
CAPÍTOL 2

CONCEPTES I ANTECEDENTS

2.1 CARACTERÍSTIQUES DE LA CIRCULACIÓ

La descripció del trànsit pot realitzar-se segons diverses línies d'actuació. Si es considera que el fenomen resta caracteritzat com un flux continu de matèria que es regeix per unes lleis de moviment pròpies, oblidant que és format per vehicles individuals, es pot parlar d'estudi macroscòpic del mateix. Serà necessari, doncs, treballar amb variables que siguin capaces de descriure el fenomen en el seu conjunt.

Si, pel contrari, es realitza l'estudi observant el comportament dels vehicles individuals i creant models que descriuïn el moviment dels mateixos, es parla d'estudi microscòpic. Aquest plantejament exigirà la utilització de variables representatives de les característiques individuals de cada vehicle. En general, l'obtenció de dades d'aquestes característiques és una tasca complicada i sotmesa a grans errors de mesura, pel què els models d'aquest tipus han sigut fonamentalment teòrics i recolzats en poques dades de camp. Per això quan s'han dut a la pràctica s'ha provat de simplificar-los reduint així la seva utilitat. Només són models aplicables quan es necessita un alt nivell de detall com és el cas a algunes aplicacions al control de trànsit urbà, al qual són imprescindibles dades en temps real.

El comportament del trànsit s'estudia per mitjà d'unes variables que recullen els aspectes més importants del mateix. Entre les de tipus macroscòpic les emprades més freqüentment són la intensitat, que defineix el nombre de vehicles que passen per un perfil transversal de la via en una unitat de temps determinada, la velocitat mitja dels vehicles i, amb menor freqüència d'ús, la densitat o nombre de vehicles per unitat de longitud de via. Entre les variables de tipus microscòpic de major ús es troben l'interval intervehicular i l'interval buit intervehicular, variables espacials i temporals, que

descriuen magnituds que relacionen cada vehicle amb el que li segueix, i el nombre de parades de cada vehicle en un recorregut o temps donat. Sembla evident que aquestes variables són relacionades entre si, directa o indirectament, i per a l'estudi del trànsit pot ser útil conèixer aquestes relacions i les seves característiques més importants.

La present tesina es basarà en un estudi macroscòpic del trànsit centrat en les dades d'intensitat de les vies catalanes i, en conseqüència, aquesta serà l'única variable que es comentarà en detall. Per aprofundir sobre la resta s'aconsella veure l'apartat corresponent del treball de Kraemer et al. (1993).

2.1.1 Intensitat. Definició

S'anomena intensitat de trànsit al nombre de vehicles que passa a través d'una secció fixa d'una carretera per unitat de temps. Les unitats més utilitzades són vehicles/hora i vehicles/dia. Quan s'empra la primera es parla d'intensitat horària i amb la segona, d'intensitat diària.

La intensitat és la característica més important de la circulació vial ja que la resta poden relacionar-se amb ella amb major o menor facilitat. Proporciona una descripció molt intuïtiva del comportament del trànsit a cada moment i com ha sigut la variable més utilitzada per l'enginyeria del trànsit, existeix una gran quantitat de dades i estudis de la mateixa.

Per a mesurar-la, com es veurà més endavant, es realitzen aforaments a determinades seccions de la carretera de forma manual o automàtica, utilitzant aparells comptadors. Aquests aforaments es realitzen durant períodes més o menys llargs obtenint així un registre dels valors de la intensitat durant aquests períodes.

Normalment, la intensitat de trànsit ve condicionada per la demanda, la qual varia considerablement a cada tram. No obstant això, en moltes ocasions l'oferta o la capacitat de les vies condiona la intensitat, no només perquè estableix un límit absolut, sinó perquè en arribar a determinades restriccions, la demanda també es veu afectada.

La variació de la intensitat al llarg del temps presenta gran importància. Com a valor representatiu de la mateixa durant el període de mesura es sol adoptar la intensitat diària (o horària si el període és menor a un dia) mitja de totes les registrades. Generalment el període d'aforament comprèn tot un any, i la intensitat mitja diària (IMD) és la magnitud més utilitzada per a caracteritzar la intensitat a les carreteres, la qual es pot definir com el nombre total de vehicles que ha passat per una secció de la via durant un any determinat dividit per 365.

Des del punt de vista de l'Enginyeria de Trànsit la IMD és la variable més important de mesura de la intensitat però també existeix un altre estat interessant d'aquesta que és la intensitat horària punta (IHP). La IHP reflexa el nombre de vehicles que passen per una secció durant l'hora que es considera representativa de les condicions de major circulació.

La IMD importa fonamentalment des del punt de vista del planejament: classificació de vies, programes de millora, càlcul d'índexs d'accidents, determinació de tendències en l'ús de les vies, projectes de senyalització i il·luminació, estudis econòmics i determinació de característiques geomètriques de caràcter general. La intensitat

horària, en canvi, és més interessant des del punt de vista del projecte i de l'ordenació: capacitat de les vies, característiques de les interseccions i els enllaços, control de trànsit, coordinació de semàfors i ordenació de la circulació.

2.1.2 Intensitat. Variacions

La intensitat de trànsit de qualsevol carretera varia amb el temps seguint una llei que pot considerar-se formada per una tendència a llarg termini, sobre la qual es superposen unes oscil·lacions cícliques (anuals, setmanals i diàries) i unes variacions purament aleatòries. Encara que la forma i magnitud d'aquestes oscil·lacions varien d'unes carreteres a unes altres, el fenomen és anàleg a totes elles i poden estudiar-se separatament les característiques d'aquestes components de les variacions de trànsit, com es recull a la bibliografia referent al tema (Kraemer et al., 1993; Valdés et al., 1988).

Es considera en primer lloc el cicle anual del trànsit. Normalment a un tram qualsevol d'una carretera la variació de la intensitat del trànsit del dia típic d'un mes segueix unes lleis relativament constants al llarg dels anys, mentre no es modifiquin substancialment les característiques físiques i funcionals de la via o l'ús del sòl proper a ella. La variació generalment és més acusada a zones rurals on les intensitats són majors durant els mesos d'estiu i menors a l'hivern. L'augment serà major quan major sigui el caire turístic de la via i menor quan més industrial sigui la mateixa. L'excepció a aquest tipus d'oscil·lació es presenta a les carreteres més urbanes, a les quals el trànsit és pràcticament constant al llarg de l'any amb una disminució apreciable al mes d'agost.

El segon cicle és el setmanal. A la majoria de carreteres es produeixen variacions d'intensitat als laborables respecte als caps de setmana. A les més urbanes es produeix una disminució de trànsit durant els caps de setmana mentre que a les més turístiques aquest, augmenta. Aquest fenomen és més marcat durant els mesos d'estiu però es sol presentar durant tot l'any.

Per últim hi ha el cicle diari per a l'estudi del qual cal conèixer les intensitats horàries de les vies. Com a norma general, les intensitats són més baixes durant la nit i més altes durant el dia, a on es donen dues puntes de trànsit característiques, una pel matí i una altra per la tarda. En funció de la via les magnituds d'aquestes puntes i les hores a les quals es donaran seran unes o altres. La punta matinal es produeix en zones urbanes a primera hora, entre les 7 i les 9 del matí, però en zones rurals la intensitat horària continua augmentant més lentament fins les 11 o 12 del matí, quan assoleix el seu valor màxim. La segona punta es dona per als dos casos al voltant de les 7 o 8 del vespre. Al llarg d'un dia es poden produir altres variacions, sobretot a les hores centrals, però no són tan generals ni remarcables com les dues puntes esmentades. A la figura 2.1 s'exemplifica un gràfic tipus on es mostra una evolució usual de les intensitats horàries mitges al llarg d'un dia. En aquest cas la punta matinal es dona a les 8 del matí i la del vespre a les 6 de la tarda.

Aquestes tres variacions de la intensitat són les que permetran estudiar l'estacionalitat de les vies, segons els seus trets característics. A més analitzant les coincidències entre el comportament de les vies es podrà establir una classificació de les mateixes.

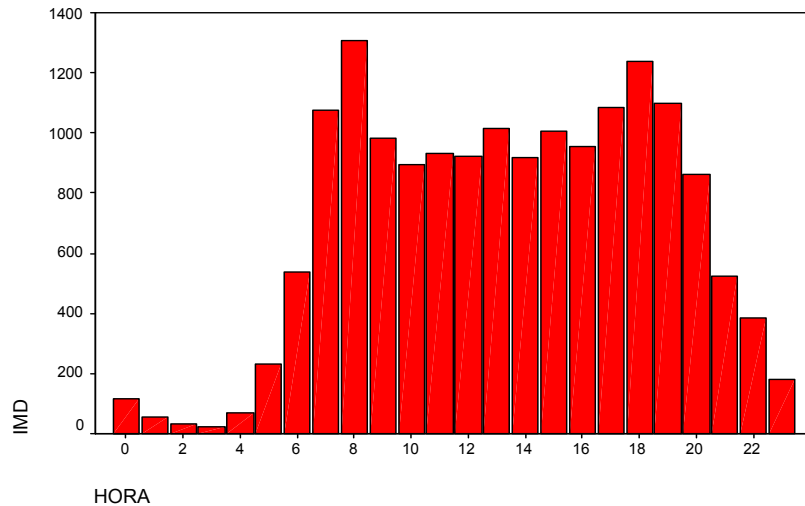


Fig 2.1 Variacions diàries de la intensitat

2.2 AFORAMENTS

Com ja s'ha comentat, la dada bàsica per a la realització de qualsevol estudi de planejament i explotació de xarxes viàries és la intensitat de circulació. Per a conèixer, per tant, els moviments que es produeixen a cada via cal comptar o aforar el nombre de vehicles que passen per determinades seccions d'elles.

Els aforaments poden realitzar-se per mitjans automàtics o manualment. La conveniència de seguir un o altre sistema depèn en part dels mitjans disponibles i en part dels resultats que es pretenen.

2.2.1 Mitjans per a la realització d'aforaments

Als aforaments manuals es situa un observador amb la missió de comptar tots els vehicles que passen per una secció durant un període determinat, per conèixer la intensitat de la mateixa. Tenen l'avantatge de què permeten distingir entre diferents tipus de vehicle, cosa impossible amb aparells automàtics, i la seva precisió amb personal ben entrenat és superior. El seu inconvenient principal és l'alt cost, que fa normalment injustificable la seva utilització a aforaments de duració superior a les 24 hores. Es solen utilitzar com a complement als aforaments automàtics per a obtenir informacions que d'una altra forma seria impossible obtenir, com la classificació detallada dels vehicles o dels diferents moviments de gir a les interseccions, i també es fan servir quan la durada de la presa de dades és curta (una hora o menys), on no surt a compte instal·lar aparells automàtics.

Per a realitzar un aforament automàtic, en canvi, es necessita un aparell que sigui capaç de detectar el pas dels vehicles, comptar el nombre de passos detectats i enregistrar el nombre de passos comptats en un període de temps. Els detectors emprats poden ser de dos tipus, descrits tot seguit pels seus trets essencials:

- **Pneumàtic:** tub flexible de goma tancat per un dels seus extrems, instal·lat sobre la calçada, perpendicularment a la marxa dels vehicles. En trepitjar-lo el vehicle la pressió a l'interior del tub desplaça una membrana de l'equip

comptador i tanca així un circuit elèctric que registra el pas del vehicle. Utilitzats només a les estacions de cobertura i en mesuraments puntuals. La fiabilitat d'aquest sistema disminueix en augmentar el nombre de carrils, passant d'un error del 5% per a carreteres de dos carrils, fins un de 40% en carreteres de dues calçades amb tres carrils cadascuna i una IMD superior a 60.000 veh/dia.

- Electromagnètic: constituït per uns bucles rectangulars de tres espires de cable de coure de 1,5 mm incrustats al paviment uns centímetres per sota de la superfície, o sota la capa de rodadura. En passar un vehicle per sobre, la seva massa metàl·lica produeix una variació al flux magnètic associat a l'espira i és detectada per un oscil·lador ubicat a l'aparell enregistrator. És molt fiable i permet registrar intensitats, longituds, velocitats per sentits de circulació i per carrils. S'utilitzen en estacions permanents, primàries i secundàries.

A tot el conjunt d'elements necessaris per la constitució d'un aforament se'l coneix com a estació, amb el què es pot parlar d'estacions d'aforament.

2.2.2 Programes d'aforaments

L'evolució del trànsit a una zona, ja sigui una ciutat, una província o un país, s'ha d'estudiar necessàriament per mostreig. A cada punt, la xifra que s'obté d'un aforament només pot ser considerada exacta al mateix moment de realitzar-lo, pel caràcter naturalment variable de la circulació.

Els diversos sistemes per a realitzar programes d'aforaments pretenen obtenir una idea suficient de les variacions del trànsit a tota la xarxa viària però tenint en compte que cal reduir la duració de la presa de dades per disminuir el cost del pla conjunt d'aforaments. Per tant, és necessari triar les seccions a les quals es prendran les mesures de forma que siguin representades totes les vies de la xarxa, organitzant els aforaments per tal que es pugui aprofitar la informació obtinguda a unes seccions per estimar les dades d'altres. Per això es realitzen uns aforaments més complets a algunes seccions escollides i d'elles es dedueixen les lleis de variació de la circulació, que després s'apliquen als resultats d'aforaments de curta duració obtinguts a altres seccions (Kraemer et al., 1993).

A molts països es realitzen periòdicament campanyes d'aforaments per a conèixer l'evolució del trànsit a tota la xarxa i la major part dels sistemes que es segueixen arreu del món per establir programes d'aforaments es basen en principis anàlegs. Es poden destacar, per la seva rellevància, el Pla Nacional d'aforaments de les carreteres espanyoles, vigent des de 1960, el sistema del Bureau of Public Roads, dels EE.UU. (1963) i el sistema del Road Research Laboratory, de Gran Bretanya (1956).

A Catalunya, la redacció dels plans anuals d'aforament es realitzava seguint els criteris establerts des de l'any 1960 pel Ministeri d'Obres Públiques, avui Ministeri de Foment. L'any 1991, però, la Direcció General de Carreteres de la Generalitat a través de la secció de Maquinària, avui dia Servei d'Equipament i Dades Viàries (SEDV), va assumir la realització dels plans d'aforament, partint de les dades obtingudes pels corresponents serveis d'aquesta Direcció General.

Tots aquests programes d'aforaments estableixen una jerarquia o categoria de les estacions d'aforament instal·lades per obtenir, com s'ha comentat, amb una mostra el més petita possible una idea prou representativa del trànsit a la xarxa. Aquesta

classificació d'estacions es realitza segons el seu objecte, que condiciona la duració de les mesures, en:

- Estació permanent: són aquelles on s'afora les 24 hores del dia i tots els dies de l'any, amb equips automàtics de registre horari, instal·lats de manera permanent. A les seccions de carretera on s'instal·len es considera essencial l'exacte coneixement de les dades de trànsit, bé per la importància de la via o bé per ser considerades representatives de la xarxa pel que fa a la tendència del trànsit i la seva distribució temporal.
- Estació de control primària: s'hi aforen les 24 hores del dia durant tots els dies d'una setmana completa, en mesos alterns (o sigui, sis setmanes l'any) amb aparells automàtics de registre horari.
- Estació de control secundària: s'hi aforen les 24 hores de dos dies feiners en mesos alterns (o sigui, dotze dies l'any) en grups de dos, amb aparells automàtics de registre horari. Cadascuna d'aquestes estacions s'associa a una altra permanent o primària, denominada afí, considerada similar en composició i en comportament del trànsit.
- Estació de cobertura: a aquest tipus d'estació es pretén obtenir una estimació de la intensitat mitja diària del trànsit a un tram a partir d'un sol aforament. S'hi aforen com a mínim 16 hores (de 6 a 22 hores) d'un dia feiner cada quatre anys, amb aparells automàtics de registre horari. És usual mesurar aquestes 16 hores o bé, directament, les 24 hores d'un dia sencer. Igualment que les estacions secundàries, cadascuna d'aquestes estacions s'associa a una afí.

Per a aconseguir una bona estimació de les intensitats a tota la xarxa, s'ha de col·locar una estació de cobertura per cada tram de carretera al qual es pugui suposar que la intensitat de trànsit es conserva constant, per exemple, entre dues poblacions o dues interseccions consecutives. A partir d'aquestes estimacions es poden calcular, posteriorment, valors bastants aproximats de les intensitats reals mitjançant afinitats entre les estacions de cobertura emprades i les de control i/o permanents corresponents.

2.2.3 Situació actual a les carreteres catalanes

A partir de la xarxa d'aforaments del SEDV es pot conèixer la situació actual del trànsit a les carreteres catalanes, com es presenta a la taula 2.1. Es recull també el valor del trànsit mesurat segons la variable alternativa de vehicles-km recorreguts per any.

Es pot veure que a les vies catalanes la major part del trànsit es dona a aquelles que tenen una IMD intermèdia, és a dir, entre 20.000 i 50.000 vehicles per dia encara que, en conjunt, no siguin les vies de més longitud.

Longitud (km)	Interval de trànsit diari (IMD)	IMD mitjana (veh./dia)	Vehicles-quilòmetre recorreguts any (IMD*longitud*365)	Percentatge de vehicles pesats (% sobre IMD)
1.612,833	< 1.000 veh/dia	429	252.707.635	8,18%
745,689	1.001 - 2.000 veh/dia	1.405	382.528.169	8,08%
1.139,895	2.001 - 5.000 veh/dia	3.274	1.362.126.060	10,12%
820,119	5.001 - 10.000 veh/dia	7.156	2.142.200.735	11,94%
526,534	10.001 - 15.000 veh/dia	12.262	2.356.479.389	9,76%
289,378	15.001 - 20.000 veh/dia	17.135	1.809.827.338	8,38%
330,258	20.001 - 50.000 veh/dia	29.636	3.572.472.608	7,39%
64,564	50.001 - 80.000 veh/dia	62.699	1.477.551.191	6,32%
42,966	80.001 - 100.000 veh/dia	92.315	1.447.740.257	6,38%
19,941	> 100.001 veh/dia	126.919	923.788.117	5,98%
Longitud total		IMD mitjana	Veh*km totals	Mitjana % pesants
5.592,177		7.705	15.727.421.500	9,18%

Nota: s'inclouen els trams de carreteres en concessió.

Taula 2.1 Trànsit registrat a les carreteres de la xarxa de la Generalitat de Catalunya, 2002
(Font: Direcció General de Carreteres)

2.3 MÈTODES DE PREVISIÓ DE DEMANDA. EL SIMCAT

2.3.1 Mètodes de previsió de demanda

El fi principal de tota política de transports és aconseguir satisfer la demanda de transport de persones i mercaderies (que a la vegada ve determinada per les polítiques d'ordenació del territori i de desenvolupament econòmic) amb la destinació de recursos mínima possible. La seva aplicació és referida sempre a un temps futur al moment al qual es presenta, pel què cal conèixer, per a avaluar-la, quin serà el futur comportament de la xarxa de carreteres.

La dada bàsica per a conèixer la situació futura de la circulació és la previsió de la demanda de trànsit, la qual s'obté mitjançant els mètodes de previsió de demanda. Per tal què la precisió dels resultats proporcionats per aquests mètodes sigui apropiada cal, per una banda, introduir-hi dades de trànsit disponibles que siguin de qualitat, i per altra, que el propi mètode tingui en consideració altres variables, l'evolució en el temps de les quals, es pugui preveure amb exactitud i en funció de les quals pugui determinar-se la variació futura del trànsit.

Segons el nombre de variables i de relacions entre elles, creix la complexitat dels mètodes de previsió, i amb ella el cost que suposa tant l'obtenció de dades per a la seva aplicació, com la realització de les previsions. En conseqüència, l'aplicació dels mètodes més complicats es justificarà als grans projectes, com el conjunt de la xarxa d'una zona àmplia, mentre que per a petites actuacions s'empraran mètodes més senzills, basats en extrapolacions de tendències observades en sèries temporals, si no es poden aprofitar els resultats obtinguts a uns altres estudis més costosos.

Els models de previsió de la demanda (els complexos) tracten de desenvolupar un model matemàtic que permeti determinar els viatges que es faran a una xarxa viària en funció d'una sèrie de variables tals com: característiques de la carretera, característiques socioeconòmiques dels viatgers, modes de transport alternatius, etc. Per a això s'obtenen les dades necessàries a partir de fonts estadístiques, aforaments i inventaris de carreteres, i els corresponents a les característiques dels viatges, s'aconsegueixen mitjançant enquestes de trànsit, les quals tenen com a missió determinar l'origen i destí d'aquests.

Existeixen diversos tipus de models de previsió de demanda, però els més habituals actualment són els seqüencials, als quals es suposa que el conductor decideix en primer lloc si fa o no el viatge, després quin serà el seu destí, després quin mode de transport farà servir i, finalment, quina serà la ruta escollida. En conseqüència, el model té una sèrie d'equacions que responen a aquestes decisions i a les què es té en compte l'elecció a l'etapa anterior i les variables explicatives.

Per a aprofundir sobre aquest i altres tipus de model de previsió de demanda i les seves característiques s'aconsella veure el capítol corresponent del treball de Kraemer et al. (1993).

2.3.2 EI SIMCAT

El SIMCAT (<http://www.mcrit.com/SIMCAT>) és el Sistema d'Informació i Modelització per a l'Avaluació de Polítiques Territorials de la Secretaria de Planificació Territorial, la qual pertany al Departament de Política Territorial i Obres Públiques de la Generalitat de Catalunya. Dins ell s'integra el model de previsió de la demanda del trànsit a les carreteres de Catalunya, concebut com a eina de suport a la Planificació Territorial. El model efectua previsions de trànsit a les carreteres a partir d'escenaris futurs macroeconòmics, demogràfics i d'activitats.

El SIMCAT no només considera variables relacionades amb característiques de les carreteres, sinó que inclou també un model d'avaluació multicriteri que parteix de quatre objectius polítics: vertebració territorial, protecció del medi, seguretat i eficiència de les carreteres. Aquests objectius polítics s'avaluen, respectivament, amb criteris d'accessibilitat, externalitats ambientals, accidentalitat i nivell de servei (congestió) de les vies. Per cada criteri s'han establert una sèrie d'indicadors que es calculen utilitzant tant les utilitats GIS especialitzades en xarxes de transport (NIS), com el model de demanda de trànsit integrats en el SIMCAT.

D'altra banda, el SIMCAT conté altres aplicacions, a més dels models de previsió i avaluació esmentats. Per exemple disposa d'utilitats de gestió i anàlisi de xarxes de transports, un gestor de bases de dades, eines d'anàlisi estadística i de mapificació, així com eines que possibiliten sortides gràfiques. Es manifesta, doncs, que es tracta d'una eina molt completa, més enllà d'ésser simplement un model de previsió de demanda de trànsit.

El sistema d'informació del SIMCAT és compatible amb els desenvolupaments en curs a la Direcció General de Carreteres en relació a Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG), en el sentit que comparteix el mateix model de dades. A més en el futur serà viable l'actualització de les bases de dades del SIMCAT des de la base pròpia de la DGC, o bé la transferència directa de resultats del SIMCAT al SIG de la DGC (per exemple previsions de trànsit en les vies).

El SIMCAT té com precedent el model SIET (2000), desenvolupat per encàrrec de l'Institut d'Estudis Territorials, que té l'àrea metropolitana de Barcelona (AMB) com a àmbit territorial.

El desenvolupament del model de demanda per Catalunya és la primera aplicació que la Secretaria per al Planejament Territorial fa utilitzant el Sistema SIMCAT i ha permès validar àmpliament les utilitats del Sistema: tant les utilitats de creació i gestió del graf de transports (infraestructures i serveis) com les utilitats d'anàlisi d'oferta de transports (accessibilitat a les infraestructures i serveis de transport) i de modelització de la demanda de trànsit.

2.3.3 Característiques del model de demanda del SIMCAT

Per tal de definir la xarxa de transports que s'utilitza al model de previsió de demanda, el SIMCAT incorpora un graf viari que conté en total uns 22.000 arcs i 12.500 nodes per Catalunya. A les comarques de l'AMB s'ha utilitzat un graf realitzat en base a cartografia 1:50.000 de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). El nivell de precisió i representativitat del graf a l'AMB és el requerit per exercicis de modelització a escala metropolitana. A la resta de Catalunya s'ha realitzat un graf viari a partir de cartografia 1:250.000 també procedent de l'ICC.

Les carreteres al graf són representades pel seu eix, que inclou els dos sentits de circulació, i se'ls ha assignat certa informació bàsica. Per una banda, s'han classificat les vies segons la seva funcionalitat en xarxa bàsica, xarxa comarcal i xarxa local i segons la seva tipologia en autopistes, vies preferents, autovies, carreteres de calçada única i carreteres de calçada doble. A partir d'aquesta informació s'han definit unes velocitats de flux lliure de cada via.

També s'ha incorporat al graf la nomenclatura nova de la xarxa bàsica, en base al mapa oficial de carreteres de Catalunya editat per l'ICC, i els trànsits històrics de base, segons les IMD històriques, procedents de la informació facilitada per l'Institut d'Estudis Territorials. Finalment s'ha afegit el valor de la capacitat de les vies, el qual es calcula segons el Manual de Capacitat americana.

El model utilitza les enquestes existents d'origen - destí per a conèixer els punts d'inici i final dels viatges que es realitzen a tot l'àmbit de Catalunya. La mobilitat obligada de tot el país es reflexa a les quatre enquestes EMO disponibles al moment d'introducció de les dades (anys 1981, 1986, 1991 i 1996), però la única enquesta disponible llavors sobre mobilitat no obligada (EMQ de 1996) fa referència només a l'àrea metropolitana de Barcelona i s'han de realitzar estimacions per a generalitzar els resultats a tot el territori. Queda patent, doncs, la manca d'informació referent a aquest punt i que és necessària, per altra banda, per a obtenir unes previsions de demanda generals i correctes per a tot Catalunya.

Pel què fa al trànsit de les carreteres, la dada d'intensitat mitja incorporada al model resulta insuficient per a concretar els espais temporals de màxima intensitat de cada via. Cal un grau de detall superior que faci referència als cicles de variació del trànsit de la xarxa, mencionats anteriorment.

En aquest sentit, actualment el SIMCAT genera matrius de viatges a l'hora punta del matí, gràcies a què, en base a les dades de 67 aforaments permanents de carreteres facilitades per la Direcció General de Carreteres de la Generalitat, s'han calculat amb anterioritat uns indicadors amb els quals s'ha establert una classificació senzilla de les

vies segons el nivell d'estacionalitat matinal del trànsit que suporten. Aquesta classificació s'utilitza per a definir un percentatge del trànsit total anual (IMD) que correspon al període d'anàlisi del model (hora punta del dia laborable).

No obstant això, aquesta classificació és bastant simple, ja que s'ha realitzat a partir d'una única variable, i sense una justificació matemàtica que garanteixi la idoneïtat dels resultats. D'altra banda, el SIMCAT, amb total seguretat, incorporarà en un futur pròxim matrius de generació en caps de setmana pel què es requerirà disposar per a llavors d'una classificació de les vies on es tinguin en compte altres criteris tècnics estacionals.

Per aquests dos motius es constata la necessitat d'un nou estudi molt més complet que l'anterior i de caràcter definitiu, que parteixi de les dades de les mateixes estacions d'aforament de la DGC però amb uns nous indicadors que avaluin el màxim nombre de variacions estacionals del trànsit. Aquest nou treball hauria de millorar la classificació actual, tot justificant els resultats amb una base matemàtica adient per a poder-los aplicar amb seguretat al model de previsió de demanda. Així mateix, també serviria per a omplir el buit existent pel que fa als viatges realitzats per la mobilitat no obligada, ja que aquests es donen majoritàriament en caps de setmana i èpoques vacacionals.

2.4 ESTUDIS PREVIS

Avui dia, el nombre d'estudis sobre la classificació i anàlisi de les carreteres catalanes, en base a raons del comportament estacional del trànsit, és reduït i els existents es troben poc desenvolupats. L'única classificació de la qual se n'ha pogut fer ús és la presentada per Kraemer et al. (1993) i que al llarg de la tesina es comentarà, la qual representa una divisió de diferents tipus de vies basada en l'experiència de molts anys de presa de dades de les vies a tot el conjunt de l'Estat Espanyol. No obstant, les conclusions que es poden fer d'ella són més aviat teòriques i no tenen una aplicació pràctica directa.

L'anàlisi del comportament estacional del trànsit que es portarà a terme al present estudi, contrastant les idees teòriques existents amb valors numèrics propis exclusivament de les vies catalanes, parteix de les idees bàsiques redactades a un informe esborrany que tracta sobre el tema (Secretaria per a la Planificació Territorial del DPTOP, 2000). En ell només s'inclouen, sense cap tipus de justificació matemàtica, uns càlculs bàsics de quatre indicadors estacionals i un principi d'agrupació orientatiu, però serveix per a definir, a grans trets, el camí a seguir en un treball exhaustiu com pretén ser aquest.

Aquest informe preliminar es troba inspirat, a la vegada, en un treball anterior enfocat cap a l'anàlisi de la demanda diferencial del trànsit a la xarxa de carreteres de Catalunya (Direcció General de Planificació i Acció Territorial, 1994). És en ell on es planteja, per primer cop, la necessitat de conèixer el comportament estacional del trànsit a les vies catalanes.

Existeix un altre treball d'estudi de l'estacionalitat en caps de setmana de les vies catalanes (Secretaria per a la Planificació Territorial del DPTOP, 2001), encarregat a la consultora CINESI, SL, del qual se'n poden aprofitar certes conclusions per a la tesina. No obstant, tampoc serà de gran ajuda perquè el seu punt de partida és una agrupació de les vies en base a la seva localització geogràfica, i no analitza les semblances de

comportaments del trànsit. A més, es centra únicament a l'estudi dels caps de setmana.

Finalment, existeix un estudi sobre peatge a l'ombra (*shadow toll*) realitzat sobre dues autopistes angleses (projecte de DBFO de l'A1 entre Alcombury i Peterborough i de l'A417/419 entre Swindon i Gloucester) que té com a objectiu la reconstrucció i validació de dades de trànsit mitjançant l'agrupació (*cluster*) dels dies de la setmana que presenten característiques de circulació similars (Riera et al., 1998). Les seves conclusions respecte l'ús de mètodes multivariant podran ser d'interès a la present tesina.

2.5 CONCEPTES MATEMÀTICS

2.5.1 Mètodes d'anàlisi multivariant

Per a assolir una classificació de qualitat a partir dels indicadors estacionals calculats es duran a terme diversos processos matemàtics o algebraics sobre les dades mitjançant el programa estadístic SPSS en la seva versió 10.1. Aquests processos són tres tècniques d'anàlisi multivariant i més concretament, l'anàlisi factorial, l'anàlisi cluster o d'aglomeració i l'anàlisi discriminant, encara que el vertaderament important perquè dóna sentit a la realització de la tesina és el segon d'ells. Tots tres es veuen en detall als corresponents capítols però a continuació es realitza una breu introducció als mateixos, segons el treball de Cuadras (1981).

L'anàlisi factorial és un mètode d'anàlisi multivariant que intenta explicar, segons un model lineal, un conjunt extens de variables observables mitjançant un nombre reduït de variables hipotètiques anomenades factors. L'origen de l'anàlisi es dóna en el camp de la Psicologia però realment apareix com a mètode matemàtic a partir del treball de Thurstone (1947), qui va establir la relació entre les correlacions de les variables i els coeficients de la matriu factorial.

L'anàlisi cluster és un mètode matemàtic de classificació d'individus i, en concret, la clusterització jeràrquica té el seu origen a la sistemàtica del regne animal i vegetal (amb la corresponent aparició de la terminologia pròpia de les Ciències Naturals, com ara són gènere, espècie, etc.). En línies generals, es pot dir que una classificació jeràrquica parteix d'un conjunt d'elements que han de ser agrupats. Es tracta d'obtenir successives particions (*clusterings*) organitzades en diferents nivells jeràrquics, essent cada partició formada per classes disjunctes (*clusters*). Els elements d'una mateixa classe deuen ser raonablement homogenis.

Aquesta anàlisi és un mètode pertanyent a la taxonomia numèrica, la qual es va començar a desenvolupar amb el treball de Sokal i Sneath (1963) però no ha pogut ser realment operativa fins l'aparició d'ordinadors d'alta capacitat i velocitat. L'anàlisi parteix d'una matriu de semblances entre els individus i ofereix com a resultat una jerarquia indexada, que no és més que la representació gràfica de la classificació final (dendograma). Per arribar a aquesta cal aplicar una algorisme de classificació, com es veurà al capítol corresponent.

L'anàlisi discriminant és un mètode d'anàlisi multivariant que apareix amb el treball de Fisher (1936). És un mètode també classificador però que parteix d'una base probabilística per tal d'agrupar els elements. Al present estudi s'utilitza com a mètode confirmatori dels resultats proporcionats per l'anàlisi cluster.

2.5.2 Conceptes matemàtics auxiliars

A continuació es descriuen certs conceptes o eines matemàtiques que, per la seva presència al llarg de la tesina convé explicar des d'un bon començament. Només es pretén mostrar les idees fonamentals de cada un d'ells i per a aprofundir-hi es remet al lector a qualsevol llibre d'estadística bàsica, com pot ser el Cánovas (1988).

- Mesures de tendència central i dispersió:

Existeixen dues mesures d'interès per a qualsevol conjunt de dades: la localització del seu centre i la seva variabilitat. La tendència central d'un conjunt de dades és la disposició d'aquests per a agrupar-se al voltant del seu centre i la variabilitat és la dispersió de les observacions al conjunt.

La mesura principal de la tendència central és la mitja. La mitja de les observacions x_1, x_2, \dots, x_n és el promig aritmètic d'aquestes i es calcula segons

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad [2.1]$$

S'ha de tenir en compte que, donat que qualsevol observació del conjunt s'utilitza pel càlcul de la seva mitja, aquesta pot veure's afectada de manera desproporcionada per l'existència d'alguns valors extrems.

Per a mesurar la dispersió de les dades existeixen diverses eines molt útils però la més coneguda i utilitzada és la variança (σ^2). Aquesta és el promig dels quadrats de les desviacions de cadascuna de les observacions a la mitja. Si els valors es troben molt concentrats les desviacions respecte la mitja seran molt petites, i en conseqüència, els seus quadrats també ho seran. Si s'eleva les distàncies al quadrat s'evita que les desviacions negatives es compensin amb les positives.

No obstant això, des d'aquest punt de vista, la variança tendeix a exagerar la dispersió real dels valors. En aquest sentit, una altra alternativa per a mesurar la dispersió, que esmorteix aquest efecte, és la desviació típica (σ) [2.2], que es defineix com l'arrel quadrada de la variança. L'avantatge que presenta aquesta desviació típica o estàndard és que s'expressa en les mateixes unitats que les dades.

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad [2.2]$$

Quan s'interpreta aquest valor de la desviació s'ha de tenir en compte que depèn de la magnitud dels valors observats, és a dir, un mateix valor de la desviació estàndard pot ser gran o petit en funció dels valors numèrics de la variable analitzada. Per això, utilitzant el coeficient de variació, definit com el quocient entre la desviació típica i la mitja, es podrà avaluar si aquesta desviació és gran o petita i comparar dispersions relatives de sèries de valors mesurats amb unitats diferents. Aquest valor es pot entendre com la desviació en percentatge respecte la mitja.

- Distribució de mostreig de \bar{X} :

Aquest punt tracta el càlcul dels estadístics de tendència central i dispersió de la mitja d'un conjunt de variables aleatòries independents. Sigui X_1, X_2, \dots, X_n un conjunt de variables aleatòries amb mitges $E(X_i)=\mu_i$ i variàncies $Var(X_i)=\sigma_i^2$, per a $i = 1, 2, \dots, n$. Si

$$Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \quad [2.3]$$

amb a_1, a_2, \dots, a_n constants, llavors es té que

$$E(Y) = a_1 \mu_1 + a_2 \mu_2 + \dots + a_n \mu_n \quad [2.4]$$

$$Var(Y) = a_1^2 \sigma_1^2 + a_2^2 \sigma_2^2 + \dots + a_n^2 \sigma_n^2 \quad [2.5]$$

D'aquesta manera es complirà per a \bar{X} les expressions [2.7] i [2.8] següents:

$$\bar{X} = (X_1 + X_2 + \dots + X_n) / n \quad [2.6]$$

$$E(\bar{X}) = (\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n) / n \quad [2.7]$$

$$Var(\bar{X}) = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2) / n^2 \quad [2.8]$$

- Gràfics *box-plot* o diagrama de caixa:

Aquesta és una eina molt utilitzada al llarg de la tesina perquè permet d'una forma ràpida i directa estudiar la localització i dispersió relativa de les dades d'una mostra. Es caracteritza per un rectangle que té com a extrem inferior el primer quartil de la mostra (o Q_3 , és a dir, el percentil 25, valor tal que al menys un 25% de les dades són menors o iguals que ell) i com a extrem superior el tercer quartil (o Q_1 , el percentil 75). Dins ell s'indica amb una línia la posició del segon quartil o mitjana. L'alçada de la caixa representa l'amplitud interquartil (Q_3-Q_1) i hi és representat el 50% de la mostra. Finalment surten per cada banda de la caixa unes tires que tenen com a longitud màxima una vegada i mitja l'amplitud interquartil.

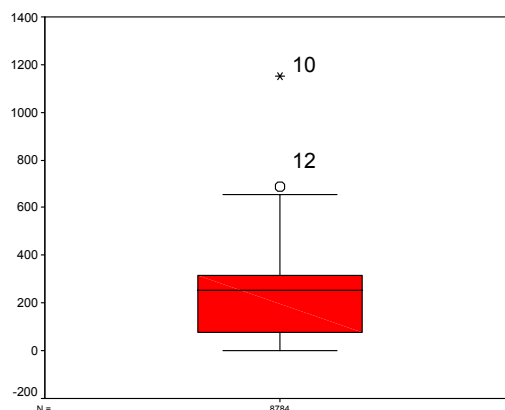


Fig. 2.2 Gràfic *box-plot* tipus

El diagrama de caixa permet visualitzar l'existència de valors atípics o *outliers*, que seran aquells valors que no es trobin en l'interval delimitat pels límits de les tires. El SPSS marca amb una O els valors atípics que es trobin allunyats entre 1,5 i 3 vegades l'amplitud interquartil de l'extrem de la caixa i amb una * els que es trobin a més de 3 vegades l'amplitud interquartil. El *box-plot* és útil perquè detecta els valors que tenen un comportament diferenciat de la resta d'individus de la mateixa classe. Aquests valors s'han d'analitzar individualment i amb cura perquè es surten de la pauta normal i podrien respondre a un possible error en les dades. A la figura 2.2 es representa un gràfic *box-plot* característic.

- Tipificació o reducció de variables:

S'entén per tipificació d'una variable un conjunt de possibles transformacions que es poden dur a terme sobre les mateixes de forma que esdevenen independents de les unitats de mesura. Les més comuns són la estandardització i la canonització, malgrat que a la tesina només s'aplicarà la primera d'elles. Ambdues operacions es detallen a continuació:

- Estandardització: la variable passa a tenir mitja nul·la i desviació igual a la unitat.

$$y_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad [2.9]$$

on \bar{x} és la mitja de la variables i s és la seva desviació estàndard.

- Canonització: s'igualen els recorreguts de la variable a l'interval [0,1].

$$y_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad [2.10]$$

on $\max(x)$ i $\min(x)$ són els valors màxims i mínims de la variable.

- Coeficients de correlació:

Si es tenen dues variables X i Y que es poden distribuir de forma conjunta es pot calcular un altre estadístic, en la línia de la variança i la desviació estàndard vistos abans. És el que rep el nom de covariança de X i Y , i mesura la variabilitat conjunta de les dues variables. D'aquesta forma, la covariança és una mesura d'associació entre els valors de X i de Y i les seves respectives dispersions. Si, per exemple, es té una alta probabilitat de què valors grans de X es trobin associats amb valors grans de Y la covariança serà positiva. En canvi, si existeix una alta probabilitat de què valors grans de X es trobin associats amb valors petits de Y o viceversa la covariança serà negativa. Es pot demostrar també que la covariança s'anul·larà si les variables són independents.

Si aquest estadístic es divideix pel producte de les desviacions estàndard de X i de Y , el resultat és un valor sense dimensions que rep el nom de *coeficient de correlació* i que es representa per $\rho(X,Y)$. Es pot demostrar que aquest coeficient es troba contingut dins l'interval [-1, 1]

$$\rho(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad [2.11]$$

El què s'aconsegueix amb aquest coeficient és estandarditzar l'associació lineal que existeix entre les variables X i Y en relació a les seves dispersions. El valor $\rho = 0$ indica l'absència de qualsevol associació, mentre que els valors -1 i $+1$ indiquen relacions lineals perfectes negativa i positiva, respectivament.

Quan s'estudien les relacions entre diverses variables alhora es poden representar els *coeficients de correlació* en una matriu, amb la qual es reflecteixen totes les combinacions possibles entre elles. Aquesta matriu s'anomena *matriu de correlacions*.

Si amb el càlcul del coeficient de correlació es realitza un test d'hipòtesi per a contrastar els resultats probabilísticament es parla llavors de *coeficients de correlació de Pearson*, però el significat de les correlacions no varia.