

8. MÈTODE D'AVALUACIÓ DEL SOROLL FERROVIARI

En aquest apartat es descriu el mètode d'avaluació del soroll en què es basaran bona part dels càlculs d'aquest treball. Posteriorment, es descriurà com es tractarà aquest mètode, quina metodologia de treball es seguirà i quines expressions se li afegiran per tal d'aconseguir dibuixar les diferents línies isòfones que componen els mapes estratègics.

8.1. MÈTODE DEL C.E.R.T.U.

El mètode escollit per a l'elaboració dels mapes estratègics està àmpliament reconegut per avaluar el soroll ferroviari i és utilitzat per nombroses institucions i empreses consultores en temes ambientals. Es tracta d'un model de previsió del soroll ferroviari presentat per la institució francesa Centre d'Etudes du Transports Urbains (C.E.R.T.U.) [12]. Aquest és un mètode simplificat que permet obtenir el nivell d'immissió sonora total en dBA en un punt proper a una via fèrria a partir de la posició d'aquest respecte la via, el nombre de trens, la seva categoria i la velocitat de circulació en el període considerat. A partir d'aquestes dades, proposa un esquema de càlcul relativament senzill i amb uns passos clarament exposats i ordenats de forma que per complir un d'ells s'han d'haver calculat els anteriors.

En el nostre cas, i com es veurà més endavant, s'hauran de realitzar diversos canvis en el procés presentat pel C.E.R.T.U. ja que per elaborar els mapes partirem d'un nivell sonor i extraurem una distància, després de fixar tota la resta de paràmetres.

El mètode del C.E.R.T.U. és una formulació que està basada en estudis experimentals, fruit de nombroses mesures efectuades amb diferents trens i en diferents vies de la xarxa de ferrocarrils francesa. El mètode permet obtenir un ordre de magnitud del nivell sonor de ± 5 dBA, tot i que el rang de validesa és limitat i el model no s'adapta bé a situacions de propagació complexes (grans distàncies, topografia irregular, reflexions múltiples, etc.).

8.1.1. Hipòtesis del mètode

Per aplicar aquest mètode s'han de complir sempre les següents hipòtesis:

- Circulacions a camp obert sobre carrils soldats i continus i vies amb travesses de formigó i subjeccions clàssiques.
- Distàncies no superiors a 250 m de la via.
- Velocitats superiors a 40 km/h i inferiors a 200 km/h.
- Terreny pla i acústicament reflectant.
- Via rectilínia i infinitament llarga.
- Inexistència de grups d'edificis o altres elements reflectants.

No totes les hipòtesis anteriors són igual de restrictives. En el cas que el terreny no sigui acústicament reflectant, l'efecte del sòl es pot tenir en compte a partir de les corbes incloses en el mètode detallat per carreteres. Pel que fa a la heterogeneïtat del traçat de la via es pot dividir aquesta en trams homogenis i

aplicar la correcció de l'efecte de l'extensió finita, i si la via no està a camp obert perquè hi ha una façana, es pot realitzar una correcció degut a la façana (veure apartat 8.1.4). També existeixen àbacs per avaluar l'eficàcia de les barreres o les pantalles situades a 3 o 5 metres del rail més proper i d'alçades compreses entre 1,5 i 3 metres.

En el cas de grans distàncies o velocitats el mètode no permet extrapolar els resultats i, davant d'una topografia irregular o la presència de reflexions complexes (un grup d'obstacles reflectants, com per exemple un conjunt d'edificis), el mètode no presenta solucions.

Malgrat aquestes limitacions durant el procés que ens conduirà a dibuixar i interpretar els mapes, assumirem de forma suficientment raonada alguna d'aquestes hipòtesis encara que no es compleixi de forma exacta.

8.1.2. Esquema de càlcul

El primer pas que pren aquest mètode simplificat de càlcul del soroll ferroviari és distingir quatre categories de trens que es descriuen seguidament:

- Trenns curts de rodalies i metros
Longitud total entre 160 i 200 metres (2 o 3 unitats d'uns 80 metres cadascuna)
Velocitat de l'ordre de 120 km/h
- Trenns de viatgers de llarg recorregut
Longitud mitja de 250 metres (12 vagons)
Velocitat màxima de 160-200 km/h
- Trenns de mercaderies
Longitud mitja de 400-500 metres i màxima de 750 metres
Velocitat màxima de 80-100 km/h
- Mecanismes aïllats
Longitud mitja de 50-100 metres
Velocitat màxima de 120-160 km/h

Després, amb l'objectiu d'avaluar l'exposició al soroll al voltant d'una determinada línia ferroviària, a més de comptar el nombre de trens pertanyents a cada categoria que hi circulen i escollir el període de temps d'interès, s'ha de seguir el següent procés:

- calcular el nivell sonor màxim d'un tren, $L_{Amàx}$, en funció de la distància i posició del receptor respecte la via, de la velocitat i del tipus de tren (categoria).
- calcular el nivell sonor equivalent d'un tren, L_{Aeq} (1 tren), a partir del $L_{Amàx}$ i del temps d'exposició (t_e) del receptor al pas d'un tren.
- calcular el nivell sonor equivalent del conjunt de trens, L_{Aeq} (n trens), de l'esmentada categoria que circulen en un període de temps T.

Un cop calculat el L_{Aeq} (n trens) de cada categoria (amb o sense les correccions esmentades), el nivell sonor equivalent per un trànsit real, L_{Aeq} (total), s'obté de la combinació o suma energètica dels nivells sonors de cadascuna d'elles.

8.1.3. Nivell sonor màxim al pas d'un tren: $L_{Amàx}$

El nivell sonor màxim al pas d'un tren $L_{Amàx}$, representat a la figura 8.1, és el nivell sonor mig del soroll màxim corresponen al pas dels vehicles per davant del receptor. Aquest nivell depèn del tipus de tren, de la seva velocitat, de la distància des d'on es pren la mesura i de la correcció eventual de directivitat (segons la posició de l'observador). El $L_{Amàx}$ es mesura per acord internacional a 7,5 metres, a 15 metres i a 25 metres de l'eix de la via ferroviària.

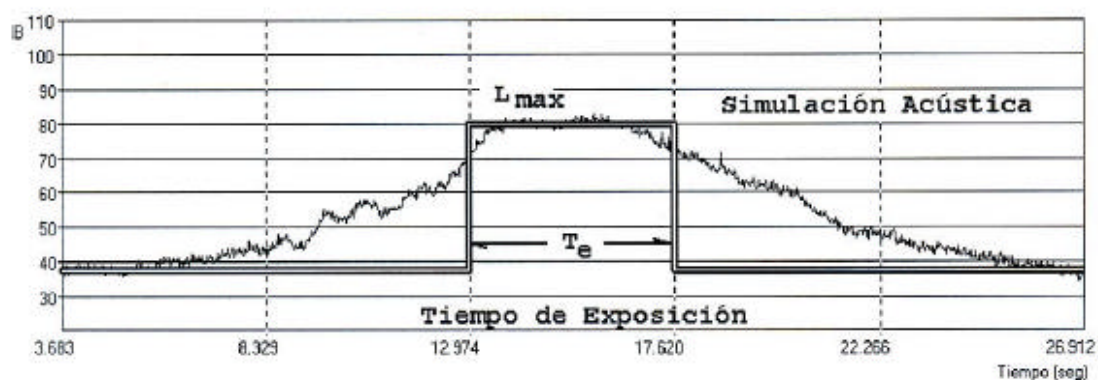


Figura 8.1 Representació gràfica de $L_{Amàx}$ (extret de [7])

El $L_{Amàx}$ d'un tren, percebut per un receptor situat a camp obert, es calcula a partir de la següent fórmula:

$$L_{Amàx} = L_0 - K \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 30 \cdot \log\left(\frac{v}{v_0}\right) - K_d \quad (8.1)$$

- on:
- L_0 = nivell sonor de referència emès per un tipus de tren determinat circulant a una velocitat v_0 , que percep un receptor situat a una distància d_0 i a una altura normalitzada h_0 , en dBA.
 - K = coeficient multiplicador de la funció distància que depèn de la longitud del tren.
 - d = distància entre el receptor i l'eix de la via ferroviària, en m.
 - d_0 = distància de referència del receptor per a calcular L_0 , en m.
 - v = velocitat de circulació del tren, en km/h.
 - v_0 = velocitat de referència del tren per a calcular L_0 , en km/h
 - K_d = correcció per directivitat.

Com ja s'ha comentat anteriorment, aquesta formulació és aplicable dins d'un cert rang de validesa: distàncies del receptor inferiors a 250 metres de la via, velocitats de tren entre 40 i 200 km/h i circulacions en camp obert sobre rails soldats i continus, travesses de formigó i subjeccions clàssiques.

El nivell de referència (L_0) emès per un tren a una velocitat determinada no només depèn del tipus de tren sinó també de la infraestructura i el seu estat. La taula 8.1, extreta de la guia publicada pel C.E.R.T.U., indica el valor del nivell

8. MÈTODE D'AVALUACIÓ DEL SOROLL FERROVIARI

de referència, per a cada tipus de tren, en funció de la velocitat (km/h) i la distància (m). Generalment, la distància de referència es considera de 25 metres, tot i que també s'inclouen els nivells sonors observats a 7,5 i 15 metres. Aquests valors són experimentals i tenen una precisió de ± 5 dBA. Aquesta dispersió es deu fonamentalment a les variacions del nivell emès degut a l'estat del material ferroviari i de la via.

Categoria de tren	Velocitat (km/h)						
	60	80	100	120	140	155	200
Trens curts, rodalies i metros d = 7,5 m d = 15 m do = 25 m	79 75 72						
Trens de llarg recorregut d = 7,5 m d = 15 m do = 25 m					97 94 92		104 100 97
Trens de mercaderies d = 7,5 m d = 15 m do = 25 m		93 89 86	96 92 89				
Mecanismes aïllats d = 7,5 m d = 15 m do = 25 m				92 88 85		96 91 89	

Taula 8.1 Nivells de referència L_0 , en dBA (extret de [11])

Els valors que aquí es mostren són vàlids i estan mesurats pels tren que circulen per les línies franceses. Aquests valors són el resultat d'experiments i observacions realitzades en laboratori. Això fa que presentin una certa variabilitat en funció de les característiques de la línia i el tipus de tren que s'estigui estudiant. En concret, pels valors de la taula 8.1, el C.E.R.T.U. accepta una variabilitat de 5 dBA en ambdós sentits que permet adaptar-los a condicions específiques diferents a les condicions de càlcul.

A partir d'aquest nivell de referència, la fórmula (8.1) té en compte diversos factors com l'atenuació deguda a la distància, la influència de la velocitat i el fenomen de la directivitat.

En primer lloc, nombroses mesures efectuades a camp obert amb trens de composició i velocitat molt variada permeten proposar la següent llei experimental de propagació aèria del soroll ferroviari per calcular l'atenuació produïda per la distància:

$$L_d = L_0 - K \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + K' \quad (8.2)$$

on: L_d = nivell sonor a la distància d en dBA
 L_0 = nivell sonor a la distància d_0 en dBA
 K' = paràmetre que depèn de la velocitat i la directivitat

8. MÈTODE D'AVALUACIÓ DEL SOROLL FERROVIARI

Per simplificar els càlculs, els factors geomètrics d'atenuació (longitud del tren) i els efectes d'absorció de l'aire estan integrats en el valor de K, fixat mitjançant estudis experimentals. Aquest coeficient pren valors entre 10, equivalent a una font lineal infinita de propagació cilíndrica, i 20, que correspon a una font puntual de propagació esfèrica. Els valors considerats per a cada tipus de tren es resumeixen en la següent taula:

TIPUS DE TREN	COEFICIENT
Font lineal infinita de propagació cilíndrica Trens molt llargs, vistos per un receptor situat suficientment a prop de la via de manera que la font sembli infinita	K = 10
Trens de mercaderies (trens llargs)	K = 12
Trens grans línies (longitud mitja)	K = 15
Metros de gran gàlib	14 = K = 16
Metros de gàlib petit	K = 16
Trens curts de rodalies	K = 17
Font puntual de propagació esfèrica Mecanismes aïllats	K = 20

Taula 8.2 Coeficient K segons el tipus de tren (extret de [11])

Per altra banda, la velocitat provoca una variació del nivell sonor que s'expressa mitjançant la següent fórmula:

$$L = L_0 + 30 \cdot \log\left(\frac{v}{v_0}\right) + K'' \quad (8.3)$$

El fenomen de la directivitat en el pla vertical es recull a la fórmula del $L_{Amàx}$ mitjançant el paràmetre de directivitat (K_d), que en les fórmules anteriors s'ha descompost en els paràmetres K' i K'' . Els valors de K_d són els que apareixen a l'àbac i la taula resum de la figura 8.2 segons l'angle sota el qual el receptor observa la via.

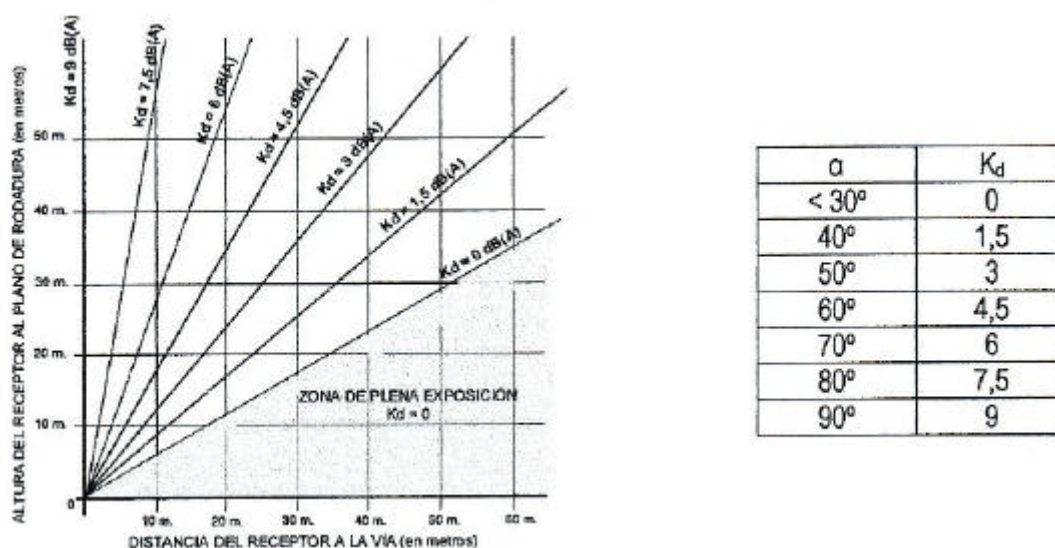


Figura 8.2 Àbac i taula resum dels valors del paràmetre K_d (extret de [9])

El mètode del C.E.R.T.U. no considera la directivitat en el pla horitzontal ja que l'objectiu principal del mètode és la determinació del L_{Aeq} i, donat que el període d'integració del mateix és sempre superior al del pas d'un tren, la directivitat horitzontal no es considera rellevant. Aquesta atenuació s'hauria de considerar si es tractés d'un estudi rigorós dels nivells màxims.

8.1.4. Nivell sonor equivalent al pas d'un tren: L_{Aeq} (1 tren)

El nivell sonor equivalent al pas d'un tren, L_{Aeq} (1 tren), expressat en dBA, es considera representatiu de la molèstia causada a la població pel soroll i representa la mitja de l'energia acústica percebuda durant el període T.

El L_{Aeq} (1 tren) es calcula mitjançant la següent fórmula:

$$L_{Aeq(1tren)} = 10 \cdot \log \left(\frac{t_e}{T} \cdot 10^{\frac{L_{Amàx}}{10}} \right) \quad (8.4)$$

on: $L_{Amàx}$ = nivell sonor màxim, en dBA
 T = període d'estudi, en s
 t_e = temps d'exposició, en s

La signatura temporal del soroll al pas d'un tren és relativament estable, amb una pendent de creixement que augmenta amb la velocitat del vehicle. El temps d'exposició (t_e) equival a l'interval temporal transcorregut entre l'aparició i la desaparició del soroll. Tot i així, aquesta duració no depèn únicament de l'esmentada signatura temporal, sinó també de l'ambient sonor exterior (soroll ambiental). Amb la finalitat d'evitar aquesta dependència, el temps d'exposició es defineix, per convenció, com el temps durant el qual es percep un nivell sonor almenys igual al nivell màxim disminuït en 10 dBA. Aquest temps pot calcular-se a partir de la longitud del tren, la seva velocitat i la distància del receptor a la via. En la següent figura es mostra la representació del temps d'exposició dintre de la signatura temporal del pas d'un tren.

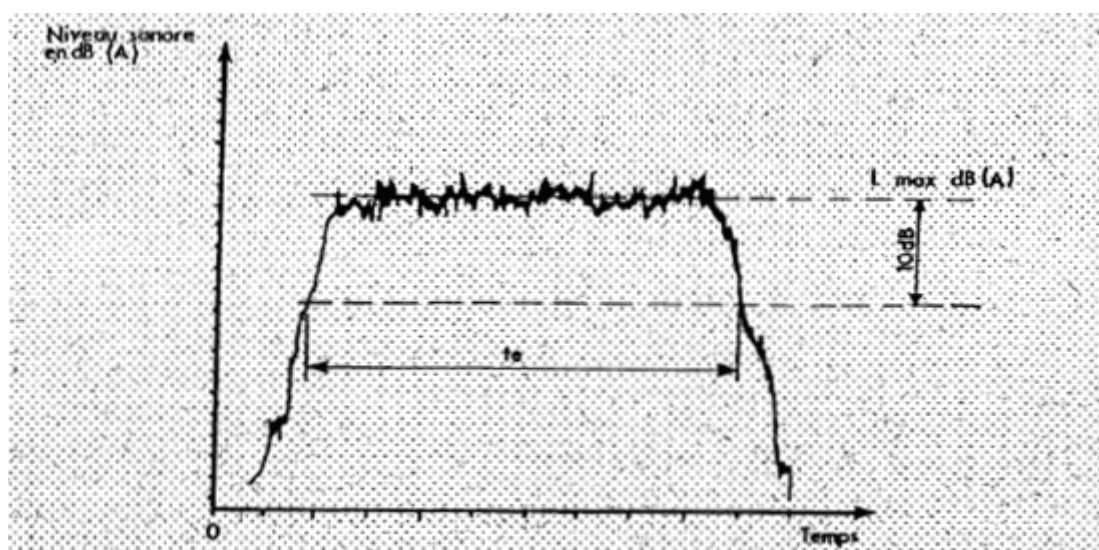


Figura 8.3 Temps d'exposició al pas d'un tren (extret de [7])

El mètode del C.E.R.T.U. proposa les dues fórmules següents pel càlcul del temps d'exposició:

$$t_e = \frac{l}{v} \cdot \left[\left(\frac{2d}{l} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} ; \quad t_e = \frac{l}{v} + \frac{6d}{100} \quad (8.6)$$

on: t_e = temps d'exposició a nivells de soroll superiors a $L_{A\max} - 10$ dBA, en s
 l = longitud del tren, en m
 v = velocitat del tren, en m/s
 d = distància de l'observador a la via, en m

Tot i poder utilitzar les dues fórmules, el C.E.R.T.U. recomana la utilització de la segona.

En aquest punt convé recordar que el mètode que s'està explicant es basa en l'assumpció de certes hipòtesis. En el cas que no es compleixin, cal introduir algunes modificacions. A continuació, s'introdueixen les dues modificacions més freqüents que corregeixen simplificacions que s'assumeixen habitualment en l'estudi d'una línia ferroviària.

La primera intenta millorar la hipòtesi d'un sòl acústicament reflectant. En el cas que no es compleixi aquesta hipòtesi i tinguem un sòl absorbent, es produirà una reducció del soroll per efecte de l'absorció del sòl i haurem de realitzar una correcció del valor obtingut. Aquesta atenuació suplementària es pot calcular mitjançant l'àbac de la figura 8.4 proposat pel C.E.R.T.U. en l'apartat de la guia dedicat al càlcul detallat del soroll provocat per les carreteres. L'àbac permet conèixer l'atenuació suplementària en dBA deguda als efectes d'un sòl no reflectant i en funció de la distància del receptor a la via i de la seva alçada respecte el terreny.

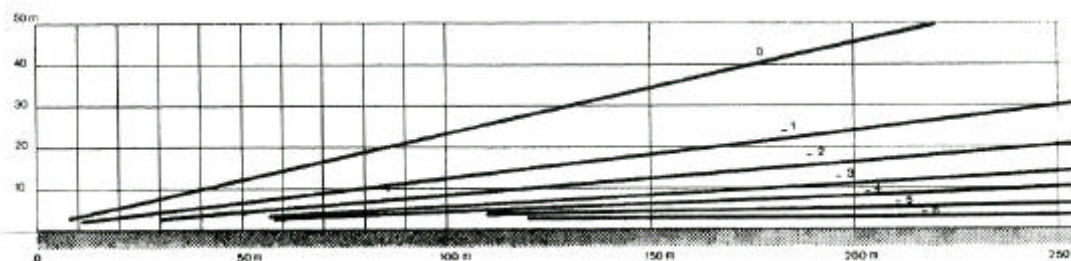


Figura 8.4 Reducció del soroll per efecte de l'absorció del sòl (extret de [11])

La segona modificació contribueix a corregir el fet que el nivell sonor equivalent al pas d'un tren, L_{Aeq} (1 tren), obtingut amb la fórmula 8.4, és a camp obert. Això fa que s'hagi d'efectuar una correcció quan el punt considerat es trobi davant d'una façana. En aquesta situació, es produeix un augment del soroll ja que les ones sonores es reflecteixen sobre la façana, retornen en direcció al seu origen i s'afegeixen al soroll emès pel tren segons després. Aquesta avaluació es realitza a 2 m de la façana i, per tal de tenir en consideració el seu efecte de

reflexió explicat en aquest mateix apartat, s'han de sumar 3 dBA al nivell sonor resultant si aquest s'ha obtingut mitjançant la fórmula general.

En el cas que l'edificació no sigui paral·lela a la via o existeixin obstacles entre la via i el punt d'avaluació s'haurà de realitzar una altra correcció, anomenada correcció per extensió finita, ja que el receptor només percep soroll de la via de forma parcial. Aquesta correcció és funció de l'angle (en el pla horitzontal) amb què l'observador veu la via (veure figura 8.5). Aleshores el nivell sonor es pot calcular de la següent manera:

$$L_{Aeq}(\theta) = L_{Aeq}(180^\circ) - 10 \cdot \log\left(\frac{\cos \alpha + \cos \beta}{2}\right) \quad (8.7)$$

on: $L_{Aeq}(\theta)$ = nivell sonor equivalent a una distància d i sota un angle θ
 $L_{Aeq}(180^\circ)$ = nivell sonor equivalent a distància d i sota un angle pla
 θ = l'angle sota el qual l'observador veu la via en graus

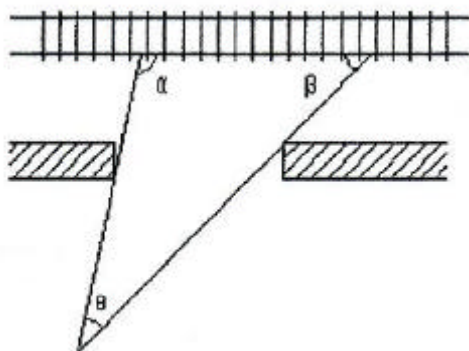


Figura 8.5 Efecte de l'extensió finita (extret de [9])

8.1.5. Nivell sonor equivalent al pas de N trens: $L_{Aeq}(n \text{ trens})$

Un cop conegut el nivell sonor equivalent al pas d'un sol tren, ara es pot calcular el nivell sonor equivalent al pas de n trens de la mateixa categoria mitjançant la següent expressió:

$$L_{Aeq}(n \text{ trens}) = L_{Aeq}(1 \text{ tren}) + 10 \cdot \log(n) \quad (8.8)$$

on: $L_{Aeq}(1 \text{ tren})$ = nivell sonor equivalent al pas d'un sol tren
 $L_{Aeq}(n \text{ trens})$ = L_{Aeq} = nivell sonor equivalent al pas de n trens
 n = nombre de trens d'una mateixa categoria

8.1.6. Determinació del nivell sonor equivalent pel trànsit real: $L_{Aeq}(\text{total})$

Finalment, el nivell sonor equivalent de tots els trens que passen per la via ferroviària és la suma logarítmica de cadascun dels nivells sonors equivalents de cada categoria:

$$L_{Aeq(total)} = 10 \cdot \log \left(\sum_i 10^{\frac{L_{Aeq,i}}{10}} \right) \quad (8.9)$$

on: $L_{Aeq,i}$ = nivell sonor equivalent de la categoria i.