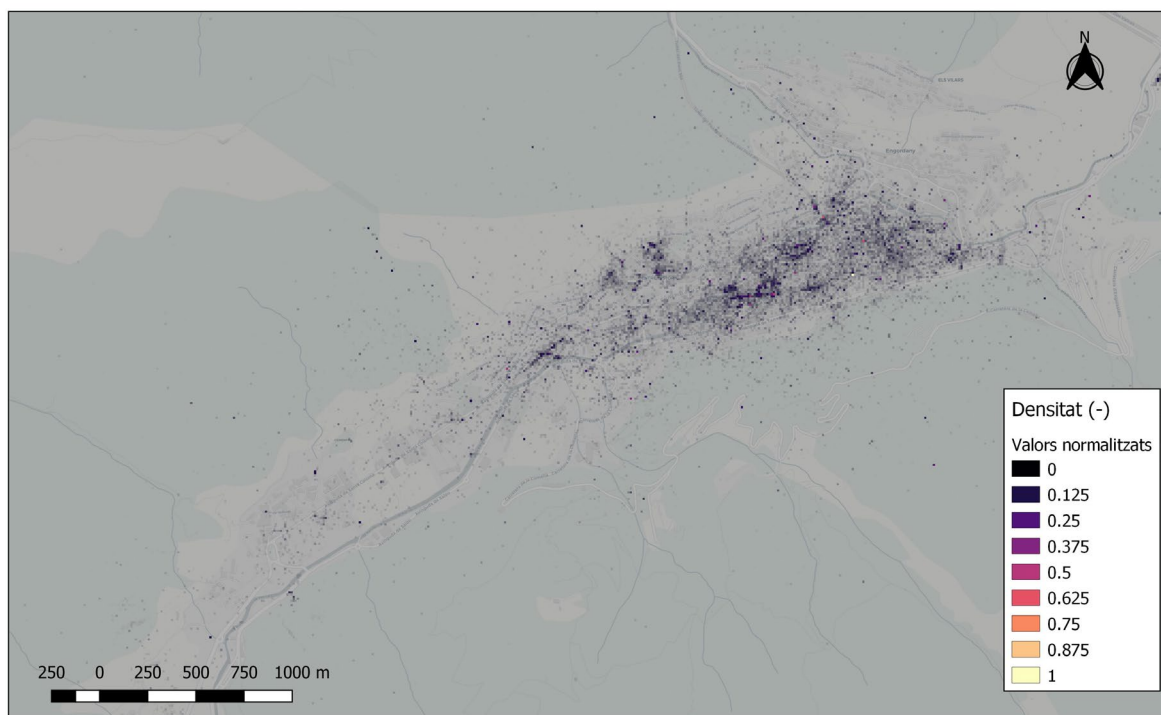


Fig. 44. Densitat de població (normalitzada) entre les 8 i les 10 del matí d'un dia feiner

Per obtenir el mapa d'exposició de la població s'ha multiplicat el ràster de densitat de població pel de nivells d'immissió de l'escenari C normalitzats. D'aquesta manera s'obté un ràster on els valors obtinguts depenen en el mateix grau de la densitat de població i dels nivells de concentració d'NO₂. El ràster resultant s'ha multiplicat per 10 per obtenir una escala resultant compresa entre 0 i 10. La Fig. 45 mostra els resultats obtinguts. En ella poden identificar-se les zones amb una major coincidència entre alts nivells de població i concentració. L'encreuament entre Prat de la Creu i Bonaventura Armengol, així com l'Av. del Fener prop del Carrer de la Unió són algunes de les zones amb resultats més elevats.

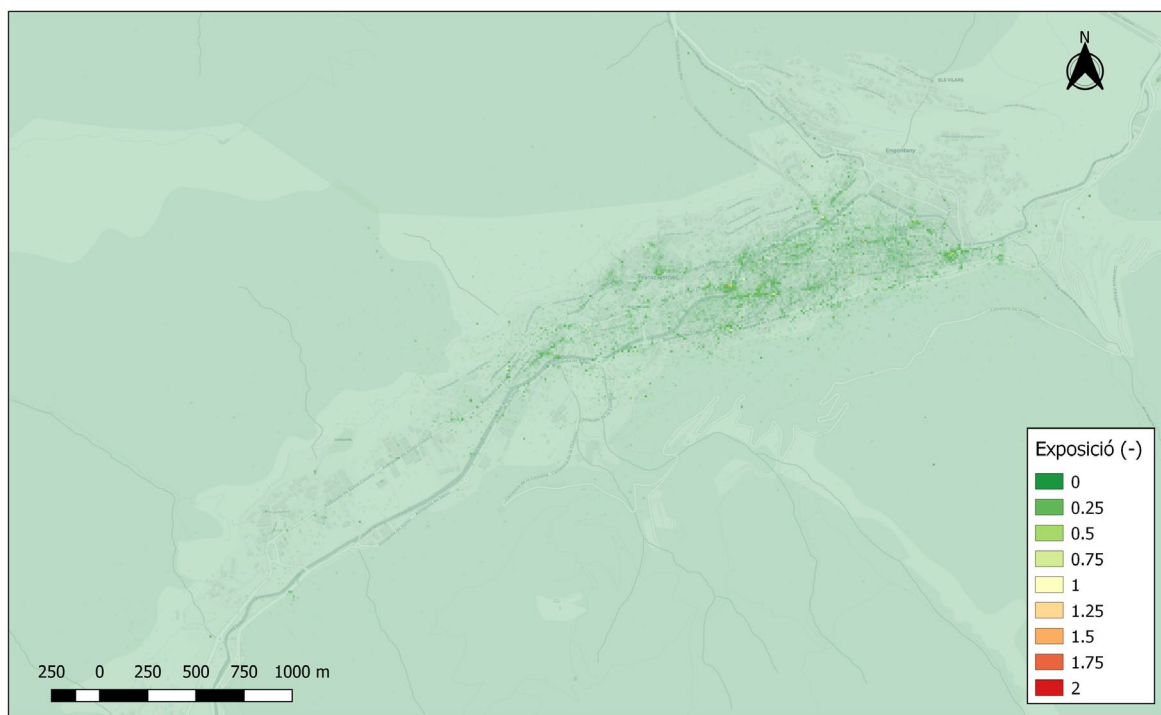


Fig. 45. Exposició de la població en la zona d'estudi

Com a annex a aquest informe s'adjunta la planimetria d'aquests resultats en format *.pdf* i *.tif* (*exposicio_poblacio.pdf*, *exposition.tif*) les quals permeten explorar amb major detall les zones més crítiques.

3.8 Verificació del model

La verificació del model consisteix en comparar els resultats obtinguts amb mesures reals, en el nostre cas de nivells d'immissió d' NO_2 . Tal com es mostra en la Fig. 46 el procés de verificació serveix també per ajustar paràmetres del model desenvolupat.

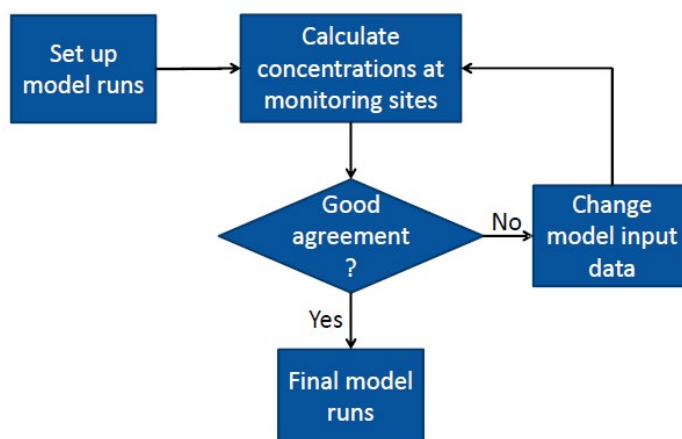


Fig. 46. Procés de verificació d'un model en ADMS-Urban. Font: Williams (2018)

En el cas d'Andorra, les úniques mesures especialitzades de nivells de concentració de contaminants són les proporcionades pels tubs passius. Aquests aporten valors de concentració mitjana d' NO_2 durant els 15 dies que romanen instal·lats. La Fig. 47 mostra els diferents punts de mesura de concentració d' NO_2 instal·lats a la Vall Central.

Per tal de poder realitzar correctament la verificació del model caldria realitzar una simulació amb ADMS-Urban que tingués en compte totes les condicions viscudes (diferents fonts d'emissions i condicions meteorològiques) a escala horària durant els 15 dies en que es van prendre les mesures del tubs passius. Amb les dades disponibles actualment a Andorra, tant a nivell d'emissions com sobretot de condicions meteorològiques (p. ex., estabilitat atmosfèrica) no és possible arribar a aquest nivell de verificació del model.

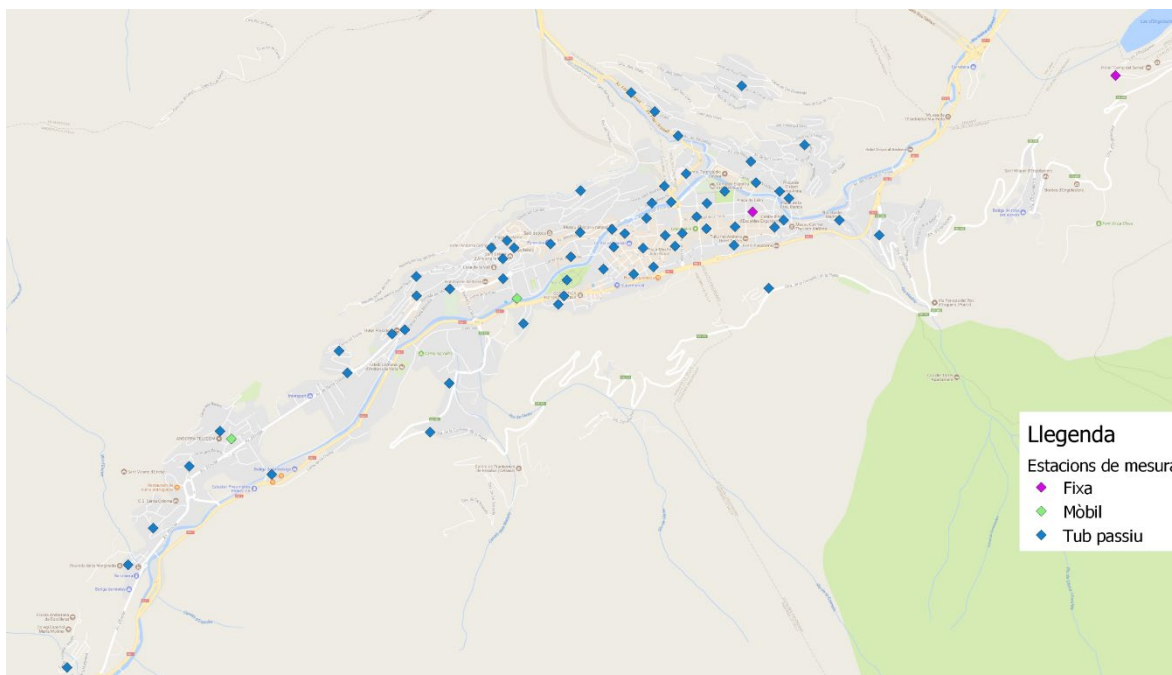


Fig. 47. Punts de mesura d'NO₂ instal·lats a la zona d'estudi

En aquest estudi s'ha fet una verificació visual comparant els resultats dels diferents escenaris amb els mesurats pels tubs passius durant les campanyes 41 i 41, del 31/08/2017 al 14/09/2017 i del 01/09/2017 al 15/09/2017, respectivament. La Fig. 48 mostra un mapa de calor amb els valors mesurats durant aquestes campanyes. En ella s'hi poden identificar les zones més crítiques, en alguns casos coincidents amb els resultats del model implementat (p. ex., Av. Tarragona i zona propera a l'Església d'Escaldes-Engordany).

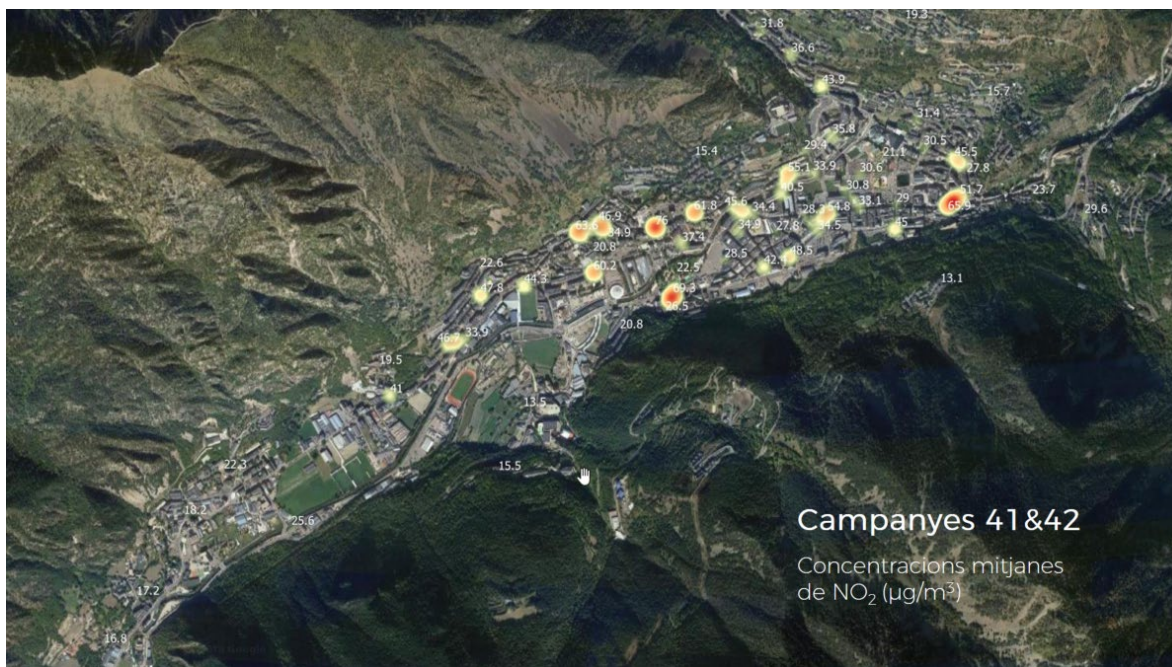


Fig. 48. Concentracions mitjanes d'NO₂ mesurades pels tubs passius

4. CONTAMINACIÓ ATMOSFÈRICA, METEOROLOGIA I TRÀNSIT

4.1 Introducció

L'objectiu d'aquest capítol consisteix en fer una primera aproximació a l'estudi de la relació entre els nivells de contaminació, la meteorologia i el trànsit a través de les mesures existents. Les dades utilitzades per aquest estudi inclouen les de les estacions automàtiques de mesura de contaminants (nivells d'immissió i dades meteorològiques) i les dels comptadors de vehicles de l'Àrea de Mobilitat.

Els anàlisis comprenen dades pel període 01/01/2017 al 07/03/2018 proporcionades per la Unitat de Medi Atmosfèric del Departament de Medi Ambient del Govern d'Andorra. Addicionalment, i únicament per l'estació de referència (942), s'ha realitzat un anàlisi paral·lel de major abast temporal que inclou dades del període 01/01/2010 fins 31/12/2017. Aquestes últimes s'han descarregat a través de la web de Qualitat de l'aire del Govern d'Andorra¹⁹.

Els anàlisis desenvolupats s'han realitzat amb RStudio²⁰ i en alguns casos s'ha fet ús del paquet d'R *Openair* (D. C. Carslaw & Ropkins, 2012), específic per l'anàlisi de dades de qualitat de l'aire.

Bona part dels resultats obtinguts s'han publicat en una aplicació web desenvolupada amb *Shiny*²¹. L'accés als resultats de cada estació automàtica es realitza a través del mapa mostrat en la Fig. 49.

¹⁹ http://www.aire.ad/data_and_statistics_home.php

²⁰ <https://www.rstudio.com/>

²¹ <https://shiny.rstudio.com/>

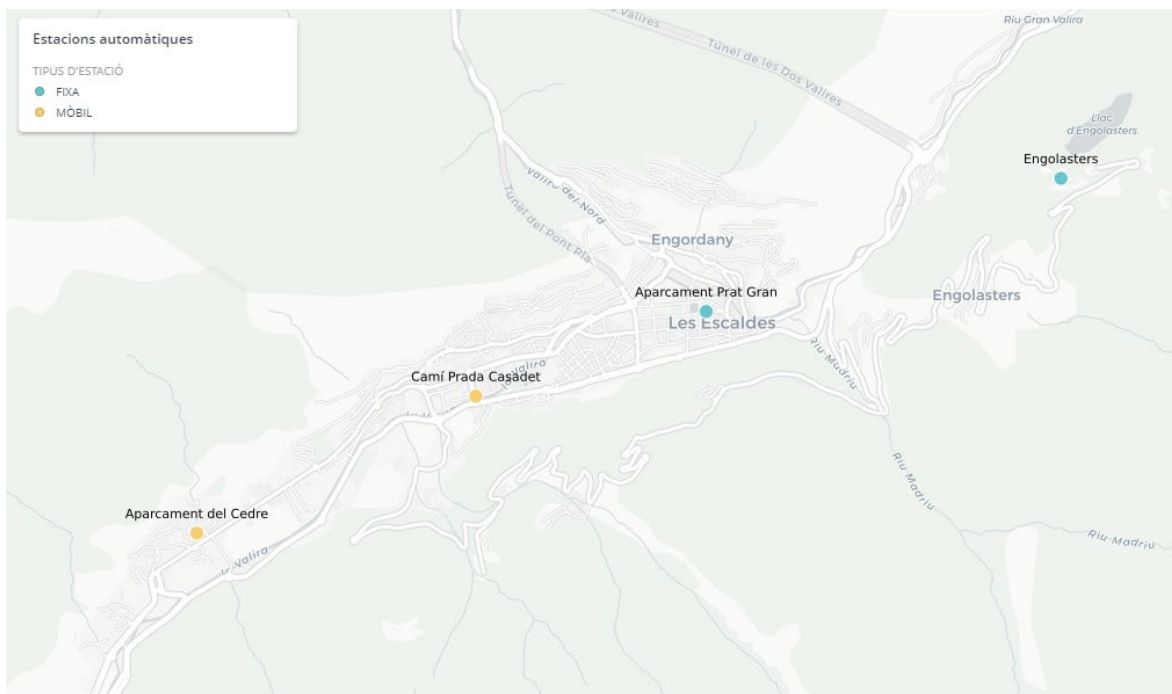


Fig. 49. Mapa d'estacions automàtiques amb accés als resultats dels anàlisis. Enllaç:
<https://obsa-andorra.carto.com/builder/454cef4e-26b9-43d4-be12-3556ce65a9ff/embed>

En les properes seccions es detalla el procés seguit en l'anàlisi realitzat i es presenten els principals resultats obtinguts.

4.2 Recopilació i construcció de la base de dades

L'anàlisi realitzat treballa amb cinc tipus de dades: mesures de contaminants, mesures de temperatura, altres dades meteorològiques, situacions sinòptiques i comptatges de vehicles. Les dades d'origen tenen formats molt diferents degut a la diversitat del seu origen. Per aquest motiu, la primera tasca ha consistit en la construcció d'una base de dades homogeneïtzant formats per facilitar els posteriors anàlisis.

A continuació es detalla la informació inclosa en la base de dades i el seu origen.

4.2.1 Mesures de contaminants

Les dades de contaminants disponibles han estat proporcionades per la Unitat de Medi Atmosfèric. La Taula 13 presenta les estacions que han aportat dades a aquest estudi, així com els contaminants mesurats i el període temporal que inclouen.

Estació	Codi	Contaminants	Escala temporal	Període temporal
Aparcament Prat Gran	942	NO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , SO ₂	15-minutal	01/01/2017 - 07/03/2018
Aparcament del Cedre	940	NO ₂ , SO ₂	15-minutal	01/01/2017 - 07/03/2018
Camí Prada Casadet	943	NO ₂	15-minutal	13/12/2017 - 30/06/2018

Taula 13. Estacions de mesura de contaminants utilitzades en l'anàlisi

Adicionalment, s'han utilitzat dades històriques que comprenen el període 01/01/2010 fins 31/12/2017 per l'estació 942, situada a l'aparcament del Prat Gran.

4.2.2 Mesures de temperatura

En la base de dades construïda s'han inclòs mesures 15-minutals de temperatura provinents de les estacions 942 (Aparcament Prat Gran) i 944 (Engolasters) situades a 1080 i 1637 metres d'altitud, respectivament. Aquestes s'utilitzen per identificar situacions en que es produeix inversió tèrmica.

4.2.3 Altres dades meteorològiques

Únicament en el cas de l'estació de referència 942 (Aparcament Prat Gran) s'ha inclòs informació meteorològica addicional en la base de dades. Concretament s'han integrat dades de precipitació i velocitat i direcció del vent pel període 2010-2017.

Aquesta informació és d'utilitat per estudiar l'efecte d'aquestes variables en els nivells d'immissió de contaminants mesurats per les estacions automàtiques.

4.2.4 Situacions sinòptiques

En l'anàlisi realitzat s'ha inclòs informació sobre la situació sinòptica d'Andorra. Aquesta determina la posició concreta dels centres d'acció i superfícies frontals en un moment determinat de temps, que permet explicar i pronosticar el temps atmosfèric d'una regió o un territori.

La situació sinòptica d'Andorra s'ha obtingut mitjançant el mètode de classificació de Jenkinson i Collison a escala diària i pel període 01/01/2017 fins el 30/11/2017. Aquesta informació ha estat proporcionada per l'Institut Pirenaico de Ecología (IPE).

Per major detall sobre el mètode de classificació emprat en aquest estudi es recomana la lectura de Llop Garau & Alomar (2012)

4.2.5 Comptatge de vehicles

Per tal d'estudiar la relació entre els vehicles que circulen pel país i els nivells de contaminants registrats per les estacions automàtiques s'han utilitzat les dades de comptatge de vehicles proporcionades per l'Àrea de Mobilitat del Govern d'Andorra. En la Secció 0 d'aquest informe es detalla la tipologia i la disponibilitat d'aquestes dades.

4.3 Anàlisi descriptiu

L'aplicació web desenvolupada²² inclou els anàlisis realitzats en les estacions mòbils de l'Aparcament del Cedre (940) i Camí Prada Casadet (943) i l'estació fixa de l'Aparcament Prat Gran (942).

La informació inicial presentada de cada una de les estacions consisteix en la representació temporal dels nivells d'immissió monitoritzats així com de l'histograma de freqüències dels diferents contaminants. Una característica interessant és que tots els gràfics que inclou l'aplicació són interactius, permetent així filtrar entre contaminants o fer zooms a períodes temporals específics.

²² <https://obsa-andorra.carto.com/builder/454cef4e-26b9-43d4-be12-3556ce65a9ff/embed>

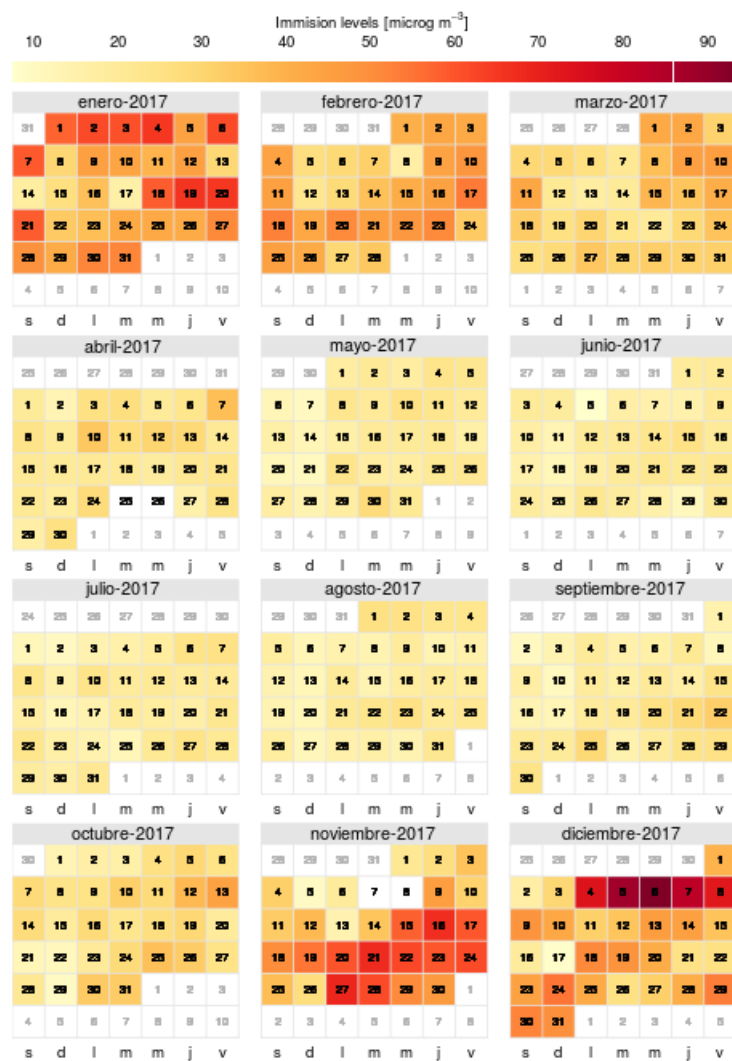
L'aplicació permet seleccionar entre escala temporal horària o diària, per tal de poder comparar els nivells dels contaminants monitoritzats amb els límits que estableix la legislació vigent. També amb aquesta finalitat, els gràfics representats inclouen els nivells normatius a Andorra establerts en el Reglament de control de la contaminació atmosfèrica²³ així com els nivells guia recomanats per la Organització Mundial de la Salut (OMS, 2006). La Taula 14 resumeix els valors límit establerts per a cada contaminant.

Contaminant	Andorra		OMS	
	Límit 1 hora	Límit 24 hores	Límit 1 hora	Límit 24 hores
SO ₂	350 µg/m ³	125 µg/m ³		20 µg/m ³
NO ₂	200 µg/m ³		200 µg/m ³	
PM ₁₀		50 µg/m ³		50 µg/m ³
PM _{2.5}		25 µg/m ³		25 µg/m ³

Taula 14. Valors límit d'immissió dels diferents contaminants

Addicionalment als gràfics de línies i histogrames, l'estació de referència (942) inclou un anàlisi de major abast temporal (2010-2017) el qual permet visualitzar el nivell d'immissió dels diferents anys i diferents contaminants representada en un calendari (veure Fig. 50).

²³ http://www.aire.ad/assets/documents/06200905_bop21017.pdf

Fig. 50. Nivells d'immissió mitjans diaris d' NO_2 durant l'any 2017

També amb dades d'aquesta mateixa estació s'han estudiat les concentracions mitjanes a diferents escales temporals dels contaminants monitoritzats (veure Fig. 51). Val a dir que, a través de l'aplicació desenvolupada, aquests resultats poden obtenir-se per anys concrets o per intervals de temps comprenent diferents anys.

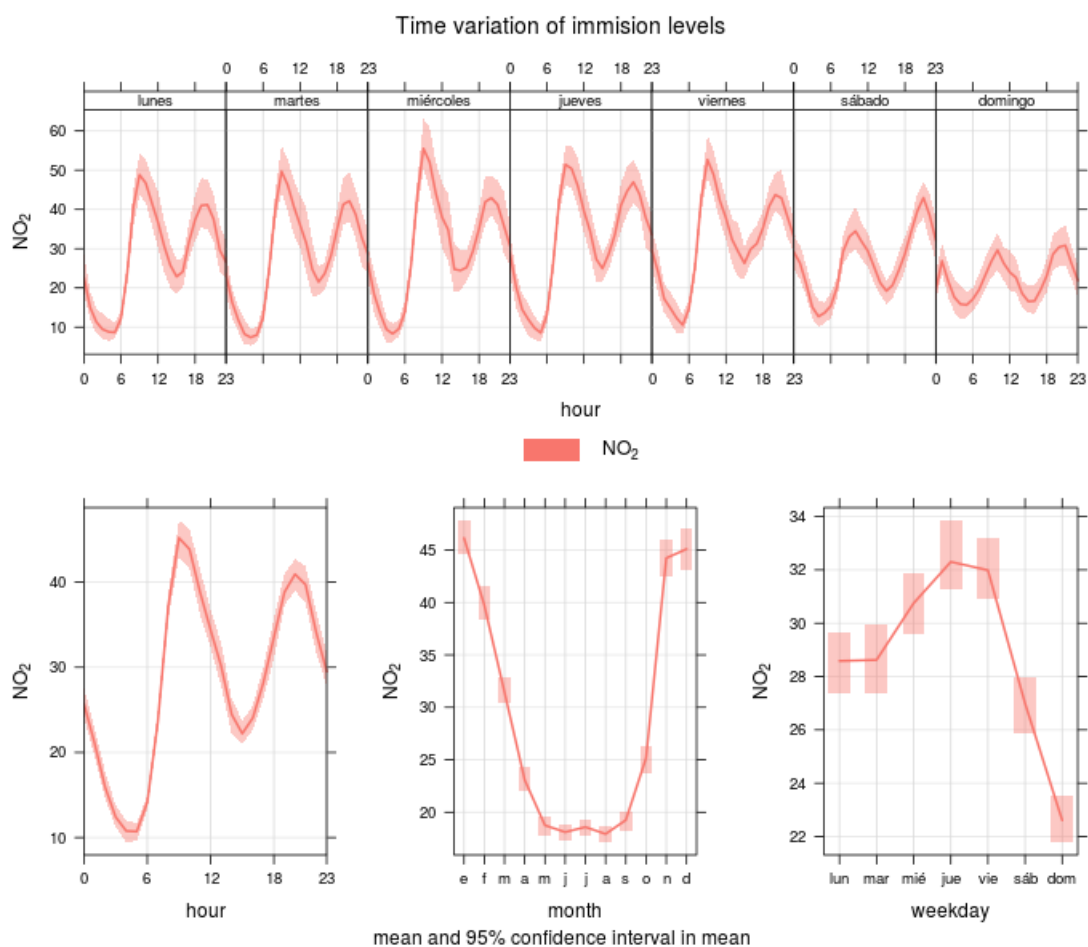


Fig. 51. Concentració d' NO_2 a diferents escales temporals durant l'any 2017

L'objectiu del present informe no consisteix en entrar en detall a descriure els valors de d'immissió monitoritzats per les estacions sinó mostrar la utilitat de l'aplicació desenvolupada com a eina exploratòria. La tasca de seguiment dels nivells de contaminació monitoritzats ja la realitza el Departament de Medi Ambient a través dels informes anuals de qualitat de l'aire.

4.4 Efecte de la inversió tèrmica

Generalment, la temperatura decreix amb l'altitud, permetent la dispersió dels contaminants a través de les corrents d'aire verticals. Les inversions tèrmiques inverteixen aquest funcionament de la troposfera, arribant fins i tot a poder anular per complet les corrents verticals dificultant la dispersió de contaminants.

En aquest estudi s'ha realitzat una primera aproximació a l'estudi de l'efecte de les inversions tèrmiques en els nivells de contaminació monitoritzats a les estacions andorranes. Amb aquesta finalitat s'han analitzat els nivells mesurats de cada contaminant en situacions d'inversió tèrmica.

Per tal d'establir els moments en que es dona inversió tèrmica s'han comparat les dades de temperatura horària de l'estació de l'Aparcament del Prat Gran (942) situada a 1080 metres d'altitud i la d'Engolasters (944) situada a 1637 metres. Cal assenyalar que, puntualment, poden donar-se situacions d'inversió tèrmica que no es detectin amb aquest criteri. La Fig. 52 mostra el nombre d'hores diàries pel període analitzat en que es dona inversió tèrmica segons el criteri establert.

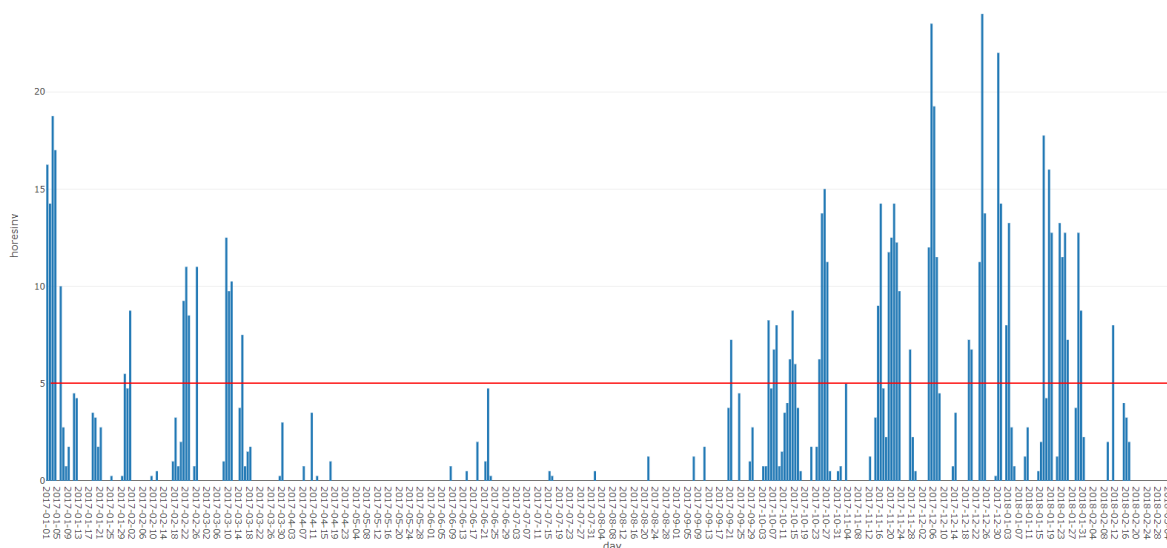


Fig. 52. Nombre d'hores diàries d'inversió tèrmica

A partir del gràfic de la Fig. 52 s'estableix el criteri que si durant un dia s'han donat més de 5 hores d'inversió tèrmica aquell es considera com un dia en que ha hagut inversió. Aquest

criteri s'incorpora per tal d'eliminar de la mostra moments en que la inversió pugui haver estat ocasionada per diferències entre irradiació incident a una estació i l'altra. Amb aquestes consideracions es fa un registre dels dies en que s'ha donat inversió tèrmica i s'identifica també la durada (en dies) d'aquesta inversió (p. ex., 1, 2, 3, 4 o 5 dies).

En la Fig. 53 es mostren els nivells màxims d'NO₂ de cada un dels dies analitzats a l'estació de l'Aparcament del Cedre (940) agrupats segons nombre de dies d'inversió tèrmica en un diagrama de caixa. Cada un dels diagrames mostra la mitjana, la mediana, els quartils i els valors atípics.

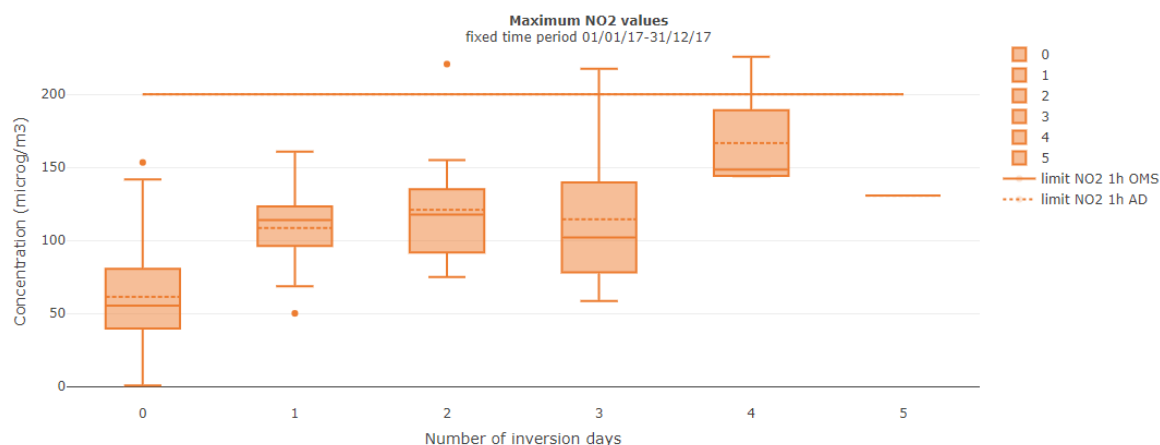


Fig. 53. Diagrama de caixa mostrant nivells màxims diaris d'NO₂ segons nombre de dies d'inversió tèrmica (Aparcament del Cedre)

En la plataforma desenvolupada s'han publicat els resultats dels anàlisis equivalents amb la resta d'estacions i per a tots els contaminants mesurats.

Els resultats observats en l'estació 940 i 942 mostren una clara tendència d'augment dels nivells màxims de contaminants a mesura que persisteix la inversió tèrmica. Fins i tot en l'estació 940 (veure Fig. 53) podem observar com tots els valors màxims mesurats amb inversions tèrmiques de quatre dies de durada estan molt propers als límits normatius. Val a dir que en el període analitzat només es dona un episodi amb cinc dies consecutius d'inversió tèrmica pel que els valors obtinguts en aquest cas no són representatius.

D'altra banda, segons els resultats obtinguts, en l'estació del Camí Prada Casadet (943) no s'observa una clara tendència marcada per la durada de la inversió tèrmica. Aquest fet pot venir donat per dos motius principals. (1) El període de mesures disponibles en aquesta estació és molt més curt, limitant-se des del 13/12/2017 al 30/06/2018. Això fa que bona part de les inversions identificades en les altres estacions no apareguin representades en aquesta. (2) Aquesta és una estació molt propera al trànsit, pel que els nivells de contaminants mesurats poden estar més condicionats pel nombre de vehicles circulant en cada moment que per les condicions meteorològiques. De fet, en el curt període analitzat es produeixen set superacions del límit horari d'NO₂ i tal com es pot observar en la Fig. 54, cap d'elles està relacionada amb un episodi d'inversió tèrmica.

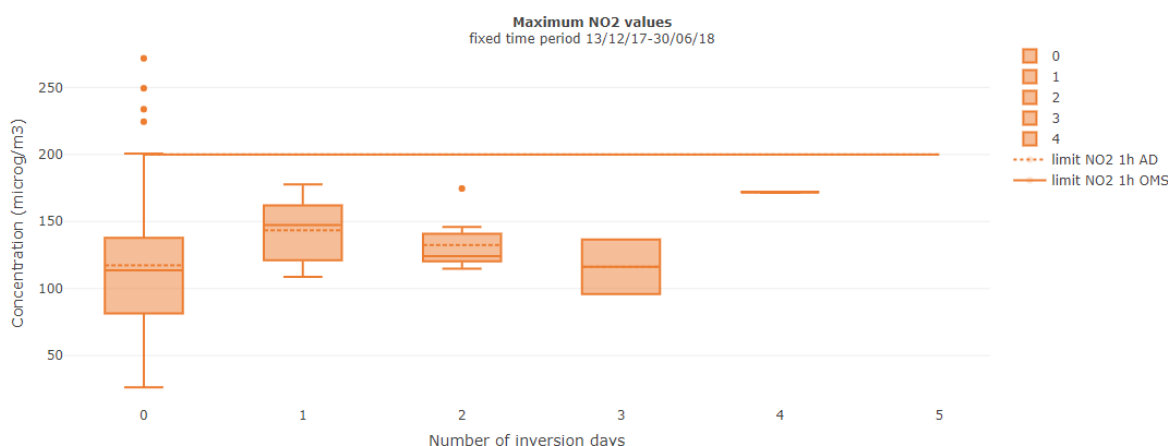


Fig. 54. Diagrama de caixa mostrant nivells màxims diaris d'NO₂ segons nombre de dies d'inversió tèrmica (Camí Prada Casadet)

Per validar la hipòtesi que els nivells de contaminació en l'estació 943 estan més condicionats pel trànsit pels episodis d'inversió tèrmica, en la Secció 4.8 s'ha estudiat la correlació entre els nivells d'immissió mesurats en aquesta estació i el nombre de vehicles circulant.

4.5 Nivells d'immissió segons situació sinòptica

Les condicions atmosfèriques en un moment determinat poden portar a diferents nivells de contaminació. Existeixen diferents mètodes per realitzar classificacions sinòptiques. Tal

com s'ha comentat anteriorment, en aquest estudi s'utilitza la classificació de Jenkinson y Collison la qual es basa en la pressió atmosfèrica en superfície.

En la Taula 15 es presenten els 27 tipus sinòptics de Jenkinson & Collison.

N, NE, E, SE, S, SW, W y NW: Adveccions pures del N, NE, E, SE, S, SW, W y NW, respectivament, constituïdes per isòbares disposades de forma rectilínia marcant fluxes de vent de les citades direccions.

AN, ANE, AE, ASE, AS, ASW, AW y ANW: Adveccions mixtes de caràcter anticiclònic del N, NE, E, SE, S, SW, W y NW, respectivament, constituïdes por isòbares amb curvatura anticiclònica marcant fluxos de vent de las citades direccions.

CN, CNE, CE, CSE, CS, CSW, CW y CNW: Adveccions mixtes de caràcter ciclònic del N, NE, E, SE, S, SW, W y NW, respectivament, constituïdes por isòbares amb curvatura ciclònica marcant fluxos de vent de las citades direccions.

A: Anticicló

C: Depressió o borrasca.

U: Camp de pressió en superfície poc definit, sense a penes gradient bàric, caracteritzat per l'absència d'isòbares.

Taula 15. Descripció bàsica dels tipus sinòptics de Jenkinson & Collison. Font
Martín-Vide et al. (2016)

La Fig. 55 mostra el nombre de dies en que es va produir inversió tèrmica en cada situació sinòptica. En aquest cas la identificació dels dies amb inversió tèrmica s'ha realitzat de la mateixa manera que en la Secció 4.4. Tal com es pot observar, la situació d'anticicló (A) és la que porta associada un major nombre de dies amb inversió tèrmica.

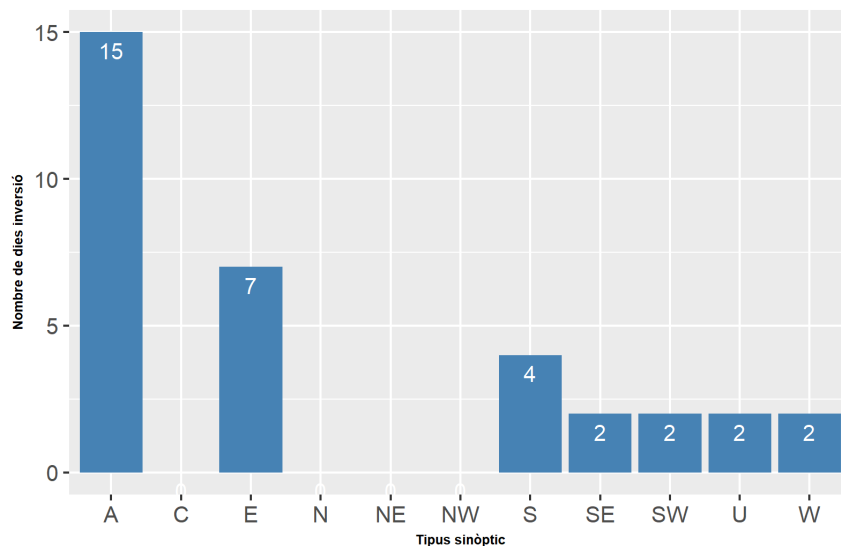


Fig. 55. Dies d'inversió tèrmica segons el tipus sinòptic durant l'any 2017 (fins 30 de novembre)

En la plataforma desenvolupada es mostren els nivells dels diferents contaminants agrupats en un diagrama de caixa segons el tipus sinòptic donat aquell dia. Per exemple, la Fig. 56 presenta els nivells màxims diaris registrats d' NO_2 a l'estació 940 agrupats segons situació sinòptica. En les dues estacions en que s'ha aplicat aquest anàlisi (940 i 942) s'observa que els valors més alts d'immissió es registren en situacions d'adveccions de Sud Oest (SW).

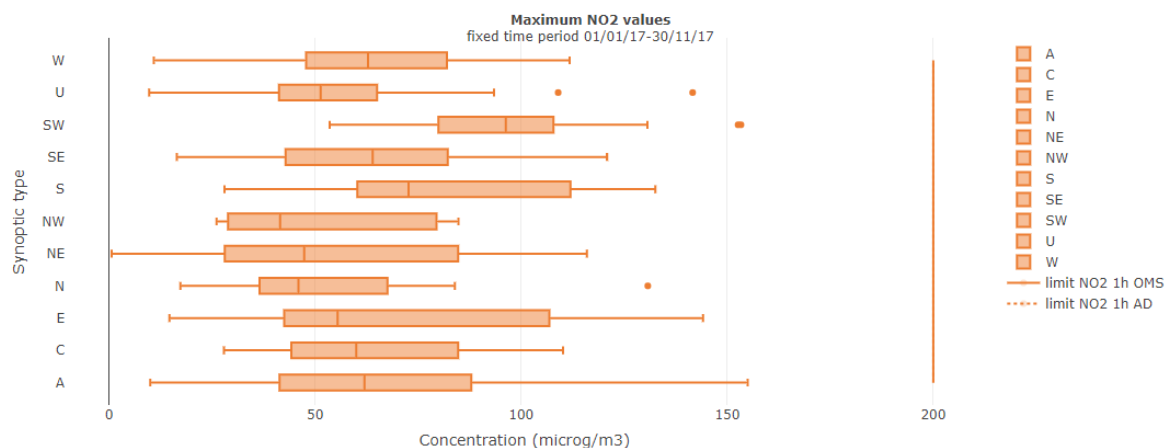


Fig. 56. Diagrama de caixa mostrant nivells màxims diaris d'NO₂ segons tipus sinòptics (Aparcament del Cedre)

Cal recordar que aquest anàlisi únicament inclou dades de tipus sinòptics des de l'01/01/2017 fins el 30/11/2017 pel que cal interpretar els resultats obtinguts amb cautela.

4.6 Correlació entre variables

Entendre com les diferents variables registrades en una estació de mesura es relacionen pot aportar informació valuosa i inclús pot arribar a ser útil per predir episodis d'alts nivells de contaminació. En aquest sentit s'han analitzat les correlacions existents entre les variables mesurades en les diferents estacions de mesura de contaminants. Per cada estació s'ha construït una matriu de correlació utilitzant la funció *corPlot* proporcionada per la llibreria *Openair* (D. C. Carslaw & Ropkins, 2012).

Tal com s'observa en la Fig. 57, la matriu de correlació mostra el grau d'associació entre variables a través del coeficient de correlació de Pearson (quan l'associació és perfecta aquest és 100).

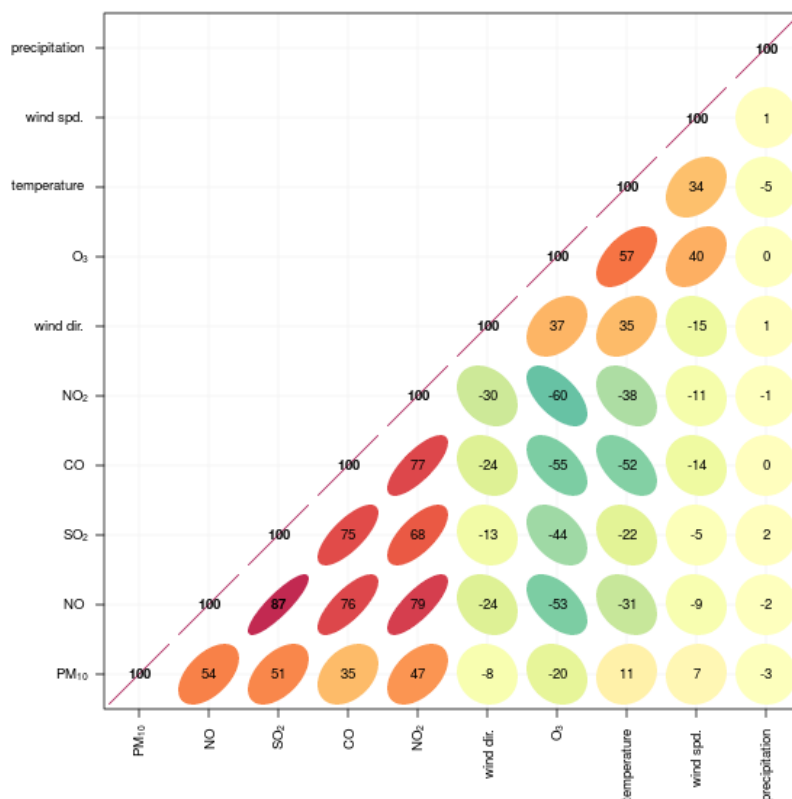


Fig. 57. Matriu de correlació mostrant la relació entre variables en l'estació 942

Dels resultats obtinguts es pot observar que els majors coeficients de correlació es donen entre SO₂, NO, NO₂ i CO mentre que l'O₃ es correlaciona negativament amb la resta de contaminants, degut a la seva reacció l'NO. Altres correlacions destacables es donen entre la temperatura, l'O₃ i la intensitat del vent.

4.7 Efecte del vent

L'efecte del vent sobre els nivells de contaminació s'ha estudiat a través de les dades d'intensitat, direcció del vent i nivells d'immissió monitoritzats en l'estació de l'Aparcament del Prat Gran (942).

L'aplicació desenvolupada permet construir la rosa dels vents i els nivells dels diferents contaminants en funció de la intensitat i direcció del vent incloent els anys des de 2010

fins 2017. La Fig. 58 mostra que, durant l'any 2017, en l'estació 942 han predominat vents de Nord-Est i Sud-Oest i que els moments amb vents suaus de Nord-Est han estat els de majors nivells de NO_2 registrat.

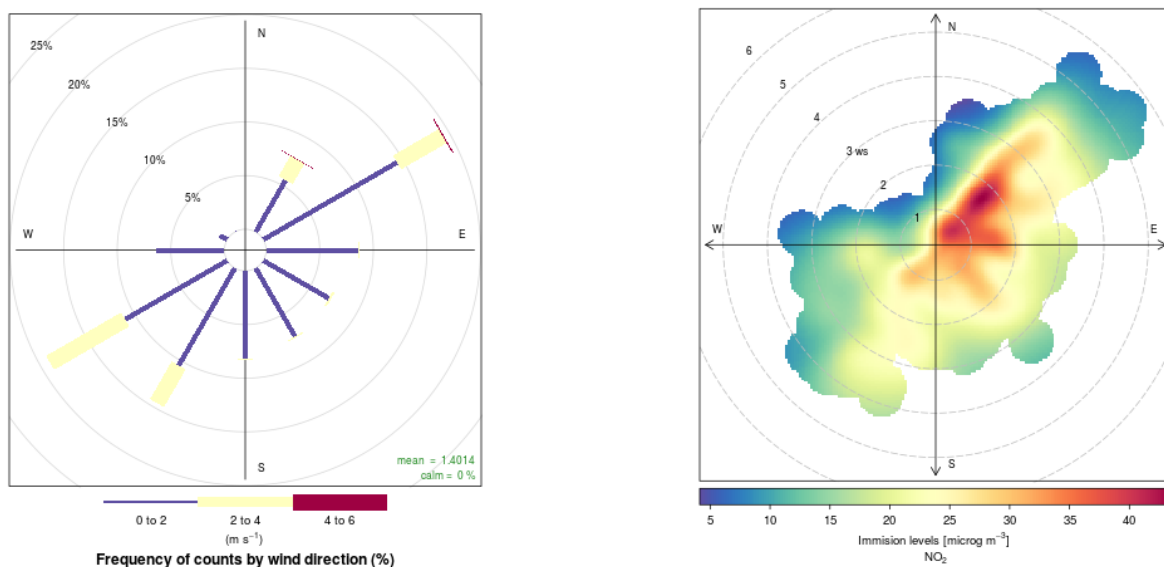


Fig. 58. Rosa dels vents i nivells d' NO_2 en funció de la intensitat i direcció del vent
(estació 942 i any 2017)

4.8 Relació entre contaminants i trànsit

En un país com Andorra, amb molt poca indústria i un pes molt petit de la producció d'energia amb energies no renovables, gran part de les emissions contaminants provenen del transport. Aquest fet s'ha estudiat en el Capítol 2 i queda constatat en la Fig. 11.

En aquest apartat s'estudia la relació entre els nivells de NO_2 mesurats a l'estació del Camí Prada Casadet (943) i el nombre de vehicles comptabilitzats per les ETDs 25, 26, 27 i 28 situades a l'Avinguda Tarragona. Per aquest anàlisi s'ha escollit l'estació 943 ja que aquesta és la més exposada al trànsit. La Fig. 59 mostra la comparativa horària entre els valors mesurats d' NO_2 i la suma dels vehicles comptabilitzats en les ETDs 25 i 26. Tot i el curt

període en que coincideixen les dos sèries, visualment es pot apreciar una associació entre ambdues.

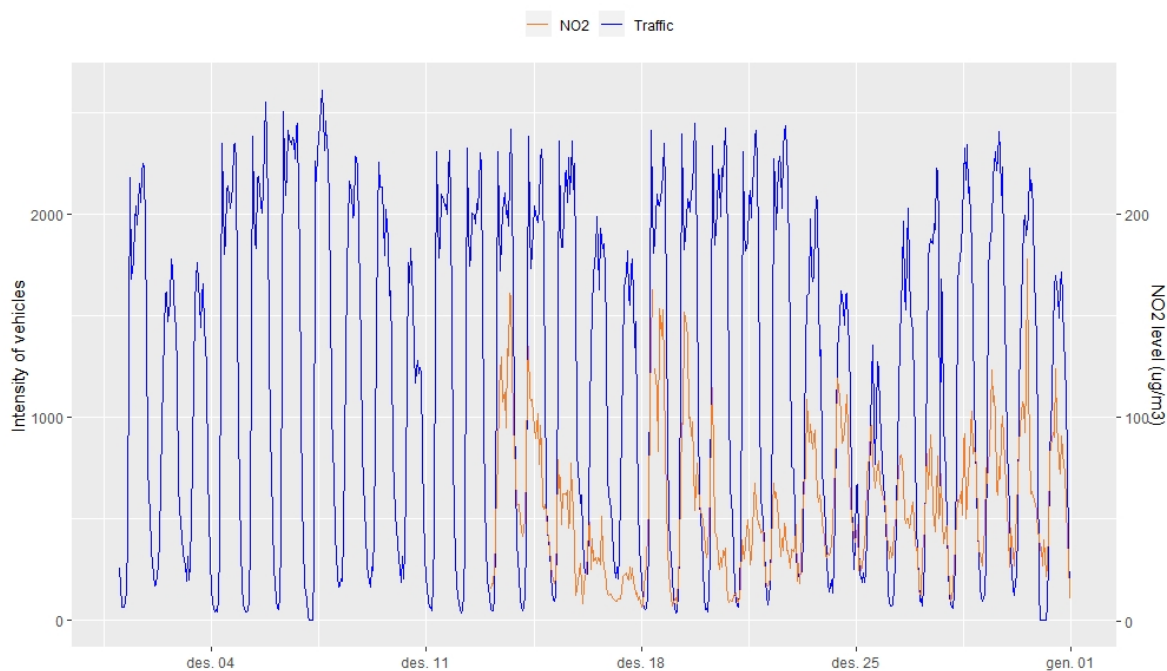


Fig. 59. Sèries horàries dels nivells d'NO₂ i comptatges de les ETDs

A través de la matriu de correlació de la Fig. 60 es quantifica el grau d'associació entre els nivells d'immissió d'NO₂ i les diferents estacions de mesura del trànsit properes. En totes elles el coeficient de correlació és superior a 0,50 i en el cas en que sumem els vehicles de les ETDs 25 i 26 el coeficient ascendeix fins a 0,57. Això significa que el 57% dels nivells observats d'NO₂ s'expliquen a través del nombre de vehicles comptabilitzats. El 43% restant caldria buscar-lo en altres factors com la meteorologia.



Fig. 60. Matriu de correlació mostrant relació entre les diferents ETDs i els nivells mesurats d'NO₂ a l'estació 943

A través d'un anàlisi de correlació creuada (veure Fig. 61) s'ha estudiat la correlació existent entre les dos sèries temporals a diferents *lags* de temps. Aquest mostra com el màxim coeficient de correlació entre ambdues sèries es dona a $t-7$, indicant que el màxim nivell de contaminació es dona una hora més tard que el màxim de trànsit.

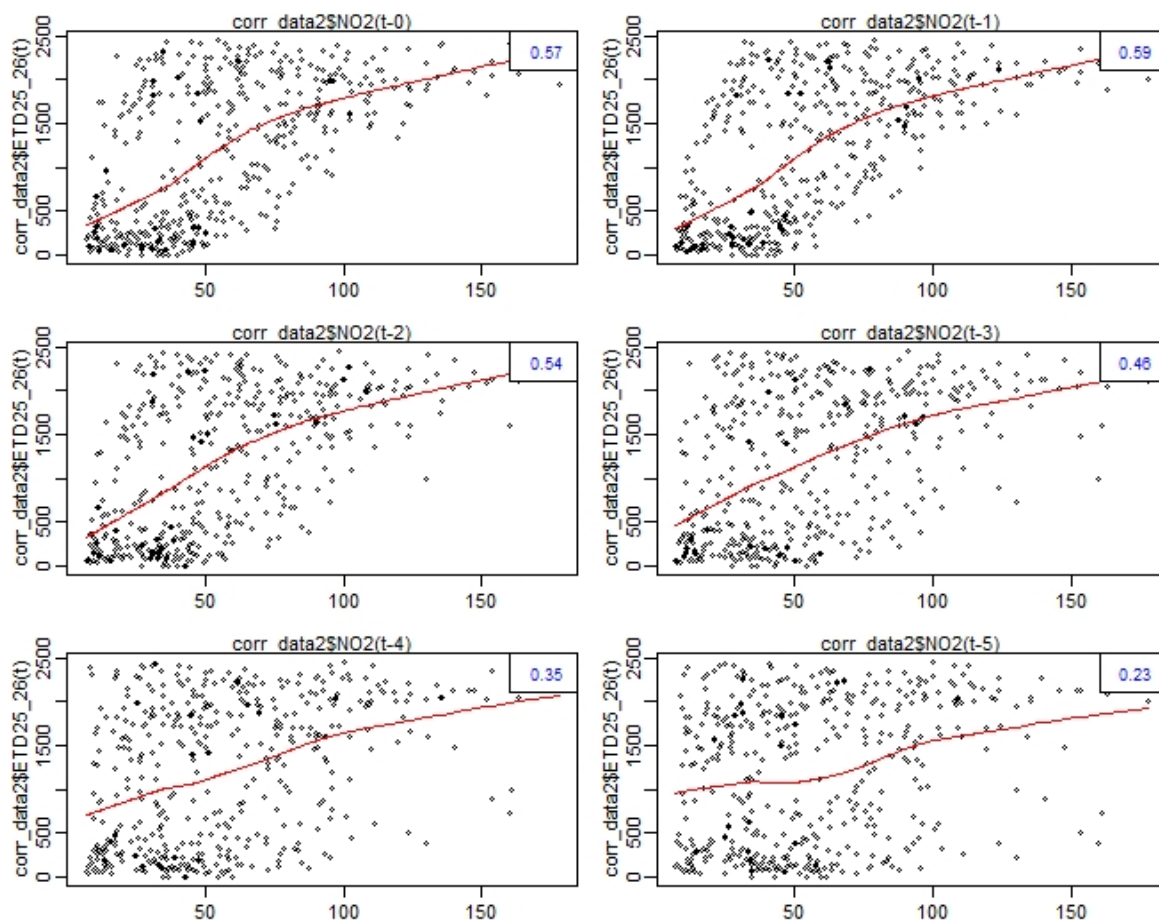


Fig. 61. Anàlisi de correlació creuada entre nivells de NO_2 i trànsit

5. CONCLUSIONS

La **caracterització de les fonts d'emissions d'Andorra la Vella i Escaldes-Engordany** ha permès realitzar un inventari que aglutina els principals contaminants atmosfèrics que s'emeten a la Vall Central. D'aquest se'n desprèn que la major part d'emissions provenen dels vehicles, en un grau substancialment superior als països del nostre entorn (veure Fig. 11 i Fig. 12 per més detall). El poc pes del sector industrial a Andorra és un dels causants d'aquest fet. Això posa de relleu que el transport és el principal sector on actuar per tal de mantenir o millorar els nivells de qualitat de l'aire de la Vall Central.

La **modelització de la dispersió dels contaminants** realitzada amb l'eina ADMS-Urban permet la construcció d'escenaris representant diferents casuístiques viscudes a la Vall Central (p. ex., dia festiu-feiner, punta de trànsit, diferents condicions meteorològiques, etc.) així com escenaris futurs (p. ex., canvis en el parc de vehicles, introducció de xarxa de calor, etc.). La modelització realitzada posa novament de manifest la importància del trànsit en els nivells de qualitat de l'aire. Els diferents escenaris construïts estimen que els nivells de qualitat de l'aire (en relació a l'NO₂) a la Vall Central es situen generalment en les bandes "Molt Bona" i "Bona". Puntualment, en condicions desfavorables de trànsit i meteorologia es pot arribar a valors situats en la banda "Moderada".

La combinació del model ADMS-Urban i els registres RNC de telefonia mòbil ha permès identificar zones amb una major coincidència entre nivells de concentració de contaminants i població. L'encreuament entre Prat de la Creu i Bonaventura Armengol, així com l'Av. del Fener prop del Carrer de la Unió són algunes de les zones amb l'índex calculat més elevat.

El model implementat ha permès quantificar l'impacte de dues mesures previstes en un futur per a millorar la qualitat de l'aire. Segons el model, la introducció de vehicles elèctrics (20% del parc l'any 2030) reduiria un 8% els nivells màxims d'NO₂ en dies amb situacions meteorològiques i de trànsit adverses (comparativa escenari C i E). D'altra banda, la introducció de la xarxa de calor tindria poca incidència global en la millora de la qualitat de l'aire (comparativa escenari C i F) però té la virtut d'actuar sobre una zona específica on puntualment s'hi presenten problemes.

El model de dispersió de contaminants implementat en aquest projecte és el primer, segons el nostre coneixement, d'aquesta tipologia construït a Andorra. Per aquest motiu, s'han identificat una sèrie de línies d'estudi que es consideren prioritàries per tal d'enriquir aquest model i en general la modelització de dispersió de contaminants al país:

- S'ha identificat la necessitat de disposar de millors dades. Principalment en tres àmbits específics:
 - Trànsit: la variable amb major pes sobre els resultats del model és la intensitat de vehicles que circulen per les diferents carreteres. Cal per tant, disposar d'un major nombre de punts de comptatge per aportar informació de zones actualment amb poques dades (especialment a les zones més cèntriques). D'altra banda, un repte en aquest sentit és disposar d'un model de mobilitat que permeti estimar la intensitat de vehicles en diferents escenaris tant actuals com futurs.
 - Meteorologia: un altre aspecte clau i alhora crític d'aquest tipus de models és la meteorologia. Disposar de dades que permetessin construir arxius meteorològics per representar aspectes claus com l'estabilitat atmosfèrica, perfils verticals de temperatura o l'alçada de la capa límit és necessari per poder millorar en la calibració i verificació del model.
 - Edificis: conèixer amb major detall el comportament energètic dels edificis i especialment els equipaments i tipus de combustible que utilitzen per calefacció seria de gran utilitat per estimar amb major precisió la quantitat i ubicació de les emissions del gasoil de calefacció.
- Una entrada important dels models de dispersió de contaminants és establir els nivells de concentració de fons (*background*). Habitualment el *background* es defineix per cada hora específica en que s'inicia la simulació basant-se en dades d'alguna estació no urbana. En el cas d'Andorra, no es disposen de mesures d'NO₂ fora de zones urbanes pel que cal estimar aquest valor.

L'anàlisi de les mesures de concentració de contaminants proporcionades per les estacions de mesura automàtiques ha permès aprofundir en l'estudi de la **relació entre nivells de contaminació, situacions meteorològiques específiques i trànsit**. La comparativa d'aquests valors amb els valors límits definits per la legislació andorrana i per la OMS, confirma que en línies generals Andorra disposa d'un nivells de qualitat de l'aire molt bons amb excepcions puntuals en els nivells d'NO₂. En aquest sentit, el domini dels vehicles dièsel en el parc de vehicles andorrà és un aspecte que no contribueix a la millora en aquest àmbit.

L'anàlisi de les dades de les estacions automàtiques confirma que les condicions meteorològiques influeixen significativament en els nivells de concentració registrats. Els anàlisis realitzats amb dades de les estacions 940 i 942 mostren una clara tendència d'augment dels nivells màxims de contaminants en períodes que persisteix la inversió tèrmica. Fins i tot, en l'estació 940 s'observa com tots els valors màxims mesurats amb inversions tèrmiques de quatre dies de durada estan molt propers als límits normatius. Estacions més exposades al trànsit com la 943 presenten uns nivells de correlació importants ($r=0,57$) amb la intensitat de vehicles.

Aquest projecte ha permès explorar l'ús de diferents eines per a l'anàlisi de dades de les estacions automàtiques. D'especial interès és la llibreria d'R *Openair*, específica per a l'anàlisi de dades de qualitat de l'aire. La possibilitat d'automatitzar processos és de gran utilitat per analitzar noves sèries de dades així com realitzar anàlisis històrics. També pot ser de gran utilitat com a eina de sensibilització aportant informació visualment atractiva a la població²⁴.

Els resultats d'aquest estudi reafirmen un fenomen ja conegut, la importància de les situacions d'inversió tèrmica en els nivells de concentració de contaminants mesurats. L'anàlisi d'episodis històrics d'alts nivells de contaminació com els realitzats per Largeron & Staquet (2016) és una línia interessant a explorar amb major profunditat.

²⁴ Exemple a <https://obsa-andorra.carto.com/builder/454cef4e-26b9-43d4-be12-3556ce65a9ff/embed>

REFERÈNCIES

- AIR Languedoc-Roussillon. (2007). *Inventaire des émissions de substances polluantes dans l'atmosphère pour l'année 2005*.
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., ... Kaufman, J. D. (2010). Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease: An Update to the Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331-2378. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d8e3e1>
- Carlaw, D., ApSimon, H., Beevers, S., Brookes, D., Carruthers, D., & Cooke, S. (2013). *Defra Phase 2 urban model evaluation*. King's College London. <https://doi.org/N/A>
- Carlaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). Openair - An r package for air quality data analysis. *Environmental Modelling and Software*, 27-28, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.008>
- CERC. (2017). *ADMS-Urban User Guide. Urban Air Quality Management System Version 4.1*. Cambridge. Retrieved from <http://www.cerc.co.uk>
- Daly, H., & Ó Gallachóir, B. P. (2011). Modelling private car energy demand using a technological car stock model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(2), 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.08.009>
- Departament d'Estadística. (2018). Importacions de carburants (Litres). Retrieved July 6, 2018, from <https://www.estadistica.ad/>
- Departament d'Indústria. (2016). Ministeri d'Economia i Territori. Govern d'Andorra.
- DGT. (2018). Parque de vehículos - Estadísticas. Retrieved March 23, 2018, from <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas/>
- EEA. (2018). *Air quality in Europe — 2018 report*. EEA Report No 12/2018. <https://doi.org/10.2800/62459>
- Fraser, A., Loader, A., Pang, Y., Stewart, R., Xiao, X., & Whitehead, C. (2016). *Services to develop an EU Air Quality Index (EU AQI Final report)*.
- Gehring, U., Wijga, A. H., Brauer, M., Fischer, P., de Jongste, J. C., Kerkhof, M., ... Brunekreef, B. (2010). Traffic-related Air Pollution and the Development of Asthma and Allergies during the First 8 Years of Life. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 181(6), 596-603. <https://doi.org/10.1164/rccm.200906-0858OC>
- Giles-Corti, B., Kelty, S. F., Zubrick, S. R., & Villanueva, K. P. (2009). Encouraging Walking for Transport and Physical Activity in Children and Adolescents. *Sports Medicine*, 39(12), 995-1009. <https://doi.org/10.2165/11319620-000000000-00000>

- Govern d'Andorra. (2012). Enquesta de pressupostos familiars 2005-2009.
- Govern d'Andorra. (2013). *Inventari de les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle (GEH) d'Andorra*.
- Govern d'Andorra. (2015). *Contributions prévues déterminées au niveau national (CPDN) de l'Andorre*.
- Govern d'Andorra. (2017a). *Estratègia del medi atmosfèric 2017 - 2030*.
- Govern d'Andorra. (2017b). *La qualitat de l'aire a Andorra 2017*.
- Govern d'Andorra. (2018a). Mapa d'intensitat mitjana diària. Retrieved November 10, 2018, from <https://www.mobilitat.ad/ca/temes-d-interes>
- Govern d'Andorra. (2018b). Servei de meteorologia - Climatologia. Retrieved March 20, 2018, from <http://meteo.ad/climatologia>
- Hickman, J., Hassel, D., Joumard, R., Samaras, Z., & Sorenson, S. (1999). Methodology for calculating transport emissions and energy consumption. *Transportation Research Board*.
- JRC. (2018). Number of degree days. Retrieved August 3, 2018, from <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- Largerón, Y., & Staquet, C. (2016). Persistent inversion dynamics and wintertime PM10air pollution in Alpine valleys. *Atmospheric Environment*, 135, 92-108. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.045>
- Llop Garau, J., & Alomar, G. (2012). Clasificación sinóptica automática de Jenkinson y Collison para los días de precipitación mayor o igual a 200 mm en la isla de Mallorca. *Territoris*, 8, 143-152.
- Martín-Vide, J., Carmen, M., García, M., Artola, V. M., Climatología, G. De, & Barcelona, U. De. (2016). Los tipos sinópticos de Jenkinson & Collison y la intensidad de la isla de calor barcelonesa. In *X Congreso Internacional AEC: Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio*.
- Miquel, C., Armengol, J.-L., Dobarro, J., & Natàlia, R. (2014). *Premier rapport bisannuel de l'Andorre a la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. Govern d'Andorra, Andorra la Vella.
- Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic. (2016). *Deuxième Rapport Bisannuel à la*

Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.

- OMS. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. Resumen de evaluación de riesgos.*
- 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 sostenible. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*. Retrieved from <http://www.tdx.cat/handle/10803/460913>
- Travesset-Baro, O., Gallachóir, B. P. Ó., Jover, E., & Rosas-Casals, M. (2016). Transport energy demand in Andorra. Assessing private car futures through sensitivity and scenario analysis. *Energy Policy*, 96, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.05.041>
- Velo, E. (2005). *Enginyeria tèrmica i medi ambient*. Barcelona.
- Volk, H. E., Lurmann, F., Penfold, B., Hertz-Picciotto, I., & McConnell, R. (2013). Traffic-Related Air Pollution, Particulate Matter, and Autism. *JAMA Psychiatry*, 70(1), 71. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2013.266>
- Williams, M. (2014). A practical guide to dispersion modelling using ADMS-Urban and ADMS-Roads. In *ADMS-Urban & ADMS-Roads User Group Meeting*.
- Williams, M. (2018). Model verification - methods and tips. In *ADMS-Urban & ADMS-Roads User Group Meeting*.