

Informe final

Modelització per a l'estudi de capacitat màxima de la xarxa viària d'Andorra

Equip de treball

Nil de Celis	Tècnic d'Andorra Recerca + Innovació
Oriol Travesset	Coordinador de l'eix Sostenibilitat d'Andorra Recerca + Innovació
Raül Vinyes Raso	Matemàtic, Ingénieur des Ponts, Enginyer de Camins



Aquesta obra està subjecta a una llicència de [Reconeixement-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Resum

El treball presentat en aquest informe estudia la saturació de la xarxa viària del Principat d'Andorra en l'actualitat i en diferents escenaris futurs d'evolució de la demanda i incorporació de noves infraestructures. Els resultats obtinguts es basen en el model nacional de mobilitat d'Andorra, del qual se'n detalla la metodologia emprada pel seu desenvolupament i implementació.

L'objectiu de les modelitzacions presentades en aquest estudi de caire nacional és donar suport als estudis de càrrega màxima parroquial establerts en la disposició addicional quarta de la Llei 32/2022. A més, representen un punt de partida com a eina d'ajuda a la presa de decisions i la priorització i optimització en l'ús dels recursos públics. Finalment, també contribueixen a enriquir el debat i la participació ciutadana en el procés d'adopció d'una mobilitat sostenible.

Sumari

1.	Introducció	5
1.1	El model nacional de mobilitat d'Andorra.....	5
1.2	Suport als estudis de càrrega màxima parroquial	5
2.	Metodologia.....	7
2.1	Construcció del model nacional de mobilitat d'Andorra.....	7
2.1.1	Aspectes generals de la modelització	7
2.1.2	Xarxa viària i zonificació	8
2.1.3	Generació i distribució dels viatges	11
2.1.4	Repartiment modal.....	14
2.1.5	Escalat de les matrius OD	16
2.1.6	Calibratge i validació del model	18
2.2	Escenaris analitzats.....	20
2.2.1	Escenari Actual.....	21
2.2.2	Escenari Desviació de la Massana.....	22
2.2.3	Escenari Creixement urbanístic accentuat.....	22
2.2.4	Escenari Límit guia tècnica.....	22
2.3	Indicadors d'avaluació dels escenaris.....	22
3.	Resultats	24
3.1	Escenari Actual	24
3.2	Escenari Desviació de la Massana	25
3.3	Escenari Creixement urbanístic accentuat.....	25
3.4	Escenari Límit guia tècnica	26
3.5	Resum dels resultats nacionals	26
	Referències.....	27

1. Introducció

1.1 El model nacional de mobilitat d'Andorra

La Fundació privada del sector públic Andorra Recerca i Innovació treballa des de l'any 2019 en la construcció i el manteniment del model nacional de mobilitat d'Andorra¹ enfocat a realitzar simulacions de trànsit, tant a escala macro com micro. En línia amb la missió de la Fundació, el model està a disposició de les diferents administracions i habitants del país per tal de donar suport a la presa de decisions en polítiques de mobilitat sostenible. S'espera que a curt termini es converteixi en l'eina de referència de l'Àrea de Mobilitat del Govern d'Andorra.

A banda de la seva vocació pública, un diferencial remarcable d'aquest model — respecte a d'altres que tenen finalitats similars— és que la generació i distribució de viatges s'implementa mitjançant les dades geolocalitzades de telefonia mòbil que proporciona Andorra Telecom (patró de la Fundació), a partir de les quals s'obtenen les matrius de viatges origen-destí (OD).

L'ús de dades de telefonia mòbil aporta una sèrie d'avantatges en la modelització: permet disposar de mostres més representatives, captura viatges de menor rellevància sovint omesos en les enquestes i incrementa la resolució espacial i temporal. Cal remarcar que Andorra Telecom disposa del 100% de la quota de mercat a Andorra, fet que aporta una gran qualitat a la mostra pel que fa a representativitat i biaix. No obstant això, l'ús d'aquestes dades també comporta desafiaments i requereix d'un tractament especial per garantir la privacitat dels usuaris.

El model nacional de mobilitat incorpora en detall la principal infraestructura viària del país i permet, a dia d'avui, la modelització de l'hora punta d'un dia laborable. Cal remarcar que aquest escenari ha estat calibrat i validat amb dades de 52 detectors de vehicles fixes i 33 de mòbils (més detall en la secció 2.1.5).

1.2 Suport als estudis de càrrega màxima parroquial

La disposició addicional quarta de la Llei 32/2022² estableix que, en el termini màxim d'un any a partir de la seva entrada en vigor, els comuns han d'elaborar un estudi de capacitat de càrrega màxima de les seves parròquies respectives. En aquesta línia, i en compliment del Decret 428/2022³, el Govern d'Andorra aprovà el 15 de febrer de

¹ Més informació a <https://ari.ad/projectes/model-nacional-mobilitat>

² Llei completa a https://www.bopa.ad/Documents/Detall?doc=CGL20220928_10_55_15

³ Decret complet a https://www.bopa.ad/Documents/Detall?doc=GD20221027_11_31_57

2023 la publicació de la guia tècnica⁴ destinada a establir els estàndards que han de complir els estudis de càrrega màxima parroquial. Aquesta guia, juntament amb les taules de treball coordinades per Govern, han de garantir la coherència entre els estudis de les diferents parròquies des de la fase inicial de la seva confecció.

En l'àmbit de la mobilitat, la guia tècnica estableix els criteris per estudiar "La capacitat màxima de la xarxa viària que accedeix a la parròquia i que hi discorre, tant de caràcter general com secundari, per conservar un nivell de servei que no arribi a situacions habituals de congestió diàries ni setmanals". Defineix que cada parròquia haurà de modelitzar la incidència del seu creixement poblacional i la mobilitat de la seva xarxa local sobre la xarxa viària de caràcter general. Per últim, estableix com a factor limitant, que no es podrà empitjorar l'escenari actual definit pel Pla director de la mobilitat 2030 (Govern d'Andorra, 2022), com tampoc superar els índexs de saturació⁵ establerts per als trams o punts de la xarxa susceptibles de suportar actualment retencions (indicats en la guia).

Amb l'objectiu d'obtenir resultats concloents i aplicables, des d'Andorra Recerca + Innovació es planteja homogeneïtzar els estudis realitzats a les diferents parròquies i un marc de treball comú basat en el model nacional de mobilitat d'Andorra (veure secció 1.1) i els increments de demanda futura estimats segons els creixements urbanístics previstos en les diferents parròquies. Aquest marc pretén aportar la visió de conjunt necessària per estudiar la capacitat de la xarxa, entenent que la mobilitat a cada parròquia també està influenciada pels canvis a la resta del territori.

Aquest informe presenta en detall la metodologia utilitzada i recull els principals resultats obtinguts de la modelització.

⁴ Edicte i guia completa a https://www.bopa.ad/bopa/035030/Pagines/GV20230227_13_37_15.aspx

⁵ Segons la guia, s'entén per índex de saturació la quantitat resultant de dividir la intensitat de trànsit per la capacitat màxima de la carretera

2. Metodologia

El marc de treball plantejat es basa en la modelització macroscòpica de la mobilitat d'Andorra, la implementació de diferents escenaris, i la posterior anàlisi i comparativa dels resultats obtinguts en seccions i nodes de referència de la xarxa viària nacional.

En aquesta secció s'explica en detall la construcció del model nacional de mobilitat i es presenten els escenaris analitzats així com les seccions i nodes de referència considerats.

2.1 Construcció del model nacional de mobilitat d'Andorra

Aquesta secció inclou les diferents etapes, metodologies i hipòtesis que s'han emprat per construir el model de mobilitat nacional de mobilitat d'Andorra.

2.1.1 Aspectes generals de la modelització

Des d'Andorra Recerca + Innovació es va identificar Aimsun Next⁶ com l'eina de modelització idònia per construir el model, no només per les seves especificacions tècniques sinó també per la fórmula de col·laboració proposada pels propis desenvolupadors del software. Aimsun Next és una aplicació totalment integrada que fusiona, en un únic software, la modelització de la demanda de viatges, les funcionalitats macroscòpiques, la simulació mesoscòpica i la microsimulació. La col·laboració amb l'equip d'Aimsun en el marc de l'Andorra Living Lab⁷ complementa els coneixements de l'equip d'Andorra Recerca + Innovació, a més d'aportar rigor al model implementat i a les seves actualitzacions.

L'aplicació del model en el present estudi s'enfoca a la realització de modelitzacions macroscòpiques representant el pic de trànsit d'un dia feiner (de 7h a 10h). La principal variable de sortida del model utilitzada com a comparativa entre els escenaris és la intensitat (en veh/h) en les diferents seccions i nodes de la xarxa, a partir de la qual se'n poden obtenir els índexs de saturació respectius.

El model construït parteix de l'estructura general del model clàssic de quatre etapes (Ortúzar & Willumsen, 2011). S'apliquen adaptacions puntuals sobre aquest model per tal d'extreure el màxim potencial a les dades de partida utilitzades (veure Figura 1). La modelització s'inicia amb la caracterització de la xarxa viària, la zonificació i la recopilació de les dades per al calibratge i validació del model (comptador de vehicles). A continuació s'ha implementat el model de generació i distribució de viatges

⁶ Més informació a <https://www.aimsun.com/aimsun-next/>

⁷ Veure <https://andorralivinglab.ad/> secció "What people says"

mitjançant les dades geo-localitzades de telefonia mòbil proporcionades per Andorra Telecom a partir de les quals s'obtenen les matrius de viatges origen-destí (OD). L'ús d'aquest tipus de dades amb una alta resolució espacial permet, a diferència del model clàssic de quatre etapes, agrupar les fases de generació i distribució dels viatges. Seguidament es modelitza el mode de transport escollit (repartiment modal) i, finalment, l'assignació de les rutes a seguir pels diferents vehicles.

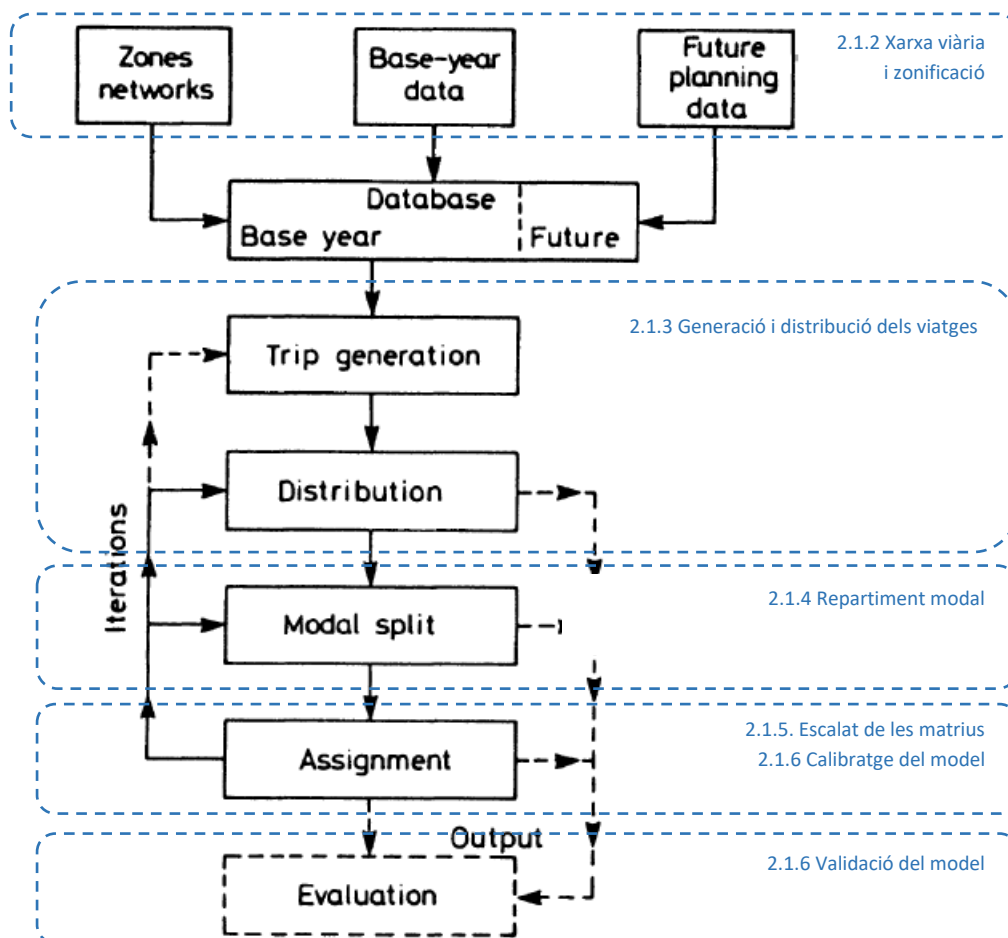


Figura 1. Model clàssic de quatre etapes. Font: Ortúzar & Willumsen (2011)

2.1.2 Xarxa viària i zonificació

La caracterització de la xarxa viària d'Andorra parteix de les dades lliures d'*OpenStreetMap*⁸. S'ha aplicat una revisió profunda sobre la geometria importada així com en les característiques de les diferents vies (nom i tipus de via, nombre de carrils, sentits, girs prohibits, prioritat en interseccions, stops, límits de velocitat, passos de vianants i semàfors). Els noms i assignacions de tipus de via s'han realitzat

⁸ Més informació a <https://www.openstreetmap.org/>

principalment basant-se en el mapa de carreteres⁹ definit a la Llei 18/2016¹⁰, de designació de carreteres i gestió de la xarxa viària. La Taula 1 presenta els tipus de vies considerades.

Tipus de via	Descripció
<i>Primary</i> - interurbana	Carreteres generals (Llei 18/2016)
<i>Primary</i> - suburbana	Carreteres generals en el seu pas per zones urbanes
<i>Secondary</i>	Carreteres secundàries + xarxa bàsica (Llei 18/2016)
<i>Tertiary</i>	Altres vies urbanes
<i>Residential</i>	Zones residencials

Taula 1. Tipus de vies del model

2.1.2.1 Capacitats de les vies

La capacitat d'una via influeix en la densitat de vehicles i el seu punt de congestió, impactant, entre d'altres, la velocitat i el temps de trajecte. És per això que és essencial definir amb cura la capacitat de cada tipus de via.

Al model, prenent com a punt de partida les proposades pel National Research Council (2000), s'han definit quatre nivells de capacitat generals:

- **Vies interurbanes** (carreteres generals entre nuclis urbans): 1100 veh/h (1 carril), 2100 veh/h (2 carrils).
- **Vies suburbanes** (carreteres generals al seu pas per nuclis urbans): 860 veh/h (1 carril), 1650 veh/h (2 carrils).
- **Vies urbanes** (carrers dels nuclis urbans): 790 veh/h (1 carril).
- **Altres** (cap de les anteriors): 840 veh/h (1 carril).

Com es recull més endavant, s'ha ajustat la capacitat d'algunes seccions específiques per tal de reflectir millor el seu comportament real.

D'altra banda, en les seccions amb comptadors de vehicles s'han avaluat els volums màxims per intervals de 10 i 15 min. A partir d'aquesta anàlisi s'aprecia que en certes seccions on es passa de dos carrils a un sol carril, els volums màxims superen els definits prèviament. Per aquest motiu s'han modificat les capacitats per seccions similars al cas donat. En aquests casos, es proposa el següent valor de capacitat:

- **Vies interurbanes on la via passa de dos carrils a un carril:** 1690 veh/h (1 carril).

⁹ Disponible a https://www.cartografia.ad/images/stories/cartografia/Mapa_Carreteres_Llei2016.pdf

¹⁰ Llei completa a https://www.bopa.ad/Documents/Detall?doc=CGL20161219_11_39_06

2.1.2.2 Senyalització semafòrica

La senyalització semafòrica inclou les pròpies ubicacions dels semàfors així com la regulació de les diferents cruïlles. Aquesta informació ha estat proporcionada per l'empresa AERCO, l'integrador de la xarxa.

La regulació ha estat introduïda en el model a partir dels diagrames de fase corresponents. Val a dir que aquesta no té influència en la modelització macro presentada en aquest estudi però sí quan es treballa a escala de microsimulació.

2.1.2.3 Zonificació

Com a pas previ imprescindible a la generació de les matrius origen-destí s'ha realitzat la zonificació del país en àrees de generació i atracció de viatges. Tal com es mostra en la Figura 2, s'han definit 61 zones aglutinant en la major part dels casos zones urbanes però també espais d'afluència de viatgers com estacions d'esquí i les fronteres catalana i occitana. Cada una de les zones del model té un centroid associat i connectat a la xarxa viària. Aquests actuen com a punts generadors i atractors de viatges representant els orígens i destins de les matrius encarregades de quantificar la demanda.

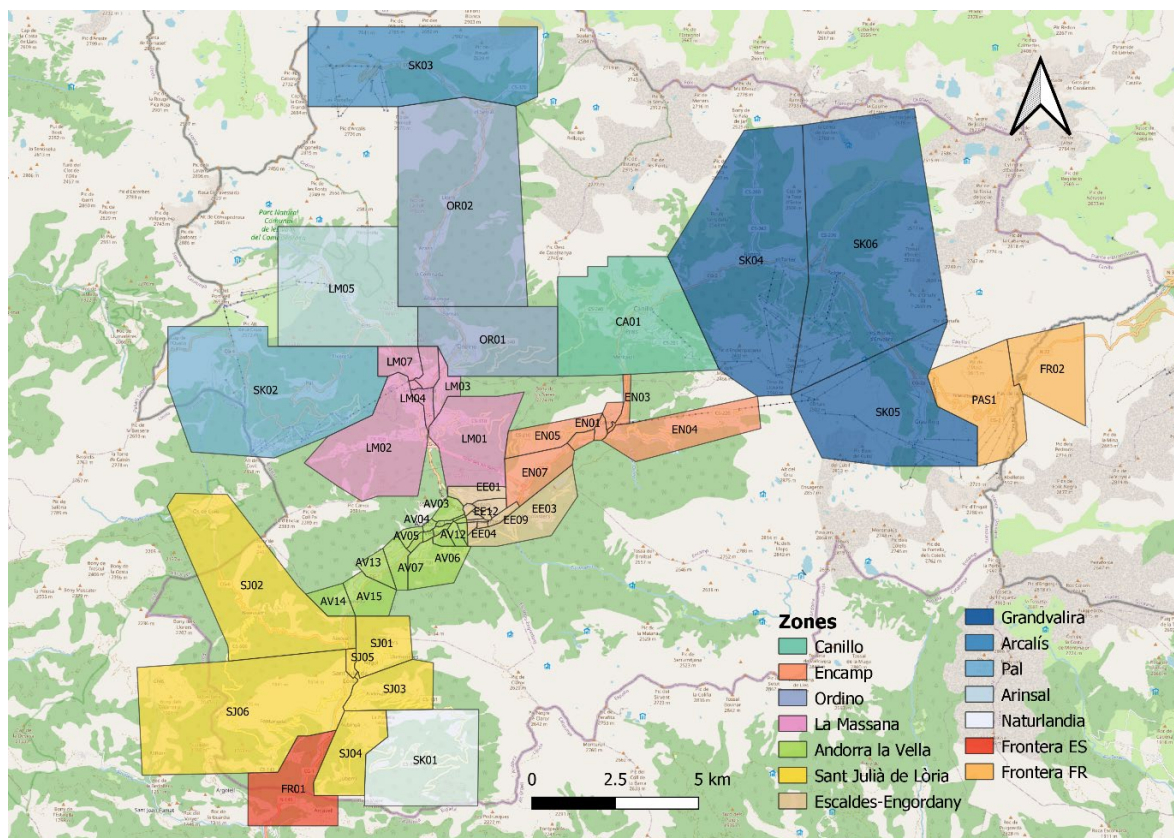


Figura 2. Zonificació del model nacional de mobilitat d'Andorra

La zonificació s'ha realitzat segons criteri d'expert, tenint en compte la realitat andorrana i les característiques de les dades d'origen. Les dades de telefonia mòbil d'Andorra Telecom són la principal font per generar les matrius origen-destí del model. Tenint en compte la seva precisió, i també la densitat de població, s'han definit zones més petites en les àrees urbanes. Andorra la Vella i Escaldes-Engordany s'han segregat en múltiples zones permetent així analitzar fluxos a escala de parròquia. La Figura 3 mostra el detall de la zonificació del model a la Vall Central.

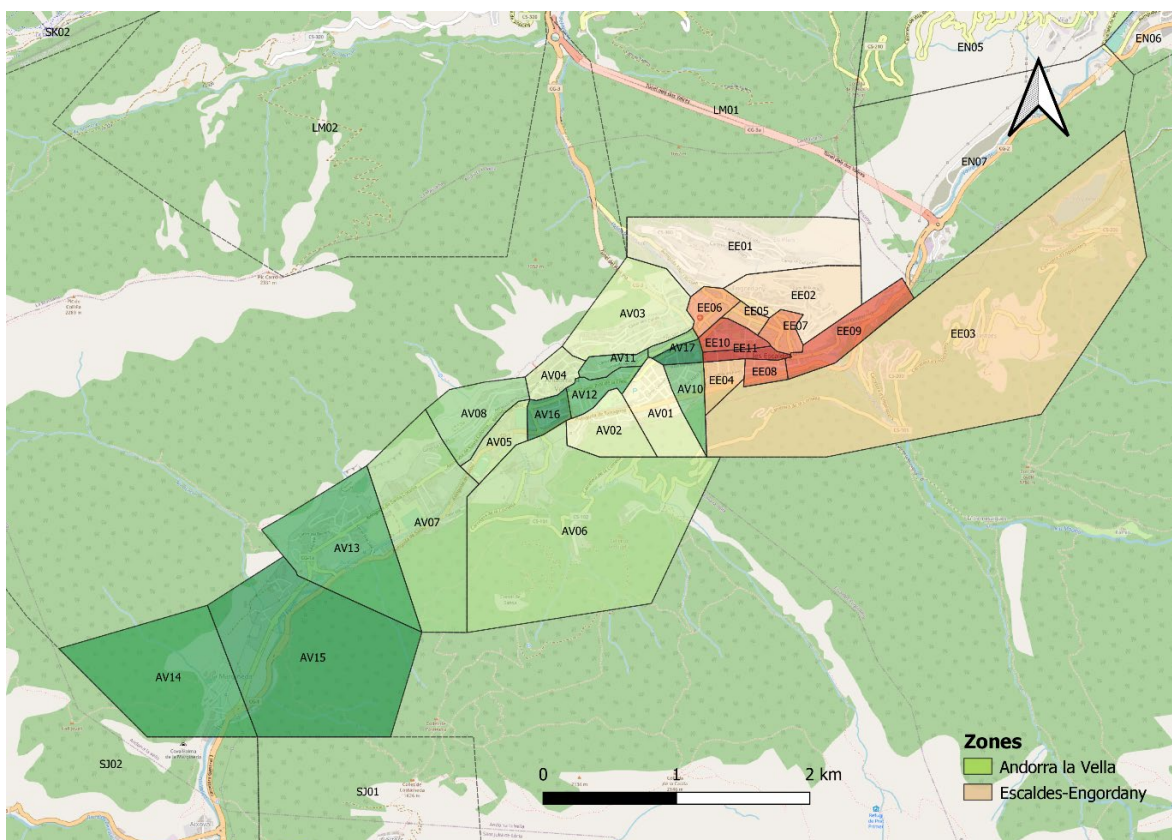


Figura 3. Detall de la zonificació del model a la Vall Central

2.1.3 Generació i distribució dels viatges

En el model nacional de mobilitat d'Andorra la generació i distribució dels viatges es modelitzen mitjançant dades de telefonia mòbil. Aquesta fase divergeix de forma substancial del model clàssic de quatre etapes que tradicionalment modelitza la generació i la distribució en etapes independents. Les fonts de dades tradicionals utilitzades en la construcció de models de mobilitat es basen principalment en estadístiques oficials, informació d'usos del sòl i en enquestes domiciliàries de mobilitat. Precisament, les enquestes són una de les principals debilitats dels models degut al biaix que introdueixen en la mostra, l'omissió de viatges, la manca d'actualització de les dades o la falta d'informació de dies o horaris atípics (Gutiérrez Puebla et al., 2019).

Les dades geo-localitzades provinents de la telefonia mòbil aporten una sèrie d'avantatges en aquesta fase de la modelització permetent disposar de mostres més representatives, capturar viatges de menor rellevància sovint omesos en les enquestes i incrementar la resolució espacial i temporal. Cal remarcar que Andorra Telecom disposa del 100% de la quota de mercat a Andorra fet que aporta una gran qualitat a la mostra en quant a representativitat i biaix.

El model utilitza els registres RNC (*Radio Network Controller*) generats per la xarxa d'Andorra Telecom. Els RNCs aglutinen l'activitat que realitzen els usuaris connectats a la xarxa de telefonia mòbil quan aquests estan fent ús d'algun servei (i. e. trucades, missatges, ús de dades) a més de la informació sobre els canvis de cel·la realitzats. Aquests registres inclouen, entre d'altres, els següents camps d'informació: IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*), MCC (*Mobile Country Code*), MNC (*Mobile Network Code*), DateTime i ubicació (latitud, longitud). La geo-localització s'obté a través de triangulació a partir de les antenes més pròximes amb un marge d'error d'uns 50 metres en zones urbanes i fins als 150 metres en àrees no urbanes¹¹ (veure Figura 4).

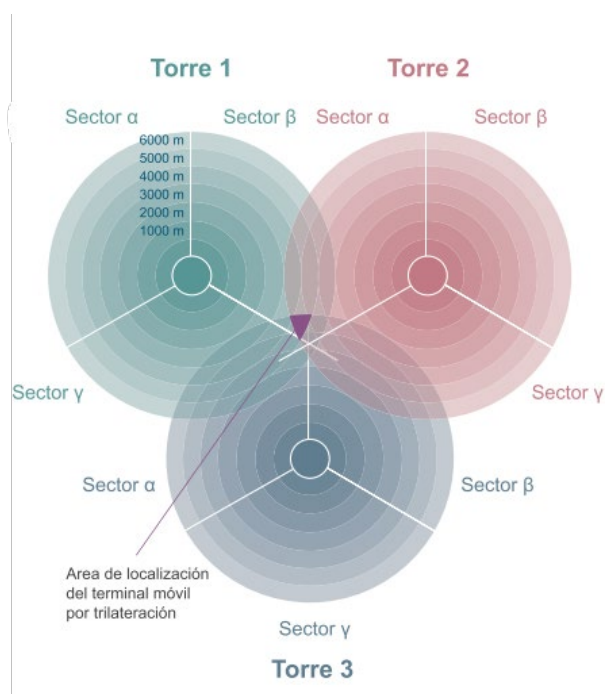


Figura 4. Procés de geolocalització obtingut mitjançant triangulació. Font: Gutiérrez Puebla et al. (2019)

Els registres RNC son generats per Andorra Telecom i enviats a una base de dades a través de la qual es realitza l'anàlisi que té per objectiu l'obtenció de les matrius OD a utilitzar en el model. Seguint les recomanacions d'Andorra Telecom, la mostra de dades

¹¹ Comunicació personal d'Andorra Telecom

utilitzada es limita a les dades 4G per presentar millors precisions pel que fa a geolocalització. A continuació es resumeix el procés d'obtenció de les matrius.

- 1) **Preparació de les dades i selecció del període temporal.** En primer lloc, es realitza una neteja de registres i camps innecessaris. A continuació es filtra el període de temps inclòs en l'anàlisi per treballar, a partir d'aquest moment, amb el mínim volum de dades imprescindible.
- 2) **Selecció d'usuaris vàlids.** La selecció d'usuaris vàlids es realitza a partir del camp IMSI, el qual és un identificador únic de cada usuari a la xarxa. Tot i que en aquesta fase és habitual treballar amb filtres per seleccionar únicament els usuaris amb una alta resolució temporal (i. e. A registres / B minuts), s'ha descartat aquesta opció per evitar perdre registres d'usuaris amb poques interaccions a la xarxa com pot ser el cas dels turistes. En aquesta fase, s'aplica un filtre de velocitat per tal d'eliminar possibles salts d'antena que porten a registres que no es corresponen amb la realitat. Concretament, quan la velocitat entre registres d'un mateix IMSI és superior a 100 km/h, es descarta l'últim registre.
- 3) **Identificació d'estàncies i seqüència de viatges.** L'algoritme implementat en aquesta etapa s'encarrega d'identificar les estàncies més habituals dels usuaris, l'horari de sortida d'aquestes i la seva destinació. Les estàncies es determinen basant-se en una permanència prolongada (15 minuts) dels usuaris en una mateixa àrea (radi=300 metres). Un cop identificades les estàncies, aquestes s'assignen a les zones i centroides corresponents del model (veure zones definides en la Figura 2). A continuació, es defineixen els viatges entre zones i s'estableix l'hora d'inici de cada viatge utilitzant com a referència l'últim registre observat en aquella estància. Les zones frontereres (veure FR01 i FR02 en la Figura 2) s'han tractat de forma diferenciada en aquesta fase. El pas de vehicles per FR01 i FR02 provinents de Catalunya i de França representa l'entrada de nous usuaris a la xarxa de telefonia mòbil. Aquest pas es realitza gairebé sempre en intervals de temps molt inferiors als 15 minuts considerats per assignar una estància motiu pel qual obviaríem l'origen d'aquell viatge. Per tal de solucionar aquest aspecte, en les zones FR01 i FR02 l'aparició d'un únic registre és suficient per tal d'assignar una estància. El resultat final de l'algoritme és una matriu origen-destí de 61 x 61 (igual al nombre de zones definides) per l'interval de temps estudiat.

El període temporal considerat per a la construcció de les matrius OD dependrà de l'escenari específic que es vulgui analitzar i es basa en els patrons representatius de la mobilitat del país identificats prèviament a partir dels comptatges de vehicles horaris del període maig 2020 - gener 2022¹². En el present estudi es parteix de les

¹² Més informació a <https://ari.ad/noticies/model-nacional-simulacio-transit-ja-calibrat>

dades que conformen el patró 4 (dies laborables) acotades al pic de matí (de 7h a 10h, matrius quinze-minutals).

2.1.4 Repartiment modal

Les matrius OD obtingudes en la fase de generació i distribució dels viatges representen la totalitat dels desplaçaments inferits a partir de les dades de telefonia mòbil. És necessari, doncs, establir un criteri de repartiment modal per determinar quins han estat realitzats en vehicle.

La definició d'una funció que representi el repartiment modal segons la distància dels desplaçaments és un assumpte complex que podria ser objecte d'un estudi per si sol (Liu et al., 2019). Es tracta de definir un model de comportament que representi les decisions de viatge que els usuaris prenen quan estan confrontats a alternatives variades. Aquestes dependran de les implicacions que comporta l'elecció de cada mode: temps de trajecte, temps d'espera, cost, nivell de servei, etc.

Els models que tendeixen a representar el comportament de viatge dels individus quan tenen un rang discret d'alternatives de desplaçament es solen conèixer com a models d'elecció discreta (Ortúzar & Willumsen, 2011). Els models *Logit* són els més usats per al repartiment modal en l'àrea de la mobilitat i el planejament de transport ja que tenen l'habilitat de modelar comportaments de viatge complexos de qualsevol població mitjançant tècniques matemàtiques simples. En base a aquest plantejament, i com s'aprecia en la Figura 5, s'assumeix que:

- Els desplaçaments es classifiquen entre no motoritzats (majoritàriament a peu) i motoritzats (vehicle privat o transport públic).
- La corba de repartiment modal (*modal split*) té forma de "S" i la probabilitat (p) que un trajecte es faci a peu és:

$$p(c) = 1/(1+\exp(-\lambda * c))$$

on λ és un paràmetre que no coneixem;

i c la diferència de cost entre anar a peu o en vehicle.

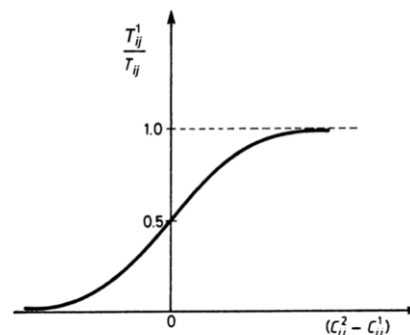


Figura 5. Corba de repartiment modal empírica, on T equival a la proporció de viatges fets per mode. Font: Ortúzar & Willumsen (2011)

c) La funció de cost simplificada com la diferència de temps de trajecte és:

$$c(d) = (3+3+d*60/20+3+3) - (d*60/4)$$

on d és la distància entre origen i destinació en km, resultant c en minuts; i considerant 3 min per anar al vehicle o parada, 3 min per sortir del pàrquing o 6 min per esperar bus, desplaçament a 20 km/h en vehicle i 4 km/h a peu, 3 min per aparcar i 3 min per arribar a destinació des del vehicle o parada.

A mode d'exemple, pels desplaçaments d'1 km (15 min caminant), la diferència de cost-temps entre anar a peu o usar un mode alternatiu és 0, per la qual cosa la probabilitat que un usuari opti per anar a peu o usar un vehicle és la mateixa i igual a 0,5.

Tal com es pot observar en la Figura 6, la sensibilitat amb la qual la funció de cost c varia en funció de la variable d (distància) ve determinada pel valor de lambda (λ).

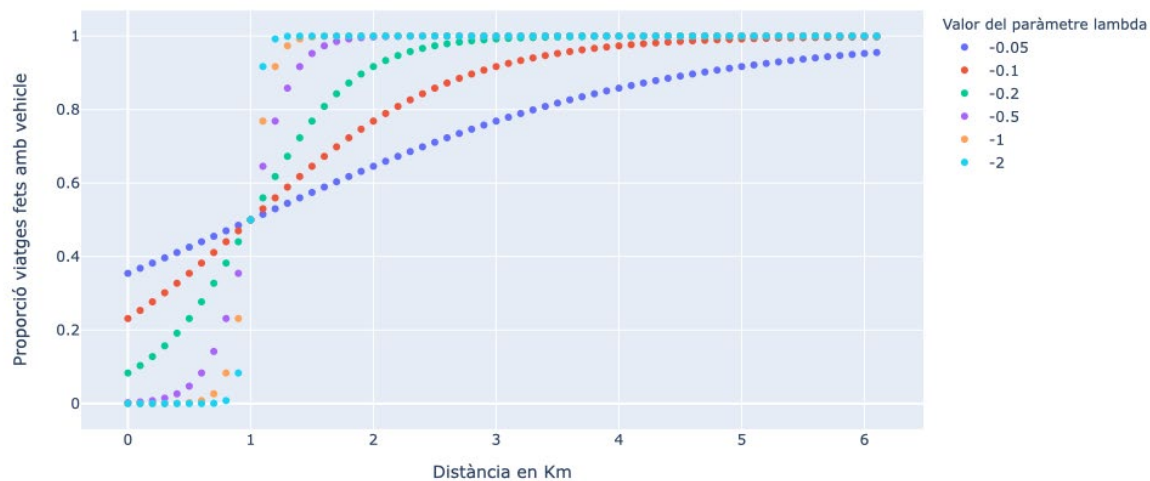


Figura 6. Proporció de viatges realitzats amb vehicle segons la distància i el valor de lambda

Per tal de determinar el valor de lambda a escollir, s'ha tingut en compte el Pla de mobilitat integral de la Vall Central d'Andorra (Govern d'Andorra, 2018) que estima que el 23% dels desplaçaments de la Vall Central són a peu.

A partir de la matriu de distàncies entre parells OD calculades segons la ruta més curta en base a *OpenStreetMap*¹³, s'ha calculat el repartiment modal de la matriu OD inicial mitjançant la funció de repartiment modal i segons diferents valors de lambda. Com a exemple, la Figura 7 mostra el nombre de viatges entre zones de la Vall Central realitzats amb vehicle respecte el total de viatges segons el valor de lambda.

¹³ Ús de la llibreria *pyroulib3*

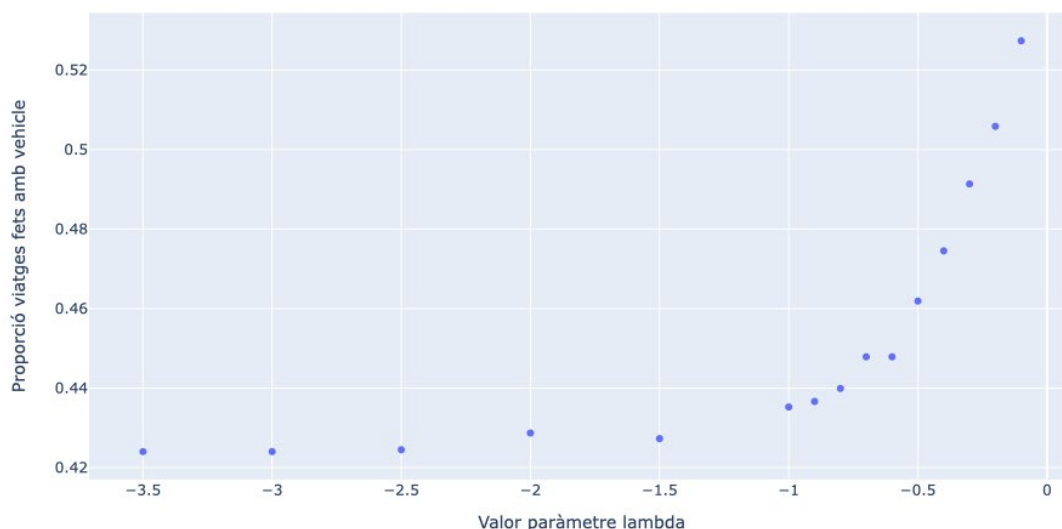


Figura 7. Proporció de viatges realitzats amb vehicle a la Vall Central segons el valor de lambda

Com es pot observar, com més a prop de zero és el valor de lambda més proporció de viatges es fan amb vehicle dins la Vall Central, fins a un límit proper al 53%. Finalment, per tal d'apropar-se al màxim al valor proposat en el pla de mobilitat de la Vall Central (i. e. 77% de desplaçaments a peu), s'ha escollit un valor de lambda de -0,1.

2.1.5 Escalat de les matrius OD

Les dades de telefonia mòbil utilitzades per a l'obtenció de les matrius OD inclouen una mostra dels moviments que es realitzen al país. En aquest sentit, per representar la mobilitat motoritzada al país cal escalar la matriu O/D dels vehicles per tal d'adequar-la als volums reals observats. Aquest procés es realitza mitjançant dades de comptadors de vehicles. Concretament, s'han utilitzat quatre punts de la xarxa viària on es disposa de comptadors de vehicles basats en tècniques de visió per computador, més precisos que els realitzats amb espires electromagnètiques¹⁴.

Per escalar els parells OD, en funció de la ruta entre zones, s'utilitzen els comptadors ubicats en els següents punts de la xarxa (en ambdós sentits):

- Bartra (Encamp): es comptabilitzen tots els desplaçaments de les zones de la Vall d'Orient cap o des de la resta de zones.
- Margineda: es comptabilitzen tots els desplaçaments de les zones de Sant Julià de Lòria i la frontera catalana cap a la resta de zones.
- Frontera del riu Runer: es comptabilitzen tots els desplaçaments des de i cap a Catalunya.

¹⁴ Comunicació personal de l'Àrea de Mobilitat del Govern d'Andorra

- Envalira: es comptabilitzen tots els desplaçaments cap i des de les zones de Grau-Roig, Pas de la Casa i frontera francesa.

Per tots els desplaçaments entre zones que no estiguin incloses en els casos anteriors s'utilitza la mitjana de l'escalar calculat mitjançant tots els punts de comptatge.

La Figura 8 i la Figura 9 mostren el comportament d'aquest escalar segons l'hora del dia, el comptador i diferents dies estudiats.

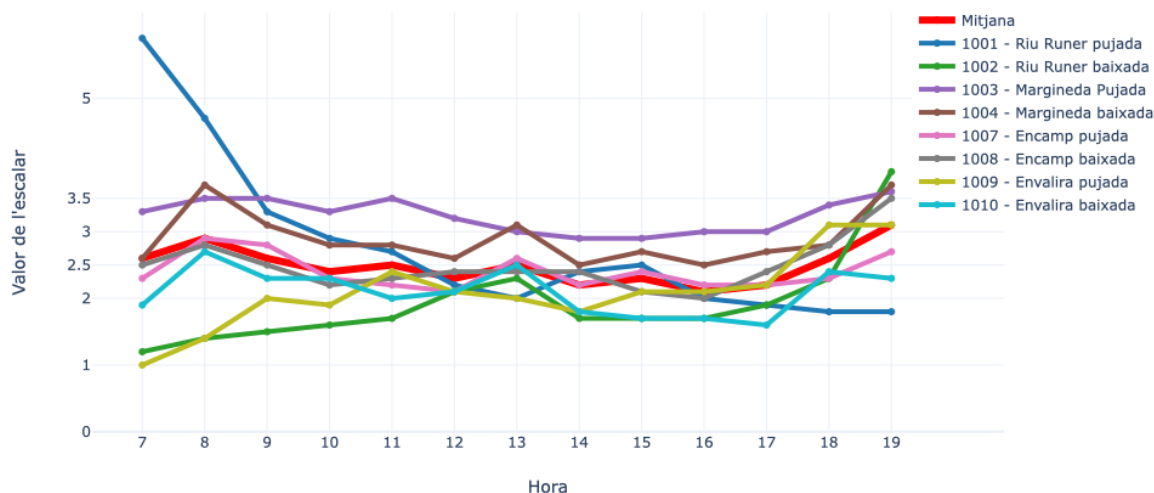


Figura 8. Evolució de l'escalar segons l'hora del dia i comptador

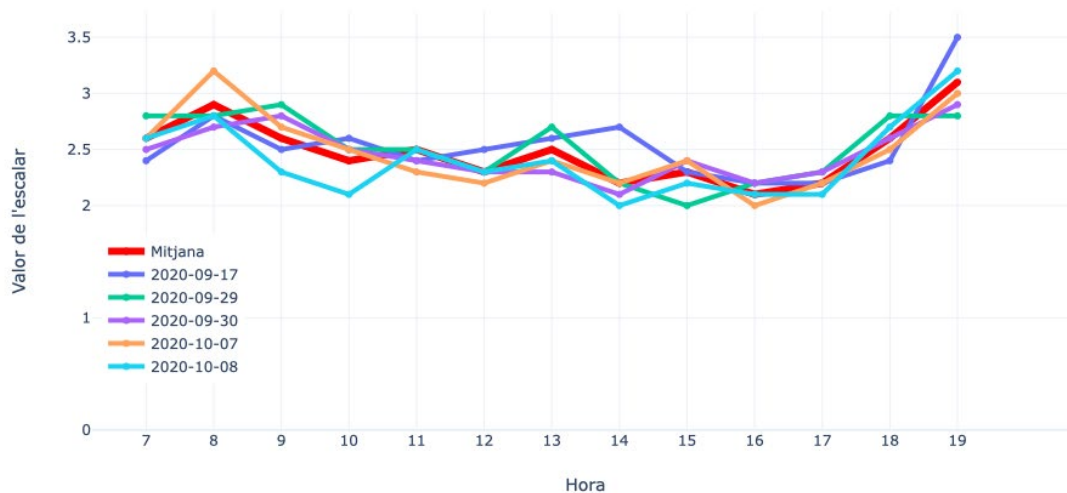


Figura 9. Evolució de l'escalar segons l'hora del dia i diferents dies estudiats

2.1.6 Calibratge i validació del model

Tal com s'ha exposat anteriorment, el calibratge i la validació del model s'ha realitzat per un pic de matí (de 7h a 10h) de dia feiner. Per construir la matriu OD de partida a utilitzar en els diferents escenaris, es parteix de les dades dels dies identificats en el patró 4 (veure secció 2.1.3), se n'extreuen els desplaçaments entre les 61 zones del model per cadascun dels dies i, finalment, es calcula la mitjana horària de desplaçaments entre zones.

Posteriorment, tal com s'explica en la seccions 2.1.4 i 2.1.5, s'hi aplica el repartiment modal i a continuació la matriu obtinguda s'escala mitjançant els comptatges reals de vehicles per tal de representar la totalitat dels viatges observats.

Paral·lelament es recopilen les dades dels comptatges de vehicles de les hores concretes dels dies inclosos en l'anàlisi. Un cop descartats els 12 comptadors fixes que presenten valors atípics, en el conjunt del procés s'han utilitzat dades de 52 detectors de vehicles fixes i 33 de mòbils.

2.1.6.1 Ajust de la matriu OD

Amb l'objectiu d'obtenir una matriu OD final que, a banda de les dades de telefonia mòbil, tingui en compte els detectors i la xarxa viària, s'ajusta¹⁵ la matriu OD de forma iterativa amb la premissa de reduir els errors mínims quadrats entre els volums observats en els comptatges i els modelats.

El mètode dels mínims quadrats té l'inconvenient que afavoreix els valors alts. Per aquest motiu s'utilitzen *weight functions*¹⁵ per tal de reduir el desequilibri entre els recomptes alts i baixos i així millorar el resultat global de l'ajust. Com a contrapartida, es distorsiona més la matriu original.

En base a la prova de diferents *weight functions*, l'opció amb millor comportant és la *Weight Function 2* = $(1/(\text{volum observat}^{0,4})) * 50$.

Per tal de limitar la distorsió de la matriu inicial, es limiten tant l'elasticitat de la matriu com la distribució de la distància de viatges a 0,5. Addicionalment, es limiten alguns parells OD amb una desviació màxima basada en un percentatge del valor original. Es limiten a màxim 50% de desviació els viatges amb destinació en zones residencials (SJ03, SJ01, EE01, EE02, EE03, EE04, LM01, LM02, LM07, OR02, OR01, EN04, EN02, AV08). Finalment, també es limita la desviació per viatges amb origen en alguns centroides de la Vall Central que principalment són receptors de viatges (AV10, AV12, AV02, AV01, EE04).

¹⁵ *Static OD Adjustment*. Més detall a <https://www.aimsun.com/technical-notes/static-od-adjustment/>

Les restriccions mencionades porten a un ajust del model en que el 96% dels 52 comptadors fixes presenten un valor de GEH¹⁶ < 5, considerat com a bo.

2.1.6.2 Assignació de rutes

En aquest punt, tot i que el model presenta un bon ajust en la major part dels punts fixes de validació, s'observa que l'assignació de rutes presenta alguns problemes ja que assigna volums excessius a rutes molt secundàries. El fet que la major part dels comptadors fixes estiguin ubicats en vies principals, dificulta el calibratge fora d'aquestes vies. Per aquest motiu, en aquesta fase, tot i disposar d'unes mostres més limitades, s'incorporen dades de comptadors mòbils en l'anàlisi. El nou ajust amb els detectors addicionals resulta en un 76% dels 85 detectors amb valors de GEH < 5, confirmant que l'assignació de rutes del model requereix de més ajustos.

Un primer ajust consisteix en definir un nou tipus de via específic per carreteres secundàries de muntanya (p. ex. aplicat a La Comella, Coll d'Ordino, Beixalís, etc.) amb un cost addicional (+ 10 min) per penalitzar l'atractivitat d'aquestes vies i reflectir millor el comportament real.

Seguidament, en base al coneixement local del modelitzador, s'afegeixen costos específics a vies secundàries on s'observen volums poc realistes (p. ex. Anyós, Sispony, Prat Salit, etc.).

Com a última fase del calibratge, es modifica la TPF (*Turn Penalty Function*¹⁷) per a que tingui en compte la saturació de la via (funció calculateCapacitySIGNALISED) i s'aplica a tots els girs. Addicionalment, en els passos de vianants sense semàfor, ni senyal de ceduï el pas ni stop a la secció prèvia o posterior, s'afegeixen 10 segons de penalització. Només s'afegeix penalització en senyal de ceduï el pas o stop quan el node no està semaforitzat.

Per últim, en base a diferents testos realitzats, es decideix utilitzar la funció *Standard BPR*, com a VDF (*Volume Delay Function*¹⁸).

2.1.6.3 Ajust estàtic de la demanda

Els ajustos detallats prèviament resulten en un ajust del model on la totalitat dels 85 detectors utilitzats presenten un valor de GEH < 5. La Figura 10 mostra el diagrama de dispersió entre els volums observats i els modelats (veh/h) en els punts de comptatge.

¹⁶ Més detall a <https://docs.aimsun.com/next/22.0.1/UsersManual/CalibrationAndValidationTheory.html>

¹⁷ Funció utilitzada en el model macro per modelar el cost d'un gir en funció de diferents paràmetres com el volum, la llargada del gir, etc.

¹⁸ Funció utilitzada en el model macro per modelar el cost d'una secció en funció de diferents paràmetres com el volum, la capacitat, la llargada, etc.

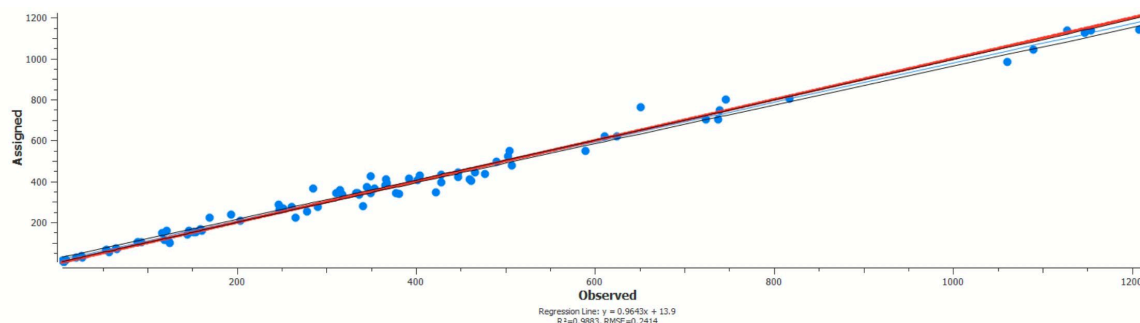


Figura 10. Relació entre la demanda observada (comptadors) i la demanda ajustada

2.1.6.4 Tipus de vehicles

Les dades dels comptatges de vehicles basats en visió per computador permeten discernir entre vehicle lleuger i pesat. A partir d'aquestes, es calcula el factor de presència de vehicles pesats durant el període d'anàlisi (veure Taula 2).

7:00	7:15	7:30	7:45	8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30	9:45	10:00
0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14	0,15	0,14	0,13	0,13

Taula 2. Proporció de vehicles pesats respecte al total de vehicles per intervals de 15 min

En base a les proporcions presentades en la Taula 2, s'ajusten les matrius OD 15 minutals. Finalment es llença un nou ajust estàtic de la demanda amb les noves matrius com a dades d'entrada. La validació final del model macro presenta valors de GEH < 5 en el 98,8% dels detectors de vehicles, podent-se considerar l'ajust com a bo.

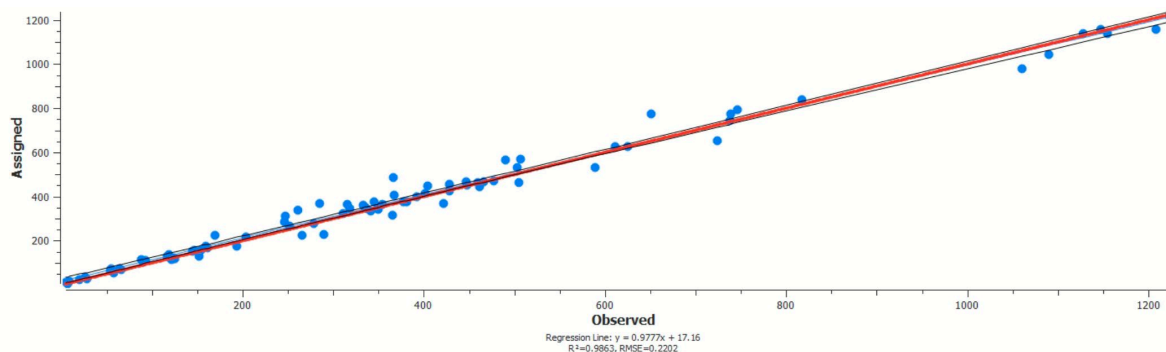


Figura 11. Relació entre la demanda observada (comptadors) i la demanda final ajustada

2.2 Escenaris analitzats

Tots els escenaris implementats en aquest estudi representen l'hora punta d'un dia laborable, incorporant diferents assumpcions pel que fa a infraestructura viària i demanda futura. A continuació es detallen els diferents escenaris analitzats, tots mitjançant la simulació macro, la qual aporta una visió de xarxa.

2.2.1 Escenari Actual

L'escenari Actual ha estat dissenyat com a escenari base respecte el qual es quantifiquen els impactes de la resta d'escenaris analitzats. Representa la situació actual, amb la demanda calibrada tal com es detalla en la secció 2.1.6 i la principal infraestructura viària existent a finals de l'any 2023.

S'utilitza com a escenari de referència ja que la guia tècnica estableix que, "en tot moment caldrà tenir present, com a factor limitant, que no es podrà empitjorar l'escenari actual definit pel Pla de mobilitat 2030, com tampoc superar els índexs de saturació establerts per als trams o punts de la xarxa susceptibles de suportar actualment retencions i que a hores d'ara ja presenten índexs de saturació".

La Figura 12 presenta la representació de la matriu OD de l'escenari Actual agrupant les diferents zones del model en parròquies, fronteres i àrees d'especial atracció de visitants.

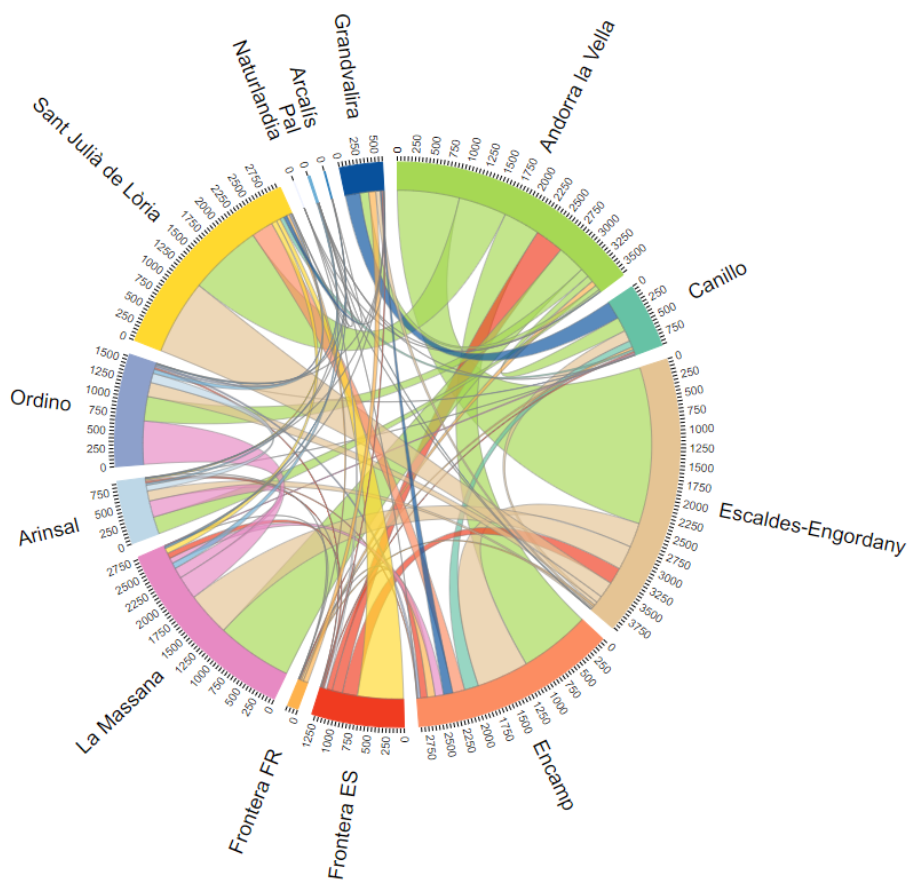


Figura 12. Representació dels viatges realitzats en l'escenari Actual¹⁹

¹⁹ Veure més detall al visor interactiu

https://ari.ad/images/projectes/model_mobilitat/matriu_od_actual.html

2.2.2 Escenari Desviació de la Massana

L'única variant d'aquest escenari respecte l'Actual és la incorporació en el model de la futura desviació de la Massana. Tal com determina la guia tècnica dels estudis de càrrega màxima parroquial, "no es pot tenir en compte cap altra inversió significativa per part del Govern en l'horitzó dels deu anys vinents, definida en el Pla sectorial de carreteres generals o en el Pla sectorial de noves infraestructures viàries".

2.2.3 Escenari Creixement urbanístic accentuat

Aquest escenari busca representar una situació de creixement urbanístic accentuat en que bona part de les actuacions previstes en els Plans d'Ordenació i Urbanisme Parroquial (POUP) s'acaben executant.

Per tal d'alimentar aquest escenari amb uns valors el més acurats possibles és imprescindible la col·laboració de tots els comuns. Malauradament això no ha estat possible i s'ha decidit utilitzar la informació proporcionada pel Comú d'Ordino com a representativa de tot el país. Concretament, la hipòtesi de creixement proposada per Ordino preveu una població equivalent de 24085 persones, el que suposa aproximadament triplicar la població equivalent actual (un 210% d'increment respecte l'actualitat). Aquesta hipòtesi considera el 100% de llicències residencials concedides en sòl urbà consolidat i els plans parcials aprovats entre el 2019 i el 2023.

En absència d'informació per la resta de parròquies, aquest mateix creixement s'ha aplicat de forma homogènia a la demanda (viatges origen-destí).

2.2.4 Escenari Límit guia tècnica

L'escenari Límit guia tècnica itera en les simulacions per tal d'obtenir el màxim increment en la demanda que no empitjori l'escenari Actual. Aquest escenari s'alinea amb el factor limitant marcat per la guia tècnica. L'increment de la demanda s'aplica de forma homogènia a tot el territori, per la qual cosa el valor límit resultant s'ha d'entendre en clau país.

2.3 Indicadors d'avaluació dels escenaris

La comparativa numèrica entre escenaris de l'estat de la xarxa viària es realitza a través de dos indicadors.

- 1) **Longitud de xarxa saturada i en risc de saturació (km).** Concretament es comptabilitzen els km de xarxa amb un índex de saturació $\geq 90\%$. Aquest indicador aporta una visió centrada en els punts de la xarxa amb més problemes de congestió. El valor proporcionat inclou la longitud de tots els carrils d'una

secció. Malgrat que la modelització macro dona valors de saturació superiors al 100%, no reproduïbles en la realitat, aquests s'han d'interpretar com a indicadors d'una congestió major que, en la realitat, es traduiran en una propagació de la saturació a altres seccions.

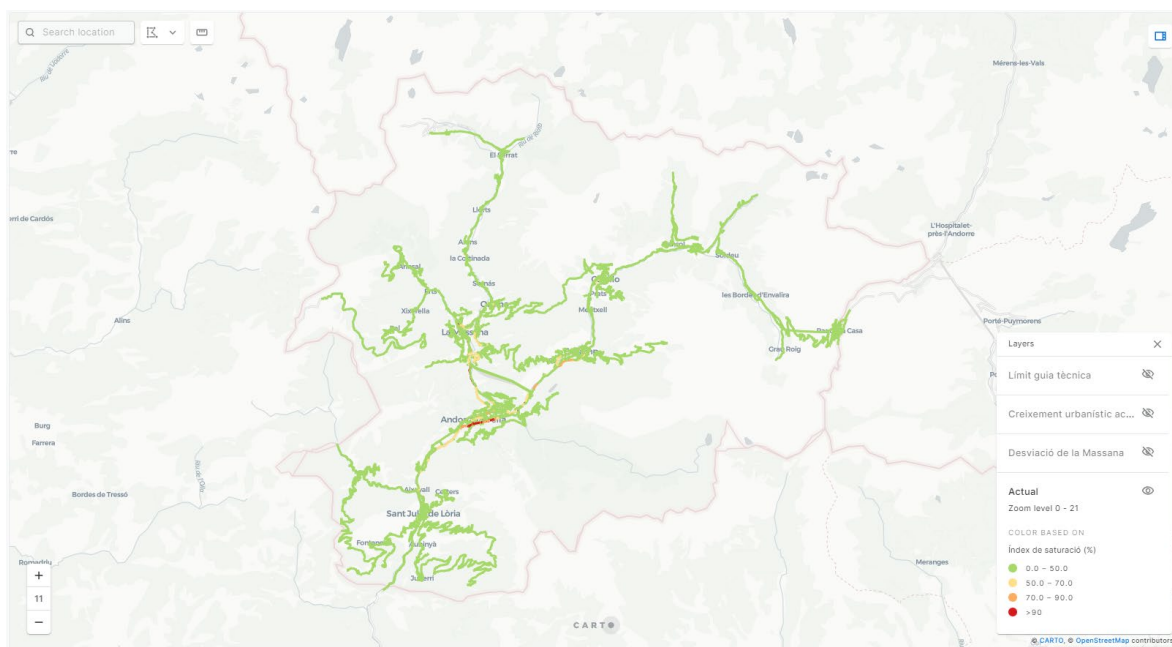
- 2) **Temps total de viatge a la xarxa de 7h a 10h (h).** Aquest indicador comptabilitza la suma del temps de viatge de tots els trajectes en vehicle realitzats entre les 7h i les 10h, aportant una visió del conjunt de la xarxa.

3. Resultats

La principal variable de sortida calculada en la modelització macro és el volum de vehicles en cada secció del model (veh/h). A partir d'aquesta i la capacitat de les seccions es calcula l'índex de saturació, indicador presentat en la [visualització interactiva](#)²⁰ dels resultats dels diferents escenaris de la modelització.

Adicionalment al visor interactiu, els resultats dels quatre escenaris analitzats es posen a disposició pública en format GeoPackage²¹. Aquesta base de dades espacial incorpora les taules de resultats així com les geometries de les diferents seccions.

3.1 Escenari Actual

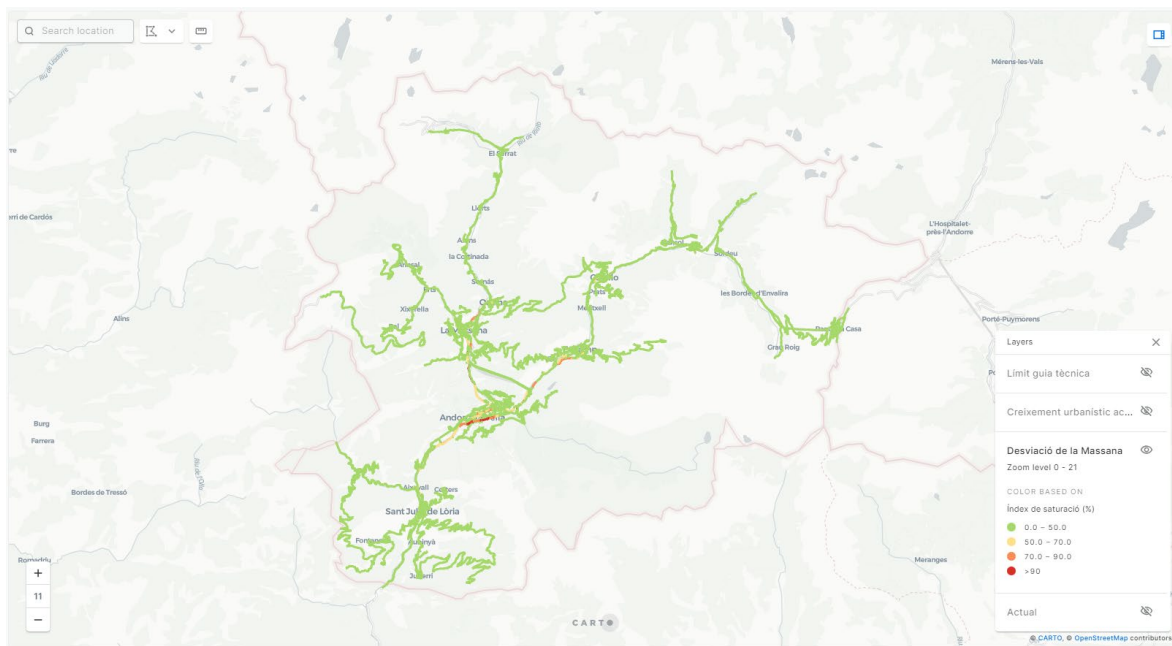


- | | |
|---|----------------|
| 1) Longitud de xarxa saturada i en risc de saturació: | 5,70 km |
| 2) Temps total de viatge a la xarxa de 7h a 10h: | 6742 h |

²⁰ Accés al visor https://ari.ad/capacitat_maxima_xarxa_viaria

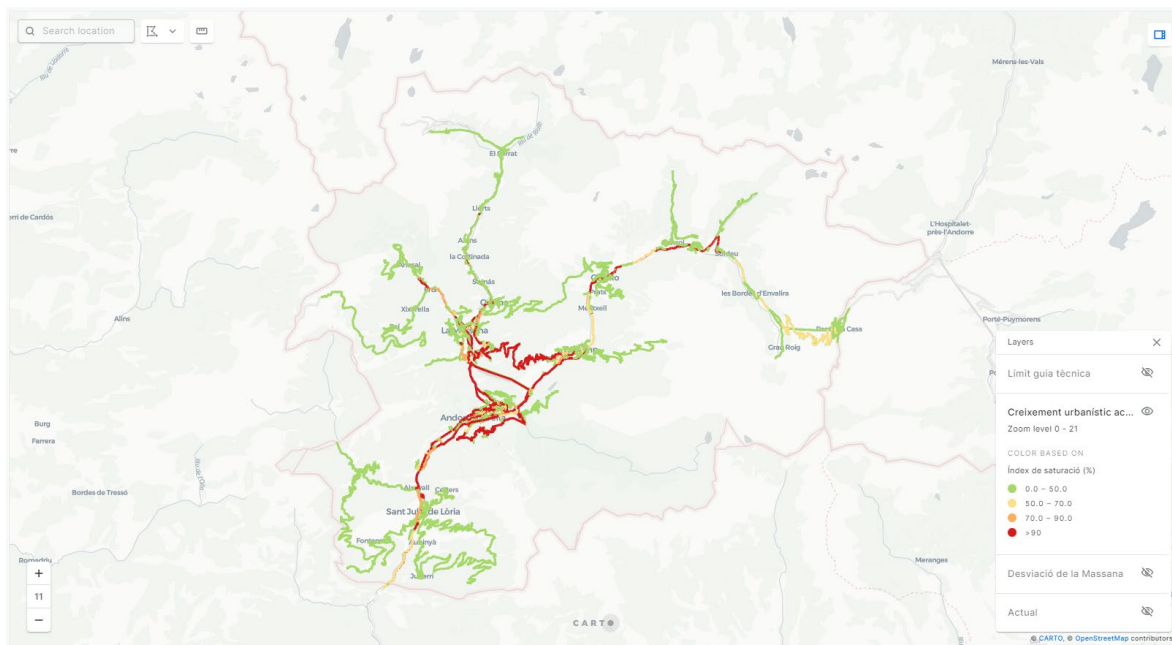
²¹ Enllaç de descàrrega https://ari.ad/capacitat_maxima_xarxa_viaria_escenaris_resultants

3.2 Escenari Desviació de la Massana



- 1) Longitud de xarxa saturada i en risc de saturació: **4,63 km**
- 2) Temps total de viatge a la xarxa de 7h a 10h: **6536 h**

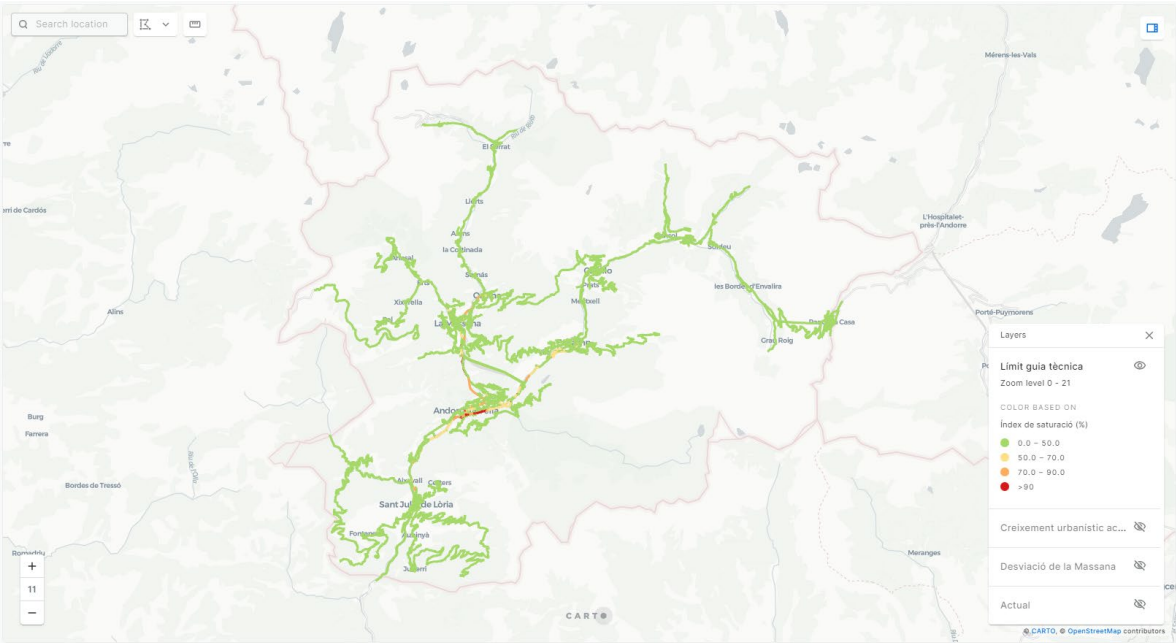
3.3 Escenari Creixement urbanístic accentuat



- 1) Longitud de xarxa saturada i en risc de saturació: **141,99 km**
- 2) Temps total de viatge a la xarxa de 7h a 10h: **90190 h**

3.4 Escenari Límit guia tècnica

Com a resultat de les iteracions, s’obté un valor de creixement límit del 2,4% de la demanda respecte l’escenari Actual. Aquest s’ha aplicat de forma homogènia a la demanda total i representa el màxim assumible per no empitjorar l’indicador Longitud de xarxa saturada i en risc de saturació (km) de l’escenari Actual (i. e. 5,70 km).



- 1) Longitud de xarxa saturada i en risc de saturació:
- 2) Temps total de viatge a la xarxa de 7h a 10h:
- 4,69 km
- 6720 h

3.5 Resum dels resultats nacionals

La Taula 3 presenta el resum dels indicadors d’avaluació resultants en els diferents escenaris modelitzats.

Escenari	Increment de demanda respecte l'escenari Actual	Long. de xarxa saturada i en risc de saturació (km)	Temps total de viatge (h)
Actual	-	5,70	6742
Desviació de la Massana	0,0%	4,63	6536
Creix. urbanístic	210,0%	141,99	90190
Límit guia tècnica	2,4%	4,69	6720

Taula 3. Resum dels indicadors resultants en els escenaris modelitzats

Referències

Govern d'Andorra. (2018). *Pla de mobilitat integral de la Vall Central d'Andorra*.

Govern d'Andorra. (2022). *Pla director de la mobilitat 2030*.

Gutiérrez Puebla, J., Benítez, C., Leaño, J. M., García Palomares, J. C., Condeço Melhorado, A., Mojica, C., Scholl, L., Adler, V., Vera, F., Moya Gómez, B., & Romanillos Arroyo, G. (2019). *Cómo aplicar big data en la planificación del transporte urbano: El uso de datos de telefonía móvil en el análisis de la movilidad*. 124. <https://doi.org/10.18235/0002009>

Liu, Y., Chen, J., Wu, W., & Ye, J. (2019). Typical combined travel mode choice utility model in multimodal transportation network. *Sustainability (Switzerland)*, 11(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su11020549>

National Research Council. (2000). Highway Capacity Manual. In *National Research Council, Washington, DC*.

Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2011). Modelling Transport. In *Modelling Transport*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119993308>