

1. Resum

El projecte determina les repercussions mediambientals lumíniques d'una renovació d'instal·lacions d'enllumenat públic determinades. Aquest es particularitza en un anàlisi de l'impacte mediambiental lumínic que suposen un conjunt de canvis als carrers del municipi de Deltebre.

Durant l'anàlisi de l'impacte s'ha considerat convenient analitzar com afectaven els diversos factors de les instal·lacions com a element emissor de contaminació lumínica.

De forma posterior a l'anàlisi mediambiental d'aquest procés, s'ha comparat breument els canvis apreciats en les mesures de brillantor de l'esfera celeste.

Els contingut del projecte s'han desenvolupat a través de:

- Un anàlisi des del marc teòric de la contaminació lumínica.
- L'estudi i quantificació de les instal·lacions d'enllumenat com a focus de contaminació mitjançant diversos vectors mediambientals, principalment l'Emissió de Flux Superior o EFS.
- A continuació s'ha aplicat el model obtingut a la renovació d'instal·lacions realitzades durant el 2013 al Delta de l'Ebre.
- Per tal d'obtenir una monitorització dels canvis produïts s'ha realitzat mesures del fons celeste així com un breu anàlisi de les mateixes.
- Un anàlisi mediambiental del projecte.
- Un pressupost d'acord a la seva planificació.
- Unes conclusions i resum de resultats.

Sumari

1. RESUM	1
SUMARI	3
2. GLOSSARI	5
3. PREFACI	7
3.1. Origen del projecte	7
3.2. Motivació.....	7
4. INTRODUCCIÓ	9
4.1. Contextualització	9
4.2. Objectius del projecte	10
4.3. Abast del projecte	10
5. CONTAMINACIÓ LUMÍNICA	11
5.1. Definició de la Contaminació Lumínica	11
5.2. El focus contaminant: L'Enllumenat	11
5.3. Afectacions de la contaminació Lumínica	12
5.4. Quantificació del resplendor Iluminós	15
5.4.1. Determini dels factors per mesurar els elements causants del resplendor celeste.....	15
5.4.2. Mesura del resplendor Iluminós.....	18
6. ANÀLISI DE L'EFS	23
6.1. Introducció a la regressió lineal.....	23
6.2. Parametrització del model estadístic	27
6.2.1. Origen de les dades.....	27
6.2.2. Variables Originals.....	28
6.3. Selecció de variables per a la regressió lineal	30
6.3.1. Variables qualitatives.....	31
6.3.2. Variables quantitatives	31
6.4. Regressió Lineal.....	32
6.5. Anàlisi de sensibilitat del model	35
7. CAS PRÀCTIC D'ESTUDI: APLICACIÓ AL DELTA DE L'EBRE	39
7.1. Descripció de l'entorn	39
7.2. Anàlisi de l'estat actual i futur de les instal·lacions	41

7.2.1.	Característiques dels carrers	41
7.2.2.	Consideracions inicials sobre làmpades i lluminàries	43
7.2.3.	Situació inicial	45
7.2.4.	Situació final.....	49
7.3.	Aplicació del model estadístic	53
7.4.	Taula resum de les característiques de les instal·lacions	55
7.5.	Conclusions sobre els resultats	55
7.6.	Comparació de l'indicador obtingut amb l'aproximat.....	56
8.	MESURES DEL FONS CELESTE AMB SQM _____	59
8.1.	Punt de mesura continuo	59
8.2.	Mesures puntuals disperses	63
8.3.	Resum de resultats	68
9.	ANÀLISIS DE L'IMPACTE AMBIENTAL DEL PROJECTE _____	69
9.1.	Introducció	69
9.2.	Potencial quantificador de l'impacte mediambiental del projecte.....	69
9.2.1.	Selecció de polítiques de gestió de les instal·lacions	69
9.2.2.	Alternatives en actuacions puntuals sobre les instal·lacions.....	70
9.3.	Resultats de l'estudi d'impacte ambiental del projecte	72
10.	PRESSUPOST _____	73
11.	CONCLUSIONS _____	79
12.	AGRAÏMENTS _____	81
13.	BIBLIOGRAFIA _____	83
13.1.	Referències bibliogràfiques.....	83
13.2.	Bibliografia complementària.....	84

2. Glossari

Brillantor superficial. Concepte emprat en astronomia per descriure la brillantor aparent d'objectes astronòmics extensos (a diferència de les estrelles que apareixen com un punt) com galàxies o nebuloses. Es mesura en magnituds per arc segon al quadrat [$\text{mag}/\text{arc}\cdot\text{s}^2$].

Brillantor de l'esfera celeste. Brillantor superficial del conjunt del cel mesurada des d'un punt d'observació.

Contaminació Lumínica (també C.L.). S'anomena contaminació lumínica a la brillantor del cel nocturn produïda per la difusió de la llum artificial. Aquesta brillantor es deu en part a la qualitat i orientació dels components de l'enllumenat exterior tant públic com privat així com a la reflexió de la llum en les zones il·luminades. És llum que no s'aprofita per il·luminar les zones previstes i s'envia a l'esfera celeste.

Emissió de Flux Superior (també EFS). Quantitat de flux lumínic que escapa d'una ciutat cap a la cúpula celesta. És a dir, la quantitat de llum que contamina el cel. Es comptabilitza en lúmens i representa el nivell de contaminació d'un cas d'estudi.

Grau Relatiu d'emissió (també GRE). Magnitud construïda a partir de l'EFS que corregeix el valor de l'EFS tenint en consideració l'espectre lumínic de les làmpades, ja que influeix en la dispersió de la llum a l'atmosfera.

Flux lumínic. És la quantitat d'energia radiant que afecta la sensibilitat de l'ull humà, emesa per unitat de temps. És una unitat de potència lumínica i es mesura en lúmens [lm].

Flux Total Instal·lat (també FTI). Flux lumínic mesurat en lúmens, de tot l'enllumenat instal·lat que s'ha tingut en consideració.

Model estadístic. Expressió simbòlica en forma d'equació que s'empra en dissenys experimentals i regressió per tal d'indicar els diversos factors que modifiquen una determinada variable de resposta.

Interdistància. Distància mesurada entre punts de llum ubicats en un mateix cantó, així doncs, el doble de la distància entre punts de llum quan aquests estan alternats.

Il·luminància. És habitualment denominada nivell de d'il·luminació, o senzillament il·luminació. Com a unitat de mesura s'empra el lux [lx], que es defineix com un lumen reflectit sobre una superfície de 1 m^2 .

Llum intrusa. Es defineix com aquella que provenint de l'enllumenat exterior, s'introdueix en la vida privada de qualsevol ésser viu destorbant la vida domèstica influint en els cicles de la son per exemple.

Lumen [lm]. Unitat de mesura del flux lumínic. Es defineix com $1/680 \text{ W}$ emesos en la longitud d'ona dels 555 nm , que correspon a la màxima sensibilitat de l'ull humà.

Luminància. Correspon, com a magnitud física, al que es denomina, sota el punt de vista de la sensació “brillantor d’una superfície”. Indica la relació entre la intensitat lluminosa que emet una superfície en una direcció determinada i l’àrea de la superfície vista per un observador situat en la mateixa direcció. S’acostuma a mesurar en candeles per metre quadrat [cd/m^2].

Luminancímetre. Aparell de mesura de il·luminància. Mesura cd/m^2 .

Lux [lx]. Unitat de mesura de il·luminància o nivell d’il·luminació. Es defineix com un lumen reflectit sobre una superfície de 1 m^2 .

Luxòmetre. Equip de mesura d’il·luminació. Dona les mesures en lux.

Portell. Distribució en la qual es situen els punts de llum de forma alternativa a una banda i altra del carrer.

SQM. Sigles provinents de l’anglès “Sky Quality Meter”, aparell de mesura de brillantor de l’esfera celeste. L’SQM mesura la quantitat de llum (sobre un con de 80 graus d’ample) que arriba al sensor.

Squims o mag/arc·s². Unitat de mesura de la brillantor superficial que es defineix com la mitja de la magnitud de la brillantor d’un requadre d’un segon al quadrat (ja que es tracta de coordenades esfèriques).

3. Prefaci

3.1. Origen del projecte

El projecte sorgeix a partir de la col·laboració com a becari de l'estudiant realitzador del projecte amb el Grup d'estudis Luminotècnics de la UPC. Per contextualitzar, cal dir que es tracta de la cessió de les instal·lacions d'enllumenat públic del municipi de Deltebre a una empresa de serveis energètics (ESE). Durant la renovació de les instal·lacions, es va considerar que calia que una entitat externa a les dos parts vetllés per la qualitat del servei d'enllumenat del municipi, aquest és el paper del Grup d'Estudis Luminotècnics.

Durant la realització de l'anàlisi del control de qualitat del servei d'enllumenat de la població, i donada la seva ubicació excepcional (El Delta de l'Ebre), es va considerar que la afectació sobre l'entorn de l'enllumenat públic era rellevant de cara a valorar la qualitat del servei. Així doncs, es va procedir a iniciar aquest projecte considerant que a l'hora de catalogar unes instal·lacions d'enllumenat artificial com a "bones", calia tenir en compte les seves repercussions en el medi ambient.

3.2. Motivació

L'autor, al iniciar la seva carrera com a Enginyer Industrial, difícilment es podria imaginar el aprofundir en la matèria de l'enllumenat i la luminotècnia. Durant el transcurs de la carrera i per qüestions de tarannà, cada cop ha tingut més interès per l'impacte mediambiental de les activitats industrials (i de retruc les de la societat del segle XXI), així com la seva quantificació. Considerant l'energia un vector d'entrada indispensable per a l'activitat humana actual en el nostre context geogràfic, també va considerar rellevant aprofundir en els usos de la mateixa de forma eficient.

És així com va començar a col·laborar amb el Grup d'Estudis Luminotècnics analitzant la qualitat del servei d'enllumenat públic del municipi de Deltebre amb especial interès en minimitzar l'impacte mediambiental de les instal·lacions. Aquest encàrrec, havia de tenir en compte un conjunt de vectors que es relacionaven entre sí de manera que l'eficiència no anés en detriment de la qualitat del servei d'enllumenat. Aquesta tasca, lluny de ser senzilla, ha resultat apassionant amb la gratificació d'analitzar amb intenció de quantificar i minimitzar l'impacte sobre l'entorn d'allò que avui en dia és quotidià com pot ser l'enllumenat dels carrers. Donada la complexitat del sistema com a conjunt, s'ha optat per una òptica mediambiental i lumínica per així arribar a un nivell de concreció més elevat en el projecte.

4. Introducció

4.1. Contextualització

En el context actual de recessió econòmica degut a la crisi econòmica i financera, la cessió de les instal·lacions d'enllumenat a Empreses de Serveis Energètics (d'ara en endavant, ESE) és una pràctica molt comú. Aquest procés, es realitza per tal de que la renovació d'instal·lacions, amb un potencial d'estalvi energètic elevat, es pugui realitzar per entitats externes a l'administració pública que presenten millor capacitat per finançar els projectes.

Degut a la durabilitat de les instal·lacions d'enllumenat exterior, d'entre 20 i 30 anys, i els seus llargs períodes de retorn de la inversió, d'entre 5 i 20 anys, els contractes de cessió de les instal·lacions a una ESE solen presentar una llarga durada. Aquests contractes es realitzen en base a unes Auditories Energètiques de les instal·lacions d'enllumenat que donen peu a un Plec de Condicions i Prescripcions Tècniques i Administratives culminant en un projecte de renovació d'aquelles que es consideri oportú. Lluny de contemplar únicament la renovació de les mateixes, és comú que els contractes també incloguin aspectes de la facturació energètica a més del manteniment. Això fa que la gestió parcial o total de les instal·lacions passi a mans d'una empresa privada i siguin importants les condicions del contracte a més de la bona voluntat de les dues parts per tal de solucionar tots els problemes o imprevistos sorgits durant el desenvolupament del període contractual.

La gestió d'un servei públic per part d'una empresa externa genera la necessitat de poder valorar la qualitat del servei per part de l'administració municipal a més d'establir una línia fluida de comunicació entre ambdues parts. La finalitat del control de qualitat és assegurar que les actuacions que es porten a terme garanteixen no només la disminució de la facturació energètica sinó també que les condicions lumíniques són bones pels diferents usuaris de la via pública.

Hi ha municipis on les premisses que determinen si el servei d'enllumenat és correcte o té deficiències es poden extreure del Pla Director d'Enllumenat o bé dels plans de mobilitat (si n'hi ha), en altres, cal basar-se en la documentació legal i tècnica que estableix el Real Decret d'Eficiència energètica en Instal·lacions d'enllumenat exterior (RD 1890/2008 [1]) a més de l'experiència que es pugui aportar per totes les parts implicades en el procés.

En el context d'estudi de la població de Deltebre, s'ha considerat important tenir en consideració l'impacte mediambiental lumínic de les instal·lacions d'enllumenat. Tal i com s'especificarà posteriorment al capítol 7.1, la ubicació de la localitat dins del Delta de l'Ebre fa que les consideracions mediambientals siguin rellevants i hi hagi riscos per la sostenibilitat de l'entorn. Per aquests motius, queda justificat el present projecte de cara a quantificar i avaluar l'impacte de la renovació de les instal·lacions que es porta a terme durant l'any 2013 i així establir un criteri de referència per a futures accions de millora.

4.2. Objectius del projecte

L'objectiu del projecte és aprofundir en la matèria de la contaminació lumínica tot intentant parametritzar i simular les condicions que fan que unes instal·lacions d'enllumenat presentin una emissió de flux lumínic cap al cel. Amb aquesta finalitat, s'ha intentat determinar una relació entre les variables més influents en l'emissió de flux lumínic cap a la esfera celeste a més del seu pes o influència en aquest fenomen. Això es portarà a terme mitjançant la inferència estadística, amb la que es vol obtenir una fórmula que simplifiqui el càlcul de l'emissió de flux lumínic cap al cel. Els resultats d'aquest projecte van encaminats a augmentar la precisió amb la que es quantifica el fenomen simplificant el procés de càlcul per a casos genèrics.

Un cop determinada la fórmula de la regressió estadística, aquesta s'aplicarà al municipi de Deltebre per tal de determinar l'Emissió de Flux Superior (EFS) així com el Grau Relatiu d'Emissió (GRE) de les instal·lacions abans i després d'una reforma de les instal·lacions.

Per últim, s'exposa la monitorització de tot el procés de renovació de les instal·lacions a través d'unes mesures contínues i unes altres pel territori a l'inici i final de la renovació d'instal·lacions.

4.3. Abast del projecte

Donat que l'àmbit d'estudi presenta una elevada qualitat mediambiental, s'ha valorat les instal·lacions d'enllumenat des de l'òptica de la contaminació lumínica. Així doncs, el vector mediambiental de les instal·lacions s'ha posat per davant dels demés tot intentant fer èmfasi en la visió integral de les mateixes. El nucli del projecte s'ha centrat en el desenvolupament d'un model estadístic amb capacitat per aproximar de forma raonable el valor de l'EFS sortint dels carrers amb unes característiques semblants. Això implica que per una part, inclou:

- El model estadístic obtingut així com tot el que es refereix a les proves de validesa i desenvolupament del mateix.
- Una contextualització i breu anàlisi de la reforma de les instal·lacions.
- L'aplicació del model i anàlisi dels resultats obtinguts.
- La monitorització de la renovació de les instal·lacions mitjançant mesures SQM.

Però, s'exclou del mateix:

- La realització de l'auditoria energètica del municipi de Deltebre.
- La qualitat de la informació proporcionada per les diferents parts implicades en el procés.
- Tot i la monitorització de la renovació de les instal·lacions a través de mesures amb SQM, queda fora de l'abast d'aquest projecte l'exploració i recerca d'una relació entre el model estadístic de l'EFS i les mesures de fons de cel.

5. Contaminació Lumínica

5.1. Definició de la Contaminació Lumínica

La contaminació lumínica és l'alteració innecessària de la quantitat natural de llum present al medi nocturn. Aquesta alteració, provocada per el flux lluminós emès per les fonts artificials d'enllumenat es pot reduir a través de la regulació d'intensitats, direccions, horaris o rangs espectrals innecessaris per la realització de les activitats previstes a les zones il·luminades.

Les afectacions de la contaminació lumínica són molt diverses, entre les que destaquen les dificultats per a l'observació astronòmica així com l'afectació a tots els éssers vius que interactuen amb la il·luminació.

5.2. El focus contaminant: L'Enllumenat

Hi ha dues conseqüències involucrades al estudiar les afectacions mediambientals de la contaminació lluminosa. El primer vector d'estudi de la contaminació lluminosa és la **llum intrusa**. Aquesta es defineix com flux lumínic en direccions per a les que no es preveia necessària al moment de dissenyar les instal·lacions. Les seves afectacions es poden dividir en dos vessants:

- **A l'hàbitat humà**, aquesta pot no ser molesta per als usuaris del lloc on incideix, com per exemple quan facilita els desplaçaments nocturns sense necessitat d'encendre els llums d'un habitatge. Per altra banda, quan la llum intrusa afecta a un dormitori, aquesta interferirà dificultant la son o alterant els ritmes naturals de les persones.
- **A l'entorn natural**, la incidència de flux lumínic en hores nocturnes pot afectar al funcionament de la natura a través de la variació de les tendències naturals d'alimentació d'una espècie (i de tota la cadena tròfica, per tant), el cicle reproductiu o bé modificant la relació depredador-presa i posant en situació desfavorable a un dels dos actors. Aquests factors afecten de forma significativa a la qualitat paisatgística d'una zona a més d'alterar el fràgil equilibri ecològic.

Per altra banda, un altre impacte per al medi ambient de la il·luminació és el **resplendor lluminós de la esfera celeste**. Aquest fenomen es va descobrir als anys 60 del segle passat, quan un grup d'astrònoms van alertar de que cada cop tenien més dificultats per fer mesures i observacions en condicions de fosc natural nocturna. Aquest resplendor es pot observar a la Figura 5.1.



Figura 5.1. Resplendor lluminós del cel de Barcelona. Font: Óscar Garcia (2011).

Una bona il·luminació ha de minimitzar les repercussions que causa al seu entorn, entenent que hi ha un compromís entre l'ús de l'enllumenat i la contaminació lumínica. Per tant, al seleccionar-la per part d'ajuntaments o altres entitats públiques o privades, cal tenir en compte un conjunt de mesures que es podria considerar rellevants per a un bon disseny d'una lluminària. Algunes d'aquestes podrien ser:

- Poc Flux no efectiu (Baix FHS_i).
- Alt Factor d'utilització.
- Alta Eficiència Energètica.
- Adaptabilitat.
- Durabilitat (Alt IP i qualitat dels materials).

Però tenint clares aquestes consideracions, al incloure un factor crucial com el preu de la lluminària dins d'aquest conjunt de requeriments, hi ha consideracions que passen a un segon terme. És per això que aquest present estudi vol donar eines de quantificació i anàlisi que permetin determinar la incidència de diversos factors de les instal·lacions sobre la llum enviada cap al cel, fent més fàcil la de per sí complicada tasca de valorar-les des del punt de vista integral.

5.3. Afectacions de la contaminació Lumínica

La necessitat d'instal·lacions d'enllumenat artificial sorgeix per perllongar l'activitat socioeconòmica que es dona als pobles i les ciutats quan el sol s'ha post. Cal posar de manifest que l'activitat social que es dona amb nocturnitat, representa bona part de les hores d'oci per a molts treballadors. Per tant, abans d'afrontar la divergència entre il·luminar de forma desmesurada o prevenir la contaminació lumínica, cal tenir en compte que aquesta garanteix:

- La seguretat ciutadana.
- Millora les condicions de circulació en carreteres i carrers aportant fluïdesa i comoditat.
- Permet l'activitat social generant de retruc activitat econòmica.
- Un nou aspecte a les ciutats a través de la il·luminació de façanes, ornamental, etc.

Per tant, l'enllumenat artificial, en bona part de les poblacions, és necessari i aporta valor a l'experiència urbana nocturna, així com en treu a l'experiència de la observació astronòmica o el que podríem anomenar l'experiència natural nocturna.

Per tal de respondre a la pregunta: "Per què cal minimitzar la contaminació lumínica?" que algunes persones podrien fer-se, s'ha fet una recerca d'informació tot esbrinant les conseqüències que tenen per al medi ambient les instal·lacions d'enllumenat artificial.

Així doncs, cal també esmentar tots aquells estudis i recerques dedicats a l'estudi de la contaminació lumínica, ja sigui per mesurar-la o per determinar la seva afectació medi ambiental (Annex A):

- Afectació a insectes, aus i lepidòpters.

- Afectació sobre espècies de l'àmbit geogràfic francès, focalitzant-se en amfibis, anguilles, peixos i ocells.
- Alteracions en la migració vertical del Dàfnia (Zooplànton).
- Afectació a Ratolins de Platja.
- Afectació a Granotes Verdes.
- Modificacions del comportament en mamífers terrestres, rat penats, migració i bioritmes de les aus, tortugues marines, insectes, cuques de llum i la fisiologia de les plantes.
- Problemes per a la biodiversitat i desequilibris a la cadena tròfica.
- Modificacions dels bioritmes dels éssers humans.

Tenint en consideració l'abast d'afectació del fenomen, que és radial com la dispersió de la llum, és rellevant tenir en compte que aquells indrets més sensibles són els que presenten una major riquesa i valor mediambiental. A aquest efectes, dins la legislació es contempla la importància de la ubicació de les instal·lacions i la proximitat a zones de referència aplicant diferents graus de protecció segons la proximitat a parcs naturals i zones d'interès natural. Així ho demostra el mapa de protecció envers la contaminació lluminosa aprovat per el Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya el 19 de desembre de 2007 segons els criteris establerts per la Llei 6/2001, de 31 de maig.

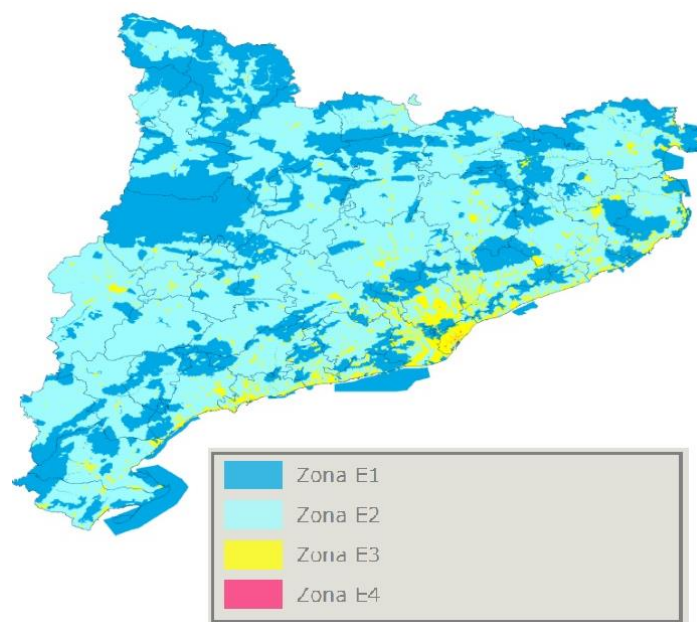


Figura 5.2. Zones de protecció de la contaminació lluminosa [3].

Serà important, per tant, el **COM** s'il·lumina, el **QUAN** i, per suposat, **ON** s'il·lumina. Aquests, seran els factors determinants de cara a poder valorar amb criteri l'afectació produïda per una instal·lació d'enllumenat artificial sobre l'entorn i sobre l'experiència de la vida natural nocturna.

En el mateix sentit, hi ha iniciatives que s'encaminen cap a la creació de reserves de la contaminació lumínica o punts de referència. Aquest és el cas de la fundació "Starlight" (Annex A),

que vetlla per minimitzar la problemàtica de la contaminació lumínica. Aquesta fundació, explota de manera creativa la possibilitat de preservar el patrimoni natural i treure'n un rendiment turístic, així doncs, proposa una xarxa de zones amb cels nets de contaminació lumínica i aptes per a una bona observació del cel.

En l'actualitat a la península hi ha dues reserves, una al Montsec i una altra a Sierra Morena. La que es troba a Catalunya va ser la primera de la península i està al Parc Astronòmic del Montsec (Lleida). En els darrers estudis sobre una possible ampliació de la reserva, han determinat que es detecta la influència de Lleida i altres municipis sobre la qualitat del cel del seu entorn, un fet que mostra l'ampli radi d'afectació de la contaminació lluminosa.

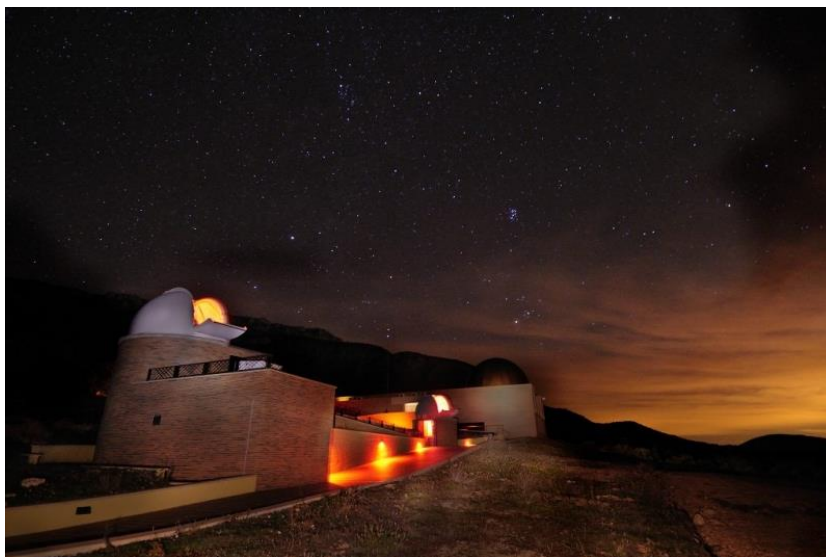


Figura 5.3. Observatori astronòmic del Montsec. Font: <http://www.parcasrtrnomic.cat/>

Si anem a una vessant més concreta, que a molts ens toca de ple com a persones residents en un entorn urbanitzat, o si més no, com a persones que viuen el seu dia a dia en un entorn il·luminat, cal considerar els efectes hormonals que provoca la llum.

Com ja s'ha vist amb anterioritat, la llum té una gran influència sobre la natura. I com a element de la mateixa que formem els éssers humans, diversos estudis sobre els ritmes circadianis dins de l'àmbit de la cronobiologia determinen la seva afectació. Dins d'aquest àmbit científic, s'ha demostrat que la llum, i de forma concreta aquella que s'assimila més a la llum diürna, afavoreix la producció de serotonina i dopamina, substàncies que activen l'atenció i afavoreixen l'activitat. Altrament, l'absència d'estímuls lluminosos (o bé si aquests són inadequats) afavoreixen la producció de melatonina, que indueix al son.

Per tant, com habitants d'un entorn electrificat i il·luminat, cal indagar en tot allò que pot ajudar a minimitzar la contaminació lumínica així com tenir en compte tots els factors per tal d'establir uns referències per al disseny de lluminàries i projecció d'instal·lacions d'enllumenat.

5.4. Quantificació del resplendor lluminós

Tot i ser un fenomen concentrat als entorns amb alta densitat de població, hi ha dos possibles visions del mateix que influeixen a l'hora de mesurar la seva afectació. Per una banda, hi ha la doctrina de sabers iniciats pels astrònoms que en la dècada dels seixanta expressava la dificultat creixent que hi havia per fer observacions astronòmiques prop d'indrets amb densitats de població. Aquesta reivindicació ha esdevingut tot un saber en quant a la quantificació de la contaminació lumínica en base a la capacitat d'observació dels astres i la llum que rebem des del cel. L'altra visió observa el problema des de l'epicentre, aquesta es basa en l'observació dels elements emissors de llum i quantifica l'aportació de flux lumínic dels mateixos cap al cel.

Així doncs, hi ha dos visions que convergeixen a l'hora d'estudiar la contaminació lumínica, l'anàlisi del focus contaminant que seria l'enllumenat artificial i l'anàlisi de l'efecte del mateix, que és el resplendor de la esfera celeste¹.

5.4.1. Determini dels factors per mesurar els elements causants del resplendor celeste

Donat que aquest es un estudi sobre els factors més influents en la quantificació del flux que s'escapa cap a l'esfera celeste de les instal·lacions de pobles de baixa densitat de població, cal definir aquelles variables que tenen incidència directa sobre aquest.

Una de les principals variables per tal de valorar el resplendor lluminós del cel des de la magnitud del focus contaminant és el **Flux Hemisfèric Superior (FHS)**, aquest indica el percentatge de llum que s'emet per direccions superiors al pla horitzontal de la llumenera. Un dels inconvenients d'aquest indicador és que no té en compte la influència de la làmpada en aquest fenomen ni els fenòmens de reflexió que es donen als carrers. Es pot expressar de dos maneres diferents:

Flux Hemisfèric Superior:

$$FHS = \frac{\text{Flux lumínic emés per sobre de l'horitzontal}}{\text{Flux de la làmpada}} \quad \text{Eq. 5.1}$$

Flux Hemisfèric Superior instal·lat:

$$FHS = \frac{\text{Flux lumínic emés per sobre de l'horitzontal}}{\text{Flux de la làmpada}} \quad \text{Eq. 5.2}$$

I si es considera el d'una instal·lació s'haurà de realitzar el càlcul amb sumatoris per a totes les n lluminàries.

$$FHS_i = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \text{Flux lumínic per sobre de l'horitzontal}}{\sum_{i=1}^{i=n} \text{Flux de la lluminària}} \quad \text{Eq. 5.3}$$

Per altra banda, una altre variable que pot ser d'ajuda de cara a quantificar l'afectació que té una instal·lació d'enllumenat és l'Emissió de Flux Superior o EFS. Aquest és el flux lumínic que emet una instal·lació cap a cel en lúmens. L'EFS té en compte més paràmetres que el FHS_i, com són:

¹ Considerant aquella part de brillantor del cel que prové de l'enllumenat, altament influït per la climatologia i els cicles lunars.

- Llum emesa directament per les lluminàries cap al cel (fracció del FHS_i sortint).
- El flux reflectit pel terra o altres elements on hi hagi incidència de llum artificial.
- La disposició i geometria de la zona il·luminada, que poden condicionar la quantitat real de flux que escapa cap al cel.

De forma aproximada, l'EFS es pot calcular considerant la llum emesa cap al cel de forma directa per la llumenera i sumant el flux que va dirigit cap al terra multiplicat per el seu coeficient de reflexió. Aquest càlcul s'ha extret de [2] i es formula amb freqüència dins del camp de la quantificació de la contaminació lumínica. La forma per al càlcul aproximat, és la següent:

$$EFS = FTI \cdot \overline{FHS}_i + FTI \cdot (\overline{FHI} \cdot \nu) \quad \text{Eq. 5.4}$$

On:

- **FTI**: Flux total instal·lat. Aquest es determina a partir del tipus i quantitat de làmpades que conté el focus contaminant i realitzar el sumatori dels lúmens de cada una d'elles.
- \overline{FHS}_i : Flux hemisfèric superior instal·lat mig de la instal·lació, que ja s'ha explicat anteriorment.
- \overline{FHI}_i : Flux hemisfèric inferior mig. De forma oposada al Flux hemisfèric superior, és el flux que il·lumina el paviment i les parets dins del focus contaminant. Aquest es dona en forma percentual, al igual que el FHS_i .
- ν : Reflexió del terra i les parets. Aproximadament, entre el 10% i el 15% del flux hemisfèric inferior retorna de nou cap a la l'esfera celeste. Algun dels valors de reflexió en diferents tipus de superfície van ser estudiats per Shirkey [5] i es poden veure a continuació:

Terres	Sec	Mullat	Superfícies	
Sorreta	0,25	0,18	Asfalt	0,1
Sorra	0,4	0,2	Lava	0,1
Sorra blanca	0,55	-	Formigó	0,3
Fosc	0,13	0,8	Pedra	0,3
Clar	0,18	0,1	Roca	0,2
Camps	Sec	Mullat	Neu	
Gespa llarga	0,18	0,13	Fresca	0,85
Gespa curta	0,26	0,19	Densa	0,75
Arròs	-	0,12	Antiga	0,55
Enciam	0,19	-	Fosa	0,35
Patata	0,22	-	-	-

Taula 5.1. Valors del coeficient de reflexió per a diferents superfícies.

És important tenir en compte que el càlcul aproximat de l'EFS, no té en consideració moltes de les circumstàncies en les que es troben les instal·lacions d'enllumenat, n'hi ha algunes que són incontrolables, com poden ser la neu, la reflexió provocada pels vehicles estacionats als marges

de la via o el creixement de l'arbrat. Però n'hi ha d'altres que sí que es poden parametritzar per a realitzar-ne un estudi més acurat, aquests són els paràmetres bàsics de la instal·lació, com poden ser:

- Interdistància, alçada, FHS_i i rendiment de les lluminàries.
- Flux lumínic de les làmpades.
- Amplada del carrer, reflectivitat de l'asfalt.
- Ocupació de la via, és a dir, si lateralment hi ha edificis o bé vegetació als vorals de la carretera.
- Alçada i reflectivitat de les parets que envolten el carrer (si n'hi ha).

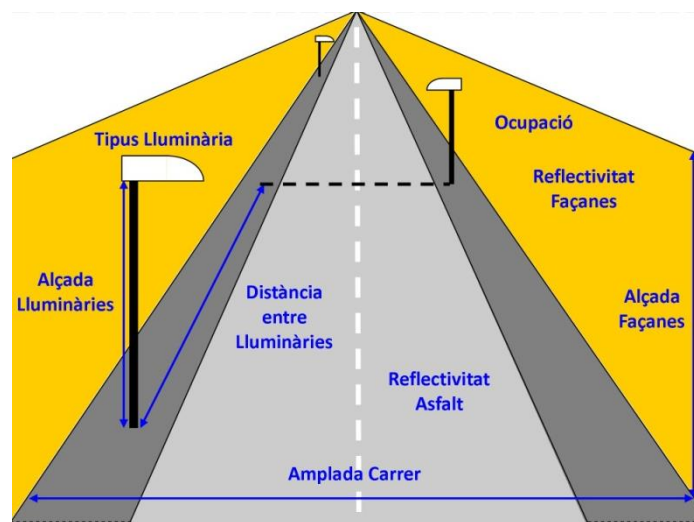


Figura 5.4. Diversos factors de l'àmbit d'estudi de l'enllumenat públic.

Així doncs, prenent com a referència les condicions més típiques d'una via, es poden realitzar simulacions informàtiques amb els programes de càlcul més comuns i gratuïts (Dialux, Calculux, Relux, etc.) i obtenir una aproximació més precisa i acurada de la quantitat de flux lumínic enviat cap al cel. En aquest sentit van les indagacions realitzades en el present projecte.

A partir de l'EFS, ja és té un bon punt de partida per tal de determinar el flux lumínic enviat cap al cel. En base a aquest, és possible elaborar un altre indicador que aproxima el càlcul a la seva influència en la brillantor del cel.

Aquests és el **Grau Relatiu d'Emissió (GRE)**, útil si es vol tenir en compte el factor de la làmpada en el càlcul. Un cop s'ha determinat l'EFS d'una instal·lació, es pot determinar el GRE emprant el Factor de Reducció de la contaminació de la làmpada (FR) de la làmpada emprada, un factor que es defineix a partir d'una tecnologia de referència. De forma genèrica, es té:

$$GRE = \sum_{i=1}^{i=n} FR_i \cdot EFS_i$$

Eq. 5.5

Si es pren com a valor de referència les làmpades de Vapor de Sodi a Alta Pressió, que són unes de les que tenen una menor incidència en la contaminació lumínica degut al seu espectre d'emissió, es tenen els següents valors dels Factors de Reducció [4].

Làmpada	Factors de reducció (FR)
VSAP	1
VSBP	0,67
Florescent freda	2,99
Fluorescent neutra	2,71
Fluorescent càlida	2,40
Vapor de mercuri	3,03
Halogenurs metàl·lics freda	1,92
Halogenurs metàl·lics càlida	1,57
Led fred	2,91
Led càlid	2,62

Taula 5.2. Factors de reducció de la contaminació lumínica determinats per l'IAC [4].

On, en la seva majoria són d'amplificació, ja que com s'ha esmentat anteriorment, les làmpades de VSAP tenen una menor incidència en comparació amb la resta de làmpades.

5.4.2. Mesura del resplendor lluminós

Aquest apartat està dedicat a aquelles metodologies destinades a quantificar la capacitat d'observació dels astres des d'un punt concret, és a dir, la conseqüència de la contaminació lumínica. A continuació es mostren alguns dels dispositius dels que es pot disposar.

Sky Quality Meter

És un artefacte creat per Unihedron l'any 2007 fet per conèixer la qualitat del cel en un punt d'estudi. Realitza mesures amb un fotòmetre molt sensible que mesura la brillantor del cel en un angle concret de la esfera celeste. L'instrument incorpora un filtre per a radiacions infraroges, per tant, només té en compte la radiació corresponent a l'espectre visible a l'hora de quantificar el grau de contaminació lumínica.



Figura 5.5. Medidor SQM portable d'Unihedron. Font: <http://unihedron.com/>

Per utilitzar-lo, només cal sostenir l'SQM cap al zenit i pressionar el botó d'encesa o apagada. Després d'alguns segons el dispositiu mostra un nombre que és la mesura. Cal assegurar-se, que en cas d'haver instal·lacions d'enllumenat properes que el flux de les llums i les mateixes no estigui dins del con de detecció del sensor. D'igual manera, a l'hora de realitzar observacions, és important planificar-les per tenir la mínima influència de la lluna realitzant-les en períodes de lluna nova i de forma posterior al crepuscle per tal de tenir la màxima precisió.

L'SQM mesura la quantitat de llum (sobre un con de 80 graus d'ample) que arriba al sensor. La magnitud dels valors obtinguts estan en una escala logarítmica de magnituds per segon arc quadrat (MPSAS en anglès) que oscil·la entre 16 per a cels altament contaminats i 22 per a cels realment foscos. Aquesta magnitud no es fàcilment observable i per tant es fa la transformació directa a una denominació més primària per a les unitats SQM anomenada squims (MALE en anglès) a partir de la mesura extreta del dispositiu.

És interessant tenir en compte que les mesures del SQM es poden convertir per tal de representar la brillantor real de l'esfera celeste. La relació és inversa i la conversió transforma les mesures en una magnitud de il·luminància del cel tal i com segueix:

$$\text{Valor} \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right] = 10,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{(-0,4 \cdot \text{Valor} \left[\frac{\text{mag}}{\text{Arc} \cdot \text{s}^2} \right])} \quad \text{Eq. 5.6}$$

Les variacions dels resultats de la mesura en diferents llocs o moments de la nit és rellevant, ja que segons la definició feta anteriorment, una variació en una dècima del valor en MPSAS pot suposar gairebé un 9 % d'increment en la brillantor del cel així com 5 dècimes més d'un 33 %. A continuació es pot observar la relació entre el Valor en cd/m^2 i les mesures en $\text{Mag}/\text{Arc} \cdot \text{s}^2$.

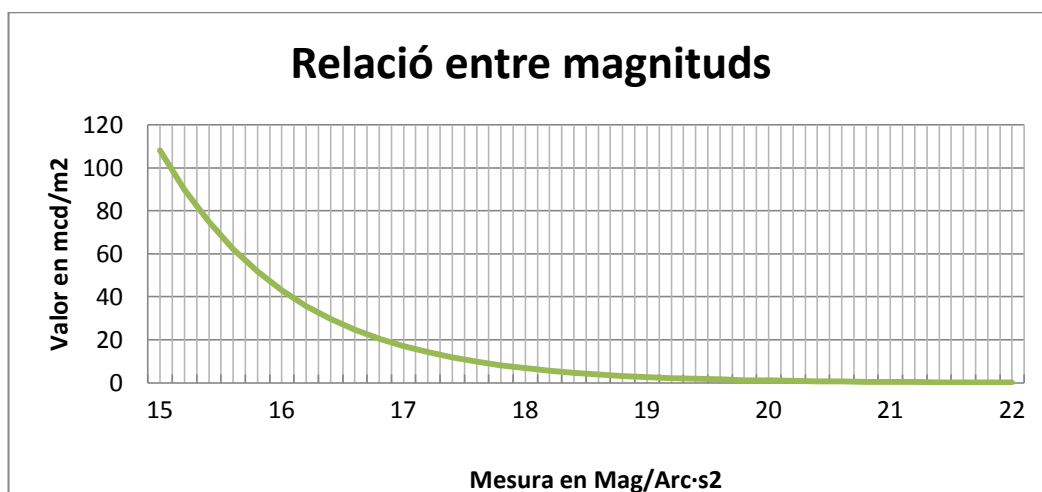


Figura 5.6. Gràfic de la relació entre Cd/m^2 i les mesures realitzades amb l'SQM.

De forma gràfica també i amb la relació amb altres magnituds es pot observar el següent diagrama:

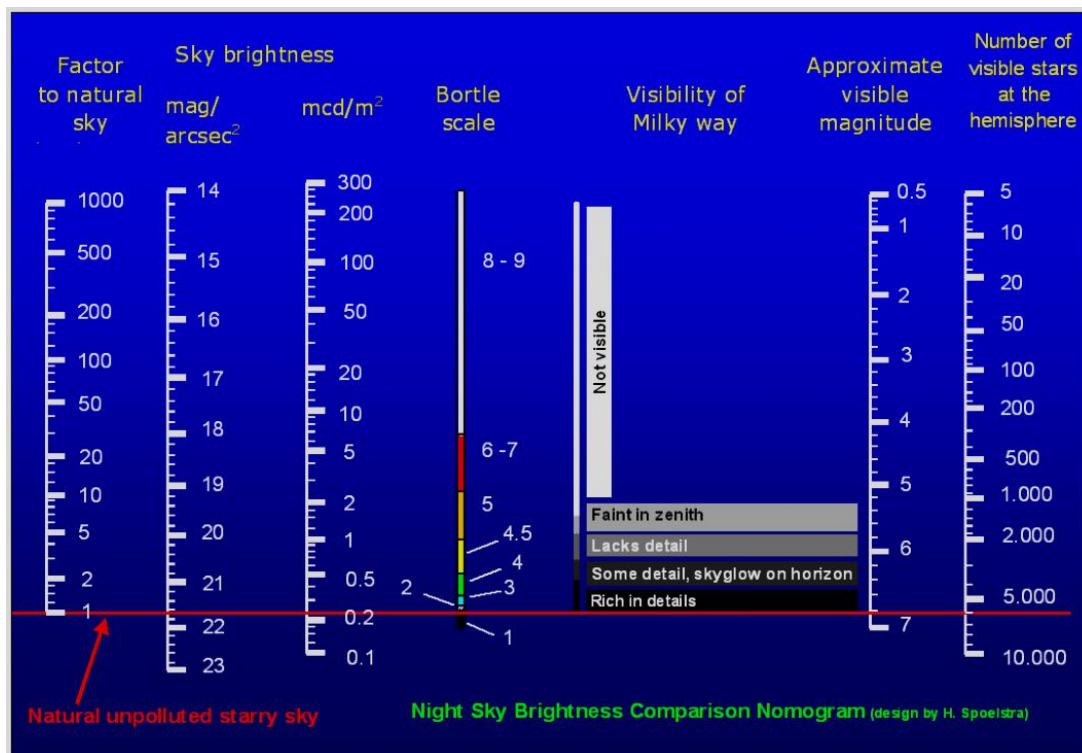


Figura 5.7. Comparació entre magnituds de mesura del SQM. Font: H. Spoelstra.

Sistemes videofotomètrics amb tecnologia CCD

La tecnologia CCD es basa en un sensor amb cel·les fotoelèctriques que registren la imatge. Les sigles CCD “Charged Couple Device” (“dispositiu de càrregues connectades” en anglès) fan referència a la seva arquitectura, un circuit integrat amb un determinat nombre de condensadors enllaçats o acoblats. Aquest circuit i els condensadors que el formen són responsables de transformar les radiacions electromagnètiques que li arriben en impulsos elèctrics.

La tecnologia CCD va ser inventada l’any 1969 per Willard Boyle i George Smith i des de la seva invenció, no s’han deixat de desenvolupar i documentar aplicacions de tots els camps amb aquests sensors.

Aquesta, junt amb la CMOS “Complementary Metal Oxide Semiconductor” són les dues tecnologies més emprades per a fer sensors de càmeres digitals. Aquests dispositius han aportant molts avantatges en aplicacions fotomètriques. La seva aplicació lumínica s’ha anat desenvolupant en els darrers anys, amb recerca realitzada en aquest sentit [7].

Un sistema recent patentat a Juliol de 2012 amb tecnologia CCD és el mesurador ASTMON "AllSky Transmission MONitor". Aquest es basa en un detector CCD (3,5x2,5 Mpíxels i 5,5 micres) amb una roda de filtres amb cinc posicions i un objectiu ull de peix que li proporciona un camp de visió de 180° en totes direccions.

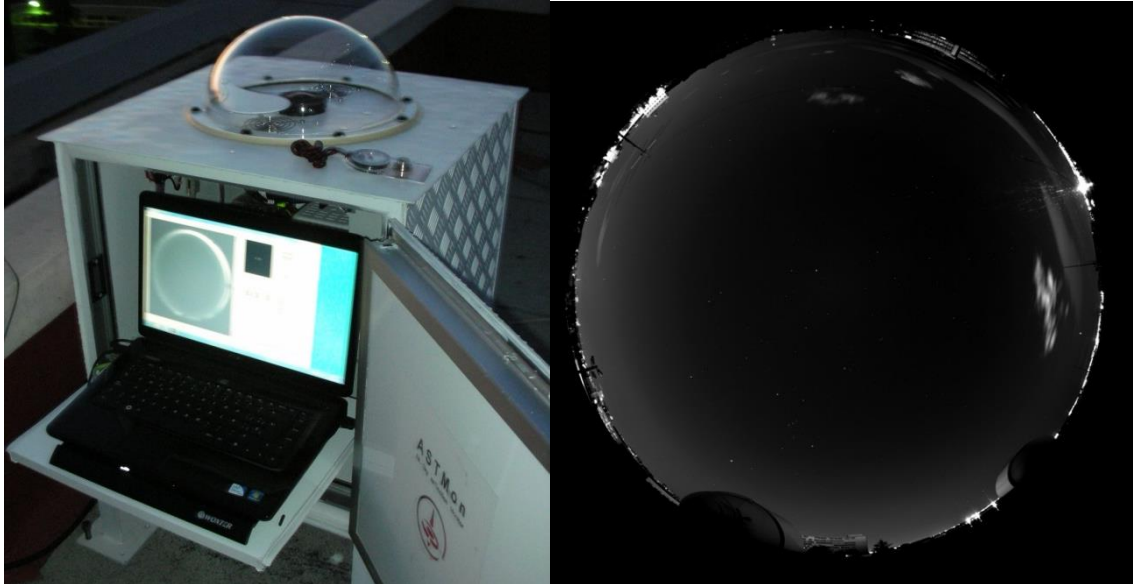


Figura 5.8. Medidor ASTMON de la Facultat de Ciències Físiques de la Universitat Complutense de Madrid i mesura del 2 de Novembre de 2010.

El mesurador ASTMON té un conjunt d'avantatges que fan molt interessants les seves mesures:

- Permet la possibilitat de calibrar la brillantor del cel al comparar-la amb la magnitud de les estrelles ja que es pot determinar dins del seu sistema fotomètric. D'aquesta manera, el resultat està sempre referit a un valor de zero instrumental, pel que es poden elaborar mapes de brillantor superficial del cel comparables entre diversos punts d'observació.
- El procés de mesura és completament automàtic ja que l'instrument està dissenyat des d'un punt de vista integral.
- Gràcies als seus filtres, les mesures es poden fer a diverses bandes espectrals permetent emprar diversos sistemes de mesura i calibratge.
- De forma complementaria, el software del dispositiu és capaç d'identificar automàticament les estrelles del camp de visió a través de les coordenades esfèriques de les estrelles.
- Permet observar si les mesures es veuen distorsionades per núvols.

Aquest és un resum del funcionament de les mesures amb ASTMON:

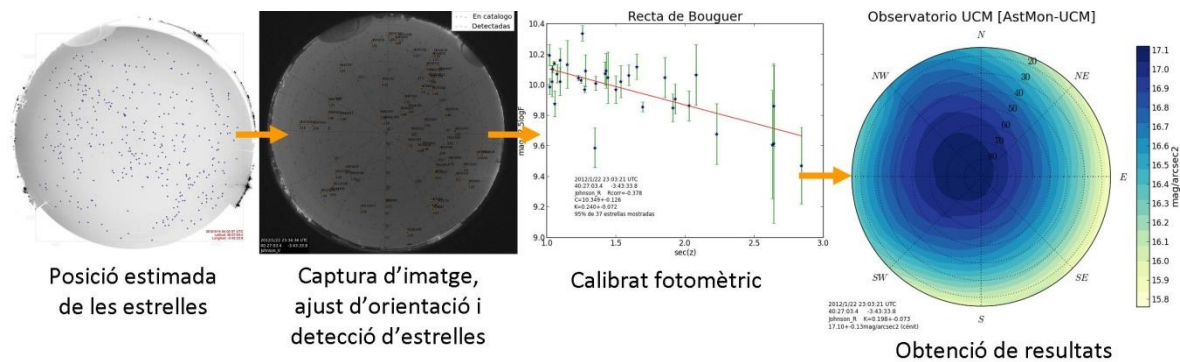


Figura 5.9. Procés d'obtenció de mesures amb un medidor ASTMON. Font: Elaboració pròpia a partir de [8].

Totes aquestes avantatges tenen un parell d'inconvenients que són les grans dimensions del dispositiu així com el seu elevat preu. Per aquestes raons, en el present projecte només s'han realitzat mesures amb SQM.

6. Anàlisi de l'EFS

6.1. Introducció a la regressió lineal

La regressió lineal explora les relacions existents entre una variable, anomenada variable dependent i unes altres que s'anomenen independents de manera que es pot modelitzar fenòmens diversos. En el treball de camp, les variables són dades que s'intenten relacionar i que es poden extreure fruit de l'experimentació o bé l'exploració de dades.

Un exemple de l'àmbit d'estudi de l'enllumenat podria ser l'anàlisi de la quantitat de làmpades que hi ha en un municipi d'un àmbit territorial en funció de diverses de les variables d'aquell municipi que estan disponibles o són fàcils de determinar. Així doncs, de forma fàcil posaríem: els seus habitants, la superfície ocupada per cada ús (industrial, viari, residencial, etc.) i totes les que es consideressin rellevants a tal finalitat.

$$\text{Nombre de làmpades} = f(\text{Habitants}, \text{Superfície}_i, \text{Comarca}, \text{etc.}) \quad \text{Eq. 6.1}$$

Les relacions de dependència de les que es parla al fer referència a la regressió lineal són matemàtiques i, per tant, no necessàriament impliquen causalitat. Així doncs, per a uns mateixos factors, el valor de la variable dependent no està fixat. En definitiva, la regressió lineal explora les n dimensions i relacions entre la variable dependent i les independents tot cercant modelitzar com afecta la variació de cada una sobre la variable dependent.

La fórmula genèrica per a la regressió lineal per a i variables independents i j observacions la podríem expressar com segueix:

$$Y_j = a_j + \left(\sum_{i=1}^{i=n} (b_i \cdot X_{i,j}) \right) + \text{Error}_j \quad \text{Eq. 6.2}$$

On:

- Y_j és el valor de la variable dependent per a una observació j .
- a_j és el valor de l'ordenada on la línia de regressió s'intercepta amb l'eix de la variable dependent. Quelcom fàcil d'imaginar en dues dimensions, quan tenim més dimensions podríem dir que és el valor de la regressió amb la resta de paràmetres a zero (tot i que no té sentit estadístic ja que les diferents X_i presenten un valor mínim en funció de l'estudi).
- b_i és el coeficient de la regressió poblacional, en definitiva, el valor que apunta a la variació produïda per cada increment de la variable dependent (X_i).
- $X_{i,j}$ és cadascuna de les i variables independents per a les j observacions.
- **L'error** és la diferència entre el valor predit per pel model estadístic i el valor real. És la part no observable del fenomen que s'està modelitzant. L'anàlisi de l'error així com la seva estandardització és un indicador crucial de la qualitat i validesa de l'ajust del model estadístic.

La validesa del model estadístic i la qualitat en l'ajust de la predicció o descripció d'un fenomen està condicionada a l'observació del conjunt de dades i les estadístiques descriptives. En aquest sentit, és molt important fer un anàlisi exploratori de les dades per tal d'observar la relació entre cada variable independent amb la variable dependent a més de la interacció entre les variables independents i possibilitats.

En general, a l'hora d'iniciar un estudi mitjançant la regressió lineal, cal partir des d'uns supòsits. Aquests, considerant a Y el vector de la variable dependent i X la matriu de variables independents per a cada observació, són els següents:

- Els valors de les variables independents X són fixes i mesurats sense error.
- La variable Y és aleatòria.
- Per cada valor X , existeix una distribució normal de valors d' Y (subpoblacions).
- Las variàncies de las subpoblacions d' Y són totes iguals.
- Totes les mesures de les subpoblacions d' Y es troben sobre la mateixa recta.
- Els valors d' Y estan normalment distribuïts i són estadísticament independents.

Un cop realitzat l'anàlisi exploratori de les dades i sota els supòsits anteriors, es pot iniciar el procés iteratiu de generació de models i valoració dels mateixos. El procés matemàtic emprat en aquest projecte per al determini dels coeficients de la regressió d'un model estadístic és el de mínims quadrats. Aquesta és una tècnica d'anàlisi numèric emmarcada dins de l'optimització matemàtica en la que, donat un conjunt de parells ordenats (variable dependent, variables independents) i una família de funcions, cerca trobar la funció contínua dins d'aquesta família que millor approximi les dades (obtenint un "millor ajust") d'acord amb el criteri de mínim error quadràtic.

Tenint en compte que el mètode es basa en la minimitzar l'error (també anomenat residu) del conjunt de les prediccions, els residus (la part no explicada per la regressió) són de gran importància de cara a validar un model estadístic. Així doncs, un cop realitzada la regressió lineal, s'ha de verificar el compliment d'un conjunt d'hipòtesis per garantir la aleatorietat residual i determinar, per tant, si el model és vàlid o no. Les hipòtesis es mostren a continuació:

- **L'esperança matemàtica de l'error en cada observació és zero.** Aquest supòsit implica que els efectes individuals de les variables dins de l'error tendeixen a compensar-se per terme mig. En qualsevol cas, suposant que aquesta hipòtesi no es complís i, per tant, el seu valor esperat fos diferent de 0, aquest podria acumular-se al terme constant del model (a) pel qual es mantindria la validesa de la hipòtesi. Si el model té terme constant, és impossible desgranar a posteriori, quina fracció del valor constant correspon a l'error i quina al coeficient independent. Així doncs, aquesta és una hipòtesi no contrastable de forma empírica.
- **Les perturbacions aleatòries presenten homoscedasticitat.** Aquesta hipòtesi indica que tot l'error aleatori presenta la mateixa variància. És a dir, la variància de les perturbacions aleatòries del model és constant i, per tant, independent del temps o el valor de les variables dependents. Aquesta hipòtesi es pot contrastar empíricament a través de

contrastos estadístics basats en els residus mínim-quadràtics. Al cap i a la fi, aquesta hipòtesis implica descartar que hi hagi part del fenomen que es vol modelitzar no representat dins les variables que formen el model i, per tant, es tracta de descartar que s'observin tendències en els residus del model.

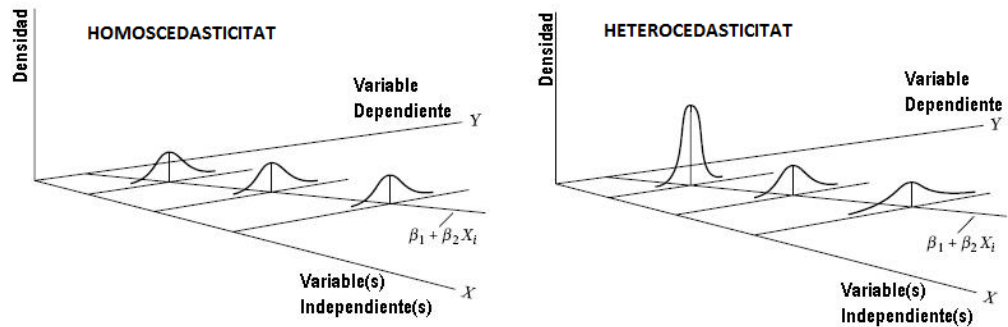


Figura 6.1. Representació gràfica de les diferències entre un model Homoescdatic i un heteroescdatic [9].

- **Les pertorbacions aleatòries de les diferents variables dependents són independents entre sí.** Es tracta de garantir que l'error de les diferents unitats mostrals no estan correlacionades entre sí. Aquesta hipòtesis és contrastable a posteriori i es pot transgredir sovint quan els models que s'empren utilitzen dades de series temporals.
- **La pertorbació aleatòria té una distribució normal multivariant.** Donat que la pertorbació aleatòria recull un ampli conjunt de variables que s'han omès del model, independents entre si i també del conjunt de variables repressores, pel teorema del límit central es pot suposar que el vector de pertorbacions aleatòries presenta una distribució normal multivariant.

Les quatre hipòtesis sobre els residus considerades anteriorment, es poden expressar de forma conjunta com:

$$e_i \sim NID(0, \sigma^2) \quad \text{Eq. 6.3}$$

On NID implica que són Normals, Independents i amb la Distribució que s'exposa.

Degut a la importància del compliment de les hipòtesis per garantir l'ajust del model, es farà especial èmfasi en el compliment de les hipòtesis sobre els residus esmentats amb anterioritat.

Un cop garantits el compliment de les diverses hipòtesis del model, és important descriure el paràmetre més rellevant a l'hora de quantificar la relació existent entre les variables dependents i la variable independent. Aquest és el coeficient de determinació (R^2), aquest determina el grau d'ajust entre el model i les dades i pot servir per a fer la selecció d'alternatives entre diversos models (sempre i quan tots compleixin les hipòtesis anteriors). El coeficient de determinació es basa en la descomposició de la variància de la variable independent a la que es pot denominar "variància total". Així doncs, es defineix que:

$$\text{Variança total} = \text{Variança explicada pel model} + \text{Variança residual} \quad \text{Eq. 6.4}$$

Alternativament, i de forma equivalent, el coeficient de determinació es pot definir com 1 menys la proporció de la variació de la variable dependent no explicada pel model i per definició, els valors extrems d'aquest coeficient són 1 quan la variància residual és nul·la (i l'ajust és perfecte) i 0 quan la variància explicada pel model és nul·la.

És important destacar que, a mesura que s'inclouen variables al model el coeficient de determinació augmenta encara que aquestes no siguin significatives. Això suposa un problema que s'ha resolt a través del coeficient de determinació corregit o ajustat (R^2_{Adj}). Aquest es defineix com:

$$R^2_{Adj} = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{n - 1}{n - k} \quad \text{Eq. 6.5}$$

On n són les dimensions de la mostra i k el nombre de variables independents.

Un darrer apunt important a fer a l'hora d'observar els resultats o bé millorar les prediccions que realitzi el model estadístic són els conceptes explicats a continuació:

- **Valor extrem o "outlier"**. Aquest és tracta d'una observació que genera un residu molt gran. En altres paraules, es tracta d'una observació amb un valor de la variable dependent inusual donat el valor de les variables independents. Un valor extrem pot indicar una peculiaritat en la mostra o bé un error en el càlcul o bolcat de les dades.
- **Palanquejament o "leverage"**. És una mesura que determina quant allunyada està la variable independent d'una mostra de la seva mitja. Amb aquest nom es denominen les observacions que presenten algun valor extrem en alguna de les variables independents (i per tant, presenten un alt palanquejament). Els valors amb un alt palanquejament poden tenir un gran efecte sobre els coeficients de la regressió lineal (\mathbf{b}_1).
- **Influència**. Es diu que una observació té una gran influència quan al extreure-la del model varien substancialment els coeficients de la regressió. La influència pot entendre's com el producte del palanquejament i la extremitat d'un valor.
- **Distància de Cook**. Es tracta d'un valor que quantifica la informació del palanquejament i el residu (o error) de cada observació. Serveix per tant per determinar el grau de criticitat (en influència o palanquejament) d'una observació i si el model genera un millor ajust sense la mateixa.

Tots aquests conceptes s'han analitzat al detall a l'hora de realitzar el model estadístic i es pot observar el seu anàlisi a l'Annex B.

6.2. Parametrització del model estadístic

6.2.1. Origen de les dades

Per a determinar un model estadístic que expliqui la variació de l'EFS d'un municipi, cal disposar d'un conjunt de dades o factors i el resultat (l'EFS) a fi de determinar un hiperplà geomètric que relacioni les variables independents i la resposta.

Per obtenir els resultats i factors, es podria quantificar els nivells d'il·luminació en lux de la superfície que hi ha per sobre dels edificis d'un carrer i els seus paràmetres generals. Una de les maneres per d'obtenir aquests nivells, hauria sigut disposar d'un robot volador o dron amb un luxòmetre, i elaborar de forma posterior el valor mig. Un cop obtingut el valor mig i l'àrea d'aquesta superfície, es podria determinar amb facilitat el flux sortint cap al cel. Aquest anàlisi podria ser molt interessant de cara al futur, però a manca de recursos i degut als costos d'aquesta opció, s'ha optat per buscar altres metodologies.

Tot cercant alternatives per determinar la variació de l'EFS, es va documentar un estudi de la contaminació lumínica amb una metodologia per a l'obtenció de resultats molt equilibrada en precisió de resultats i cost d'obtenció de les dades [11]. Per tal de realitzar aquest diagnòstic, es va caracteritzar cadascun dels carrers del municipi tot determinant cadascuna de les variables independents que definien un carrer. Un cop caracteritzades les diverses vies del municipi, a través de simulacions amb un programa informàtic (Calculux), es va determinar el nivell d'il·luminació a les superfícies que no estaven ocupades per façana o terra. Amb l'àrea de les mateixes i el nivell d'il·luminació es va determinar doncs el flux de llum sortint de les instal·lacions. Aquest mètode s'anomena RAMAL-UPC [6].

Aquesta modelització i parametrització de la realitat, fa que algunes de les situacions simulades, no siguin amb precisió les que es donen al carrer. Els factors de distorsió que hi ha a la realitat poden ser:

- La influència dels cotxes aparcats en la reflexió de la llum.
- La variació del coeficient de reflexió de l'asfalt amb l'envelliment.
- Les ombres provocades per l'arbrat.
- Variacions particulars a nivell d'edifici i no carrer/municipi.
- Circumstàncies meteorològiques.
- Altres particularitats.

És evident que aquestes poden afectar a l'EFS, però també cal considerar que són circumstancials. Així doncs, es deixa de banda allò que és puntual i presenta una alta variabilitat amb la finalitat de determinar una estimació adequada i amb el mínim error experimental del fenomen. Un cop valorades les alternatives, es decideix aplicar la inferència estadística a les dades modelitzades per tal de desenvolupar un indicador mediambiental fiable de cara a la valoració d'unes instal·lacions d'enllumenat municipal. Aquest serà, a més, un indicador que permetrà la predicció de noves situacions donant lloc a la comparació entre diverses alternatives o municipis.

6.2.2. Variables Originals

L'estudi del qual s'han obtingut les dades constava de moltes variables, algunes d'elles relacionades entre elles i d'altres, de poc rellevants per a l'estudi estadístic. En fases posteriors del projecte, s'han descartat o obtingut una combinació d'elles que feia que no fossin necessàries les variables originals. Dit això, a continuació s'han definit les variables del conjunt de dades emprada per a realitzar la regressió:

- **Longitud [m].** Aquesta variable és equivalent a la interdistància, és a dir, la distància lineal que separa cada una de les lluminàries (en un determinat cantó del carrer).
- **Amplada Carrer [m].** És la distància entre les dues façanes del carrer.
- **Amplada VP [m].** És la distància d'asfaltat que hi ha al carrer, és a dir, la zona asfaltada (o no) per on circulen els vehicles.
- **Alçada dels edificis [m].** És l'alçada mesurada del conjunt dels edificis del carrer. Cal entendre que aquesta dada s'ha determinat considerant l'altura mitja dels edificis d'un carrer.
- **Reflectivitats [%].** És la capacitat de reflectir la llum de les dues façanes del carrer.
- **Percentatge d'ocupació [%].** És un indicador del promig de la ocupació del terreny adjacent al carrer, entenent que:
 - **0:** No hi ha façanes als cantons del carrer o bé n'hi ha però amb jardins sense mur.
 - **50:** Hi ha edificis a una banda i vegetació a l'altre o jardins amb mur.
 - **100:** Cobertura total de façanes per les dues bandes del carrer.
- **Tipus de lluminària.** Respon al tipus de lluminària, aquesta, presenta unes característiques fotomètriques determinades, amb un rendiment i FHS_i associades. Així, s'ha estudiat un conjunt de lluminàries tipus segons la caracterització següent:

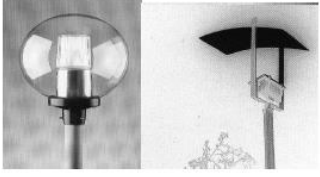
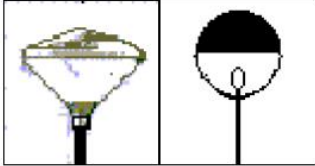
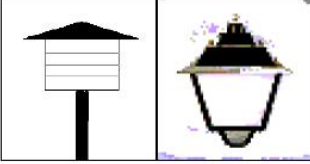

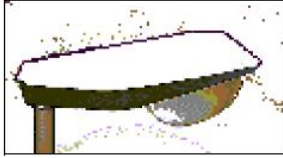
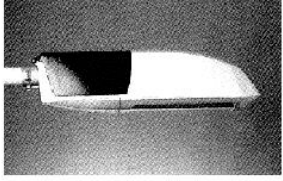

Tipus de lluminàries	Descripció
<p data-bbox="596 443 639 495">A</p> 	<p data-bbox="1114 383 1347 443">Boles sense protecció i similars</p>
<p data-bbox="619 645 655 696">B</p> 	<p data-bbox="1123 584 1337 645">Boles amb protecció mínima i similars</p>
<p data-bbox="619 824 655 875">C</p> 	<p data-bbox="1098 763 1362 824">Lluminàries ornamentals i similars</p>
<p data-bbox="533 1025 569 1077">D</p> 	<p data-bbox="1102 949 1362 1039">Lluminàries sense cubeta difusora i boles amb làmpada dins del difusor</p>
<p data-bbox="635 1238 671 1290">E</p> 	<p data-bbox="1107 1189 1353 1249">Lluminàries viàries amb cubeta esfèrica</p>
<p data-bbox="639 1462 676 1514">F</p> 	<p data-bbox="1107 1402 1353 1462">Lluminàries viàries amb cubeta plana</p>
<p data-bbox="564 1664 601 1715">G</p> 	<p data-bbox="1177 1615 1283 1637">Projectors</p>

Figura 6.2. Taula de classificació de tipus de lluminàries segons [11].

- **Disposició.** És la distribució que presenten les lluminàries al carrer seguint els exemples següents.

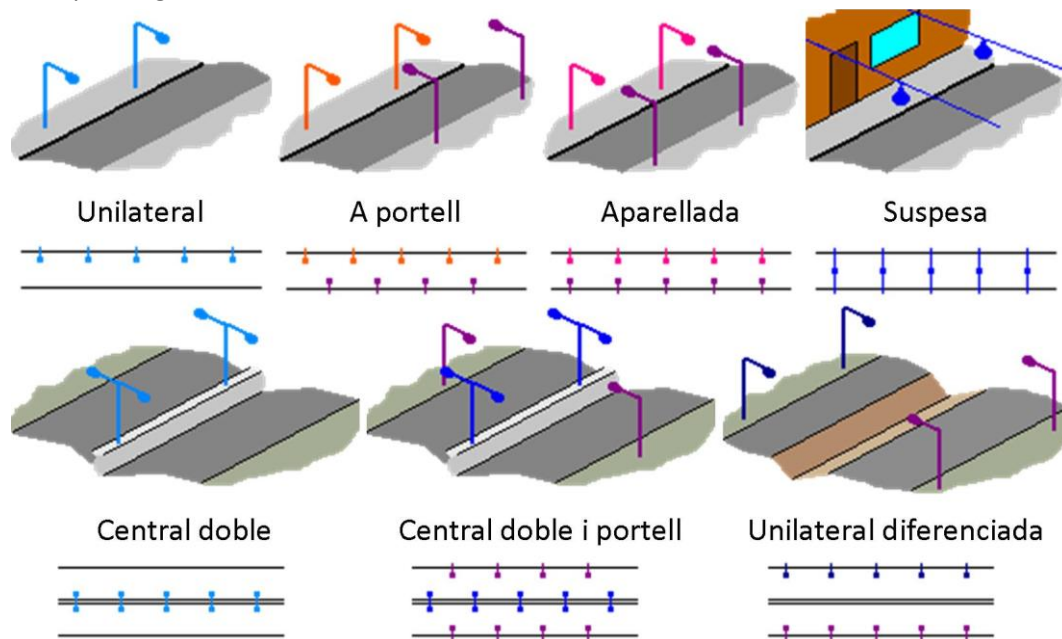


Figura 6.3. Distribucions habituals d'instal·lacions d'enllumenat. Font: EDISON UPC.

- **Separació [m].** És la distància entre lluminàries d'un mateix cantó de la vorera, una informació que redunda si es coneix la disposició i longitud.
- **Alçada de les lluminàries [m].** És l'alçada del centre geomètric de la lluminària.
- **Tipus de làmpada.** És la caracterització de la làmpada en funció del material que la conforma, les més habituals són: Halogenurs Metàl·lics en cremador ceràmic (HM), Vapor de Mercuri (VM) i Vapor de Sodi a Alta Pressió (VSAP) tot i que també poden ser Led, Incandescents, etc. Aquesta informació no té repercussió a l'hora de calcular l'EFS, però a l'hora de calcular el Grau Relatiu d'Emissió (GRE) la temperatura del color de les mateixes i la dispersió per l'atmosfera sí que tindrà rellevància.
- **Potència [W].** És la potència de la làmpada, que està altament relacionada amb el flux de la làmpada.
- **Flux de la Làmpada [lm].** És la quantitat de lúmens emesos per la làmpada, en funció de la seva potència, el tipus de làmpada i model.

6.3. Selecció de variables per a la regressió lineal

Un cop analitzades totes les variables disponibles del estudi inicial, es va procedir a simplificar-les per tal de facilitar la recollida de dades i el seu tractament. Finalment, a la regressió lineal s'han introduït un conjunt de variables que es mostra gràficament a continuació:

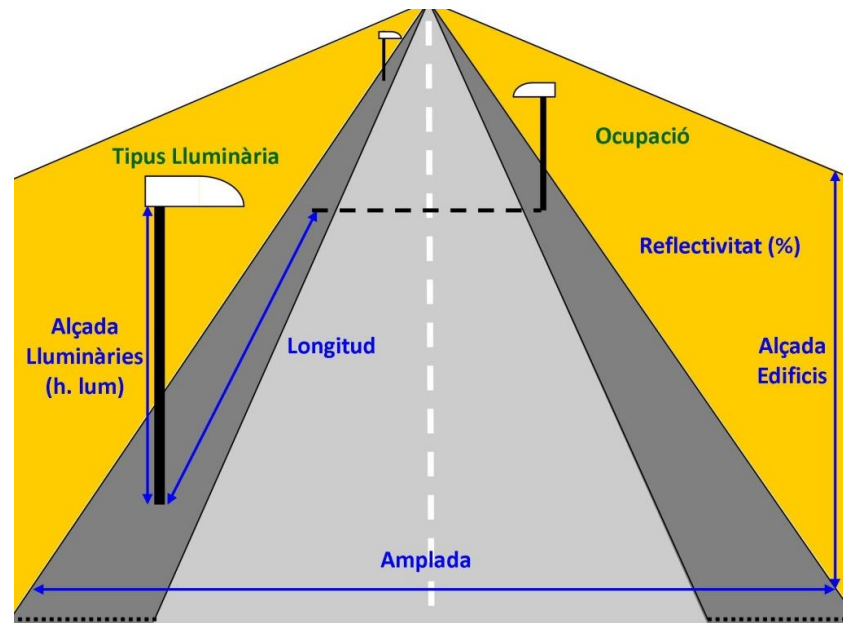


Figura 6.4. Modelització dels factors determinants per a l'EFS de l'enllumenat exterior públic. Font: Elaboració pròpia.

6.3.1. Variables qualitatives

Variables indicadores escalades segons factors:

- **Ocupació.** S'ha creat una variable qualitativa que determina la ocupació mitja de la via, això s'ha realitzat a través de la creació de tres factors [0, 50, 100] que apunten de forma directa a la ocupació que s'ha definit amb anterioritat.
- **Tipus.** Segons la classificació mostrada a la Figura 6.2 s'han determinat els paràmetres més rellevants del seu espectre fotomètric com poden ser FHS_i[%] i Rendiment [%]. Tot i això, per tal de preservar el factor de la fotometria dins del tipus de lluminaària i no reduir-ho a dos factors separats i en base a l'anàlisi de dades que s'ha realitzat, s'ha introduït com a variable qualitativa. Val a dir que les simulacions estaven fetes amb una lluminaària tipus, i això també s'ha de tenir en compte al aplicar el model.

6.3.2. Variables quantitatives

Variables contínues:

- **Longitud [m].** Es tracta de la distància entre dos lluminaàries consecutives sigui quina sigui la seva distribució. Per tant, en una distribució unilateral es considera que és la interdistància i en una distribució al portell aquest paràmetre pren la meitat del valor del que es considera la seva interdistància.
- **Amplada [m].** És l'amplada del carrer.
- **Alçada dels edificis [m].** Només té sentit quan la ocupació és 50 o 100. És una mitja de l'alçada que presenten els edificis de la via.
- **Reflectivitat [%].** Només té sentit quan la ocupació és 50 o 100. És la mitja entre la reflectivitat mitja de les façanes que donen al carrer.
- **Alçada de les lluminaàries [m].** Alçada a la que està situada la lluminaària.

6.4. Regressió Lineal

Una de les dificultats per entendre el procés de la regressió lineal és que aquest és iteratiu i, tot i que s'ha buscat donar fer una explicació lineal, el procés de revisió i execució de canvis fa que s'hagi de repetir els processos per a cada modificació.

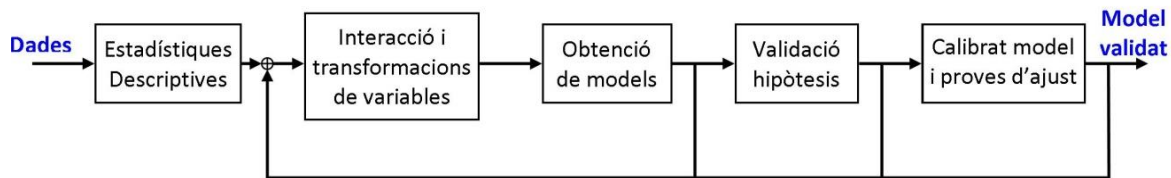


Figura 6.5. Diagrama de blocs del procés d'elaboració d'un model de regressió lineal validat.

Per tal de realitzar la regressió lineal, s'ha realitzat un estudi profund de les estadístiques descriptives per tal de depurar tots els factors productors de "soroll" o error en la qualitat del model estadístic. Aquestes es poden veure amb detall a l'Annex B.

Un cop realitzat l'anàlisi de les estadístiques descriptives, s'han realitzat proves i iteracions per tal de trobar aquelles variables i transformacions de variable amb una relació més evident amb la variable dependent.

Un cop trobades les primeres transformacions de variables i conjunts de variables amb indicis de relació lineal, s'ha generat models estadístics de "test". Tot provant models i analitzant les estadístiques resultants, s'ha observat que hi ha un conjunt de transformacions que fan més evidents la relació entre la variable dependent i les demés. Així doncs es va determinar:

- La variable dependent (EFS) es relaciona millor amb les variables independents si es realitza una transformació logarítmica natural ($\text{LN}(\text{EFS})$).
- Hi ha variables independents que mostren una millor relació lineal amb la variable dependent si es fa una transformació logarítmica natural ($\text{LN}(X_i)$).
- S'exclouen del model la reflectivitat i alçada dels edificis per si soles, i es tenen en compte en relació al grau d'ocupació.

Un cop fixades les transformacions possibles, a través de la experimentació i l'assaig-error, s'ha anat adquirint criteri sobre el model i el conjunt de dades.

Finalment, s'ha seleccionat el model que presentava millors resultats, es pot veure a continuació:

$$\begin{aligned}
 \ln(EFS) = & -0,433 - 0,609 \cdot \ln(h. lum) + 0,235 \ln(Amplada) - 0,432 \cdot 050 - 1,016 \\
 & \cdot 0100 + 0,032 \cdot TipusB - 1,589 \cdot TipusC - 1,402 \cdot TipusD - 1,882 \\
 & \cdot TipusF - 0,092 \cdot Ocupacio0: \ln Alcada. Edificis - 0,287 \\
 & \cdot Ocupacio50: \ln Alcada. Edificis - 0,61089 \\
 & \cdot Ocupacio100: \ln Alcada. Edificis - 0,361 \\
 & \cdot Ocupacio0: \ln Reflectivitat - 0,757 \cdot Ocupacio50: \ln Reflectivitat \\
 & + 1,657 \cdot Ocupacio100: \ln Reflectivitat + 0,594 \\
 & \cdot \ln(h. lum): Ocupacio50 + 1,247 \cdot \ln h. lum: Ocupacio100 - 0,145 \\
 & \cdot Ocupacio50: \ln Amplada - 0,160 \cdot Ocupacio100: \ln(Amplada) \\
 & - 0,054 \cdot \ln(Amplada): TipusB + 0,675 \cdot \ln(Amplada): TipusC + 0,130 \\
 & \cdot \ln(Amplada): TipusD + 0,403 \cdot \ln(Amplada): TipusE + 0,192 \\
 & \cdot \ln(Amplada): TipusF)
 \end{aligned}$$

Eq. 6.6

És important destacar el bon ajust d'aquest model amb un coeficient de determinació ajustat (R^2_{Adj}) del 97,13%, o el que és el mateix, menys d'un 3% de la variació de l'EFS no representat pel model.

Per últim, s'han realitzat un conjunt de proves per tal de garantir el compliment de les hipòtesis estadístiques explicades a l'apartat 6.1. A continuació es pot veure la informació gràfica més rellevant, l'anàlisi complet de la validesa del model es pot observar a l'Annex B.

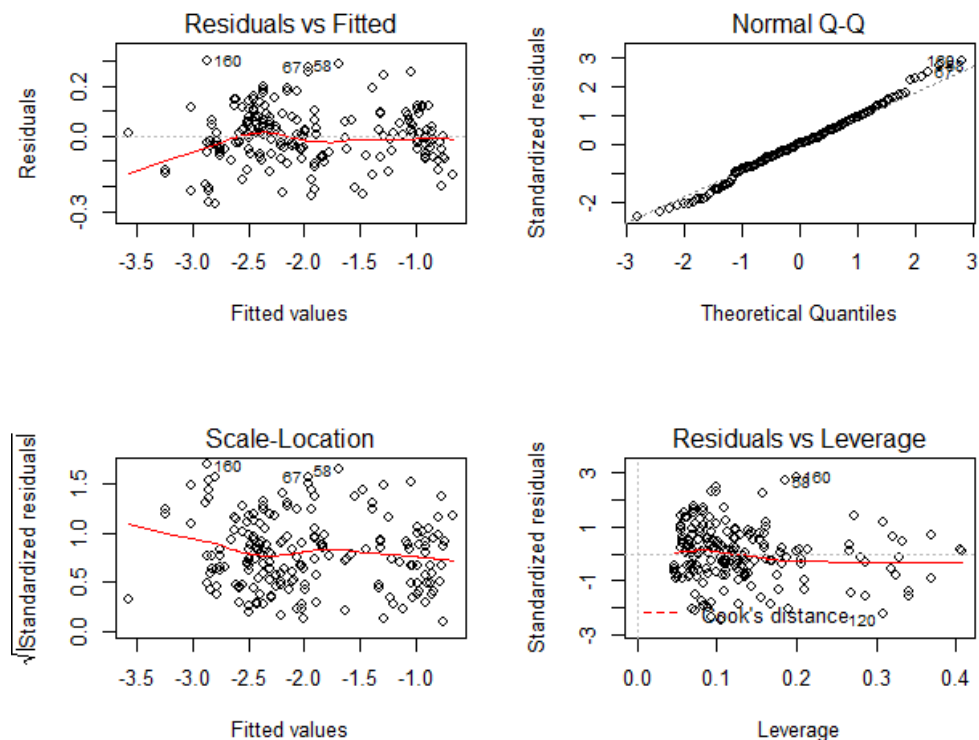


Figura 6.6. Gràfic de comprovació de les hipòtesis sobre els residus del model.

Per últim, per tal de calibrar el model, s'ha observat les possibles observacions influents i per esbrinar el seu potencial predictiu, s'ha seguit un procés iteratiu de validació creuada. Aquest consisteix en fragmentar el conjunt de dades inicial en dos conjunts de dades, un amb el 10% de

les mateixes i un altre amb el 90%. Amb el conjunt de dades gran es fa la regressió amb les variables del model (conjunt de dades regressor) i s'aplica el model obtingut a cada iteració al conjunt amb poques dades (conjunt de dades predictor). L'esquema del procés és el següent:

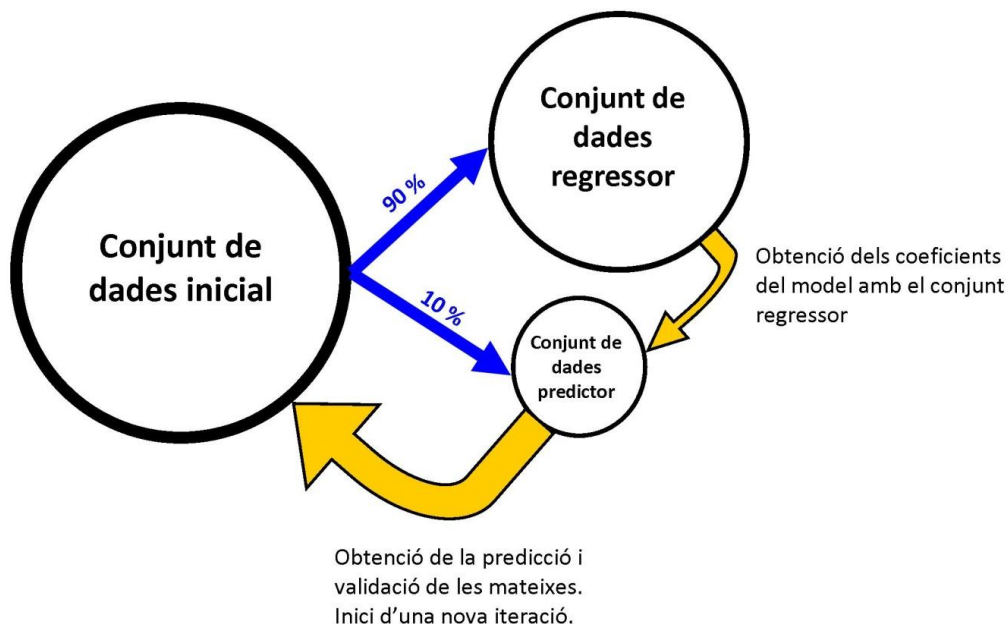


Figura 6.7. Esquema del procés iteratiu de validació creuada. Font: Elaboració pròpia.

Així, si s'observa que el valor de la variable dependent (Y) es troba dins de l'interval de predicció, es determina que el model fa una bona predicció d'aquella observació. Serà d'esperar que el 5% de les observacions es trobin fora pel nivell de significació escollit. A continuació es pot veure un extracte de la sortida d'aquest procés (ampliat a l'Annex B).

	fit	lwr	upr	valor	ErrorAbs	ErrorRel	fora
87	0.07687236	0.06007198	0.09837131	0.08750000	0.0106276435	-79.10412	1
62	0.46446087	0.35584735	0.60622597	0.40669014	-0.0577707326	-73.53608	1
182	0.08531464	0.06668477	0.10914918	0.09533333	0.0100186900	-79.95755	1
133	0.08597321	0.06652517	0.11110673	0.09419718	0.0082239709	-81.84969	1
120	0.05417847	0.04072887	0.07206944	0.03979592	-0.0143825536	-132.16119	-1
73	0.14735172	0.11444620	0.18971822	0.15763021	0.0102784894	-77.71634	1
129	0.07462210	0.05785792	0.09624366	0.07382812	-0.0007939787	-93.69263	1
100	0.14966133	0.11359166	0.19718449	0.15579446	0.0061331292	-80.48387	1
42	0.44045583	0.33210580	0.58415523	0.42660937	-0.0138464621	-60.58476	1
88	0.16630501	0.12904404	0.21432496	0.14671429	-0.0195907284	-98.68155	1
143	0.14621857	0.11442861	0.18684024	0.12169014	-0.0245284232	-107.98744	1
2	0.42258131	0.32794392	0.54452895	0.39878732	-0.0237939853	-66.08785	1
34	0.47298363	0.36922422	0.60590152	0.42920885	-0.0437747768	-67.27806	1
121	0.08303836	0.06416228	0.10746764	0.07812500	-0.0049133575	-98.47660	1
66	0.19701831	0.15394641	0.25214109	0.20625000	0.0092316850	-74.89903	1
64	0.13350838	0.10449091	0.17058411	0.12100000	-0.0125083806	-98.23750	1
152	0.09983522	0.07827498	0.12733407	0.10383725	0.0040020269	-85.76214	1
157	0.07540293	0.05908840	0.09622195	0.07636933	0.0009664005	-91.09764	1
107	0.06130641	0.04777961	0.07866276	0.06382042	0.0025140130	-89.67876	1
23	0.38888160	0.30495739	0.49590172	0.43549296	0.0466113597	-45.74758	1
[1]	0.95						

En la taula anterior, es pot observar, d'esquerra a dreta, el valor predit pel model estadístic amb els seus extrems (inferior lwr i superior upr), el valor real de l'EFS, l'error Absolut i un 1 si el valor

real es troba dins l'interval de predicció i un menys 1 en cas contrari. A l'inferior de la taula s'observa el percentatge d'encert, en aquest cas amb 20 mostres, 95%.

6.5. Anàlisi de sensibilitat del model

Per tal d'aprofundir en la validesa de l'EFS com a indicador mediambiental, s'ha realitzat un breu anàlisi de sensibilitat del model per tal de mostrar l'afectació de cada factor sobre l'indicador creat.

La interpretació del model no és senzilla, ja que aquest s'ha dissenyat per obtenir els millors valors de predicció, i s'ha realitzat diverses transformacions per millorar l'ajust. Tot i així, s'ha intentat simplificar els canvis de variable realitzats i parametritzar adequadament totes aquelles variables que interaccionen entre elles. Si tenim en consideració l'equació del model obtinguda (Eq. 6.6) queda clar que cal fer diverses operacions per tal d'aïllar cadascuna de les variables però es reduirà l'efecte de cada variable al mínim tot obtenint les equacions següents:

$$EFS = Exp^{-0,433} + f(h. lum, Ocupació) + f(Alçada. Edificis, Ocupació) + f(Reflectivitat, Ocupació) + f(Amplada, Ocupació, Tipus) \quad \text{Eq. 6.7}$$

Donat que les variables provenen d'un logaritme, les funcions esmentades anteriorment són exponencials i el càlcul de l'EFS és doncs un producte de les mateixes amb altres funcions potencials. Així doncs, les funcions obtingudes no donen valors negatius i actuen com a coeficient d'augment o reducció de l'EFS en funció de si estan per sobre o per sota d'1.

Cal tenir en compte que a diferència del Tipus de lluminària que s'ha pogut aïllar a l'amplada, l'efecte de l'ocupació apareix a totes les variables fent que el producte dels coeficients obtinguts en càlculs posteriors no sigui el resultat final. Tot i així, en base a l'observació dels resultats, s'ha considerat adequat no extreure la influència de la mateixa en cada variable.

Donada la dificultat per determinar l'afectació d'un canvi unitari en les variables, s'ha fet la comparació entre diversos valors del rang de les dades per tal de veure com influencien en el resultat final. A continuació es mostren els resultats i un petit anàlisi de la variació de cada variable:

- **Alçada de la lluminària.** Com es pot veure a la gràfica posterior, l'alçada de la lluminària té un comportament diferent en funció de la Ocupació. Mentre que per a una ocupació mitja es manté gairebé constant, quan la ocupació és total contribueix a incrementar l'EFS així com disminueix quan la ocupació és baixa.

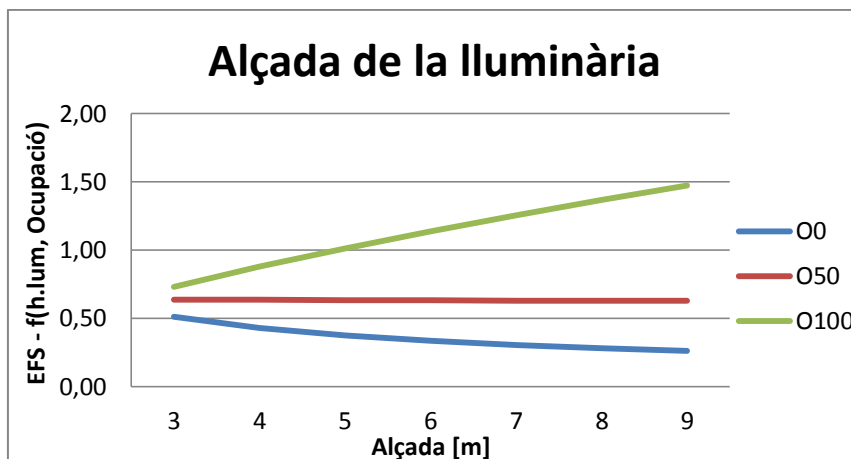


Figura 6.8. Gràfica de la relació entre l'alçada i l'EFS.

- **Alçada dels Edificis.** A diferència de l'alçada de la lluminària, en aquesta variable l'EFS corresponent a l'alçada dels edificis segueix la mateixa tendència de lleuger decrement per a les tres ocupacions sent el factor decisiu del percentatge de reducció que representa aquesta variable.

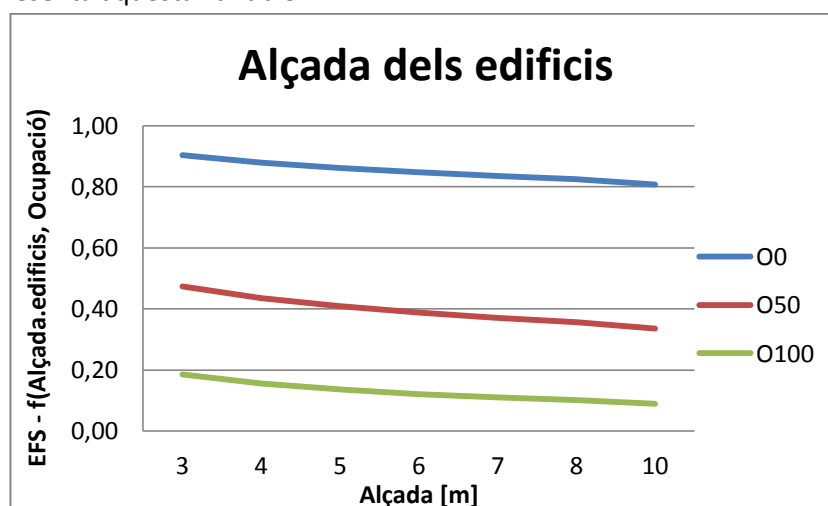


Figura 6.9. Gràfica de la relació entre l'alçada dels edificis i l'EFS.

- **Reflectivitat.** El cas de la reflectivitat torna a mostrar tendències diverses en funció de la ocupació. En aquest cas, i com és evident, la reflectivitat de les façanes quan la ocupació és zero es mou en valors propers a la unitat. Per altra banda, si hi ha edificis s'observa un increment de l'EFS.

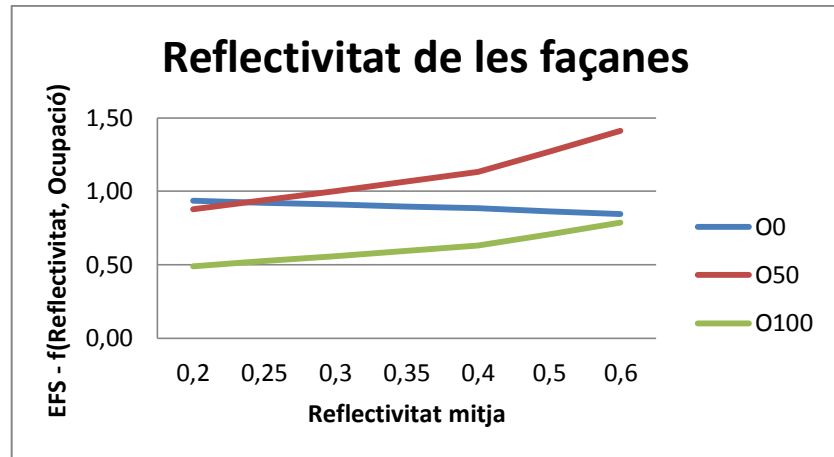


Figura 6.10. Gràfica de la relació de la reflectivitat de les façanes amb l'EFS.

- **Amplada dels carrers.** L'amplada dels carrers també és un factor important a l'EFS donat que els carrers són la superfície de reflexió principal de la llum emesa per les instal·lacions d'enllumenat públic (o ho haurien de ser). Aquesta variable no s'ha pogut separar del seu vincle amb la tipologia de lluminàries així que s'analitzen a l'hora en els gràfics següents:

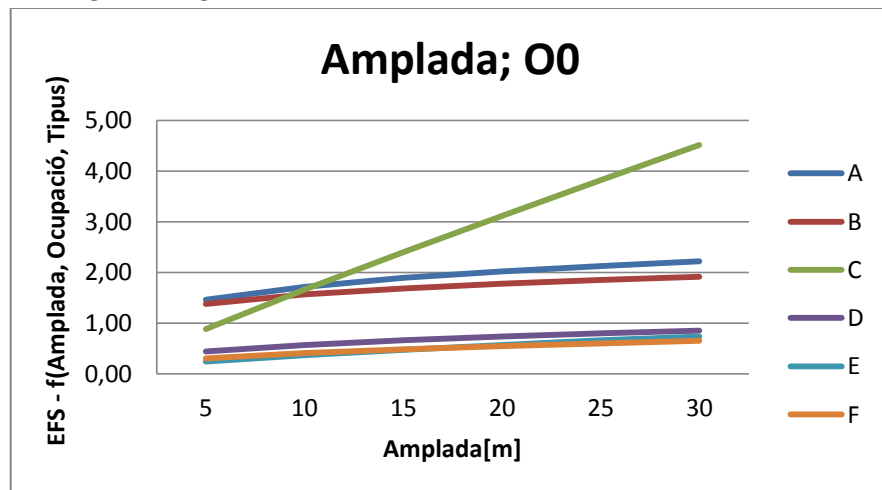


Figura 6.11. Gràfica de la relació de la amplada dels carrers amb l'EFS.

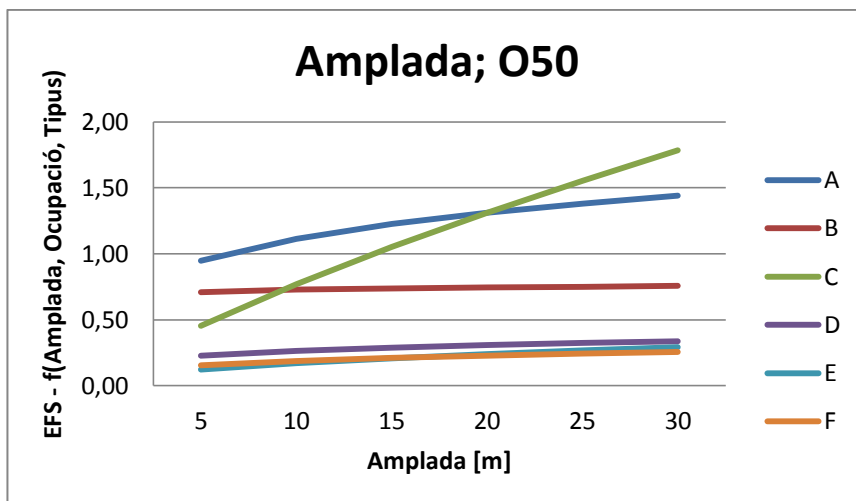


Figura 6.12. Figura 6.13. Gràfica de la relació de la amplada dels carrers amb l'EFS.

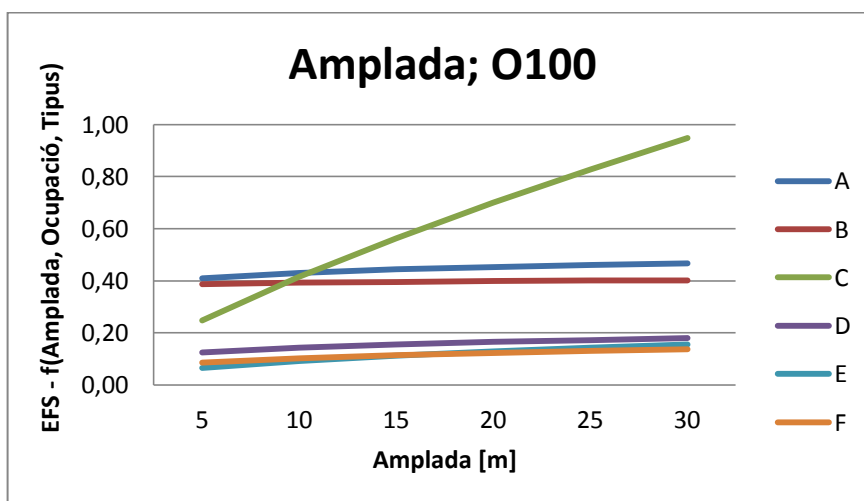


Figura 6.14. Figura 6.15. Gràfica de la relació de la amplada dels carrers amb l'EFS.

En aquestes gràfiques es pot observar l'afectació de l'amplada sobre l'EFS, es constata que hi ha un augment que segueix la mateixa tendència en gairebé totes les tipologies de lluminàries. És important observar que les lluminàries Tipus C presenten un comportament molt diferenciat, un fet que pot ser causat per la lluminària emprada en les simulacions (amb una òptica molt oberta) o bé un error de modelització. En tot cas, l'afectació d'aquesta és anecdòtica tenint en compte que representen entre un 0,5 i un 2% de les 3.303 lluminàries de Deltebre de les que s'ha determinat l'EFS (veure apartat 7.2). Un altre fet interessant d'observar és la minoració de l'EFS que suposa l'ús de lluminàries amb baix FHS_i, un fet que cal tenir en compte per a la projecció d'instal·lacions d'enllumenat.

7. Cas pràctic d'estudi: Aplicació al Delta de l'Ebre

7.1. Descripció de l'entorn

El projecte està ubicat al municipi de Deltebre, al centre del Delta de l'Ebre. La ubicació d'aquest municipi fa que s'hagi de tenir certes consideracions mediambientals i no només lumíniques a l'hora de gestionar l'enllumenat públic ja que com s'ha comentat a l'apartat 5.3 Afectacions de la contaminació Lumínica, la llum distorsiona el comportament de diversos animals com poden ser les aus i els insectes, que són els predominants a aquella zona.



Figura 7.1. Vista satel·lital del Delta de l'Ebre [10].

El riu Ebre és un dels més importants d'Espanya i el que presenta un major cabal de la península ibèrica. El Delta de l'Ebre és l'aiguamoll més gran de Catalunya per extensió a més de formar part de la Xarxa Natura 2000 com a zona LIC (Lloc d'interès comunitari) i ZEPA (Zona especial de protecció de les Aus) amb codi ES0000020. A més, també està dins del Pla d'espais d'Interès Natural de Catalunya (PEIN) i és un Parc Natural des de l'any 1980, a més d'un aiguamoll RAMSAR.

Aiguamolls	Superfície [ha]
Delta de l'Ebre	9.000
Aiguamolls de l'Empordà	5.000
Delta del Llobregat	900

Taula 7.1. Superfície dels diversos aiguamolls de Catalunya.

A més, el Delta de l'Ebre és la segona regió humida per extensió després del Parc Nacional de Doñana. És una de les regions humides més importants de l'Europa Occidental després del parc regional de la Camarga a França.

Les seves condicions climàtiques són les típiques del mediterrani, amb una temperatura mitja de 17º C i bastanta humitat. Entre Novembre i Març es poden trobar dies de fort vent procedent de Nord-Oest.

El Delta de l'Ebre està constituït per 320 km² de superfície, on un 20% són espais naturals, un 75% és espai cultivable i el 5% restant correspon a assentaments urbans. En ell viuen unes 50.000 persones, pel que les poblacions properes al parc són fàcilment reconeixibles. El municipi en concret de Deltebre està format per 12.158 habitants i una superfície de 107,4 km² [2].

La població biològica és molt diversa, compresa per plantes (on dominen canyissars i canyars) juntament amb peixos i aus. Són especialment important les aus ja que és territori nidificant per a 95 espècies diferents i també és zona d'hivernació i repòs d'aus migratòries. De les prop de 600 aus existents a Europa, 325 espècies han sigut localitzades en el Delta.

Dins l'orografia de l'entorn, hi ha un gran nombre de contexts deltaics en el que es troben platges comuns, barreres de sorra, penínsules sorrenques, camps de dunes, badies, llacunes dolces, salades i salobres, amples planes intermareals, marejols convertits en torba i marges fluvials. L'orografia és pràcticament plana, l'absència d'obstacles fa que la dispersió de la llum es vegi lliure d'interferències i l'afectació de Deltebre sobre els indrets propers així com el fenomen recíproc sobre el municipi de municipis propers sigui un factor a tenir en compte.

La zonificació de la protecció envers la contaminació lluminosa dels tres nuclis urbans de la població és E3 envoltada de E2, a excepció de Riumar que es troba gairebé envoltada d'una zona d'alta protecció (E1).



Figura 7.2. Mapa de protecció lumínica del delta de l'Ebre [3].

7.2. Anàlisi de l'estat actual i futur de les instal·lacions

Per tal de realitzar l'anàlisi de les instal·lacions del municipi de Deltebre, és important analitzar cadascun dels vectors que conformen les instal·lacions. Així doncs, tot i que les instal·lacions estan sota un procés continu de canvi, es podria dir que el que s'ha fet és una fotografia de les instal·lacions abans i després de les reformes per tal de poder valorar-les de forma profunda. Els factors a analitzar són diversos i es poden dividir en dues vessants:

- **Característiques dels carrers.** El formen aquelles dades que no apareixen a l'inventari de les instal·lacions però tenen repercussió en els càlculs de l'EFS.
 - Alçada dels edificis.
 - Reflectivitat de les façanes.
 - Ocupació dels carrers.

- **Característiques de les instal·lacions d'enllumenat.**
 - Sistema d'enllumenat
 - Làmpada
 - Luminària
 - Control i maniobra
 - Sistemes d'encesa
 - Sistemes de reducció
 - Prestacions de servei
 - Manteniment
 - Prestacions lumíniques

Així doncs, les característiques dels carrers s'han analitzat per una banda i les de les instal·lacions d'enllumenat per una altra. Donat que no s'ha pogut accedir a la totalitat de la informació, queden fora de l'abast d'aquest estudi les prestacions de servei. A continuació es defineixen alguns dels valors emprats en l'estudi i es passa a analitzar l'estat inicial i final de les mateixes.

7.2.1. Característiques dels carrers

Per tal de determinar les característiques més influents dels carrers de Deltebre s'ha emprat una classificació basada en els següents supòsits:

- Donada les dificultats per determinar cadascun dels paràmetres de carrer i al no disposar dels medis per determinar-los de forma precisa, es fa una referència qualitativa a cadascun dels mateixos.
- Donada la diversitat de condicions que es dona a cadascun dels carrers, es realitzarà un mitja de les mateixes tot fent-ho sota un mateix criteri.
- Durant el transcurs de la renovació d'instal·lacions no s'ha realitzat modificacions d'edificació significatives al conjunt de carrers de l'àmbit d'estudi.

En base a aquestes, s'ha recorregut el municipi realitzant inspeccions visuals per tal de determinar els diversos graus de cada paràmetre. Aquestes s'han fet amb suma cautela però tot i això, caldrà tenir-ho en compte de cara a la valoració dels resultats del model, ja que el model tracta dades modelitzades i discretes però la realitat és analògica i contínua.

Alçada dels Edificis

Després d'observar el conjunt de les construccions del municipi d'estudi, es va determinar unes alçades genèriques d'edificació que resumien la totalitat de casuístiques del municipi. Aquestes, estaven organitzades en tres graons tal i com es pot veure a continuació:

Alçada Edificis	Descripció	Alçada [m]
Alta	> 3 plantes	13
Mitjana	Entre 2 i 3 plantes	8
Baixa	Planta baixa	4

Taula 7.2. Classificació realitzada de l'alçada dels edificis dl municipi.

Reflectivitat de les façanes

Un altre cop, provinent d'un primer mostreig de referència, i en base a la informació sobre la reflectivitat de la Taula 5.1 s'ha realitzat una classificació en tres graons que s'observa a continuació:

Color	Descripció	Reflectivitat
Fosc	Gris, negre.	0,165
Mig	Groc, totxana, pastels	0,33
Clar	Blanc	0,66

Taula 7.3. Classificació realitzada de la reflectivitat de les façanes del municipi.

Ocupació dels carrers

En base a l'observació i tenint en compte la classificació realitzada per al model (així com la realització de les simulacions informàtiques) s'ha classificat també el grau d'ocupació dels carrers:

Ocupació	Descripció
100 %	Cobertura total, façanes properes als carrers
50 %	Parcialment cobert per una banda o bé amb façanes separades per jardí per les dues
0 %	No hi ha façanes properes

Taula 7.4. Classificació realitzada de l'Ocupació dels carrers del municipi.

7.2.2. Consideracions inicials sobre làmpades i lluminàries


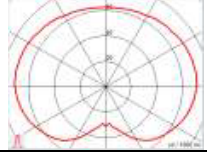



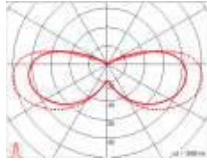

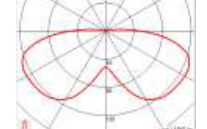

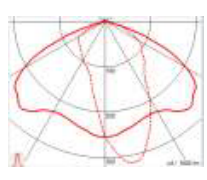

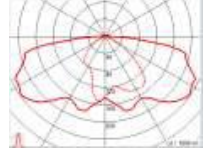

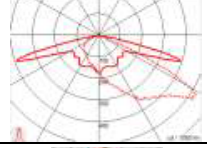


Les làmpades es classifiquen segons la tecnologia que empren per a produir la llum [1] per a classificar-les. Segons la seva tecnologia, presenten uns valors d'eficiència típica així com una temperatura de color (que influeix de forma posterior al càlcul de l'EFS al tenir en compte la làmpada en el GRE). En base a [12], s'ha realitzat la següent classificació:

Tipus	Potència mínima [W]	Potència màxima [W]	Temperatura color [K]	Eficàcia mínima [lm/W]	Eficàcia màxima [lm/W]	Eficàcia mitjana ¹ [lm/W]
Fluorescents (FL)	14	80	2700-6500	61	100	85
Fluorescents compactes (FC/FLC)	5	80	2700-6500	49	88	70
Halogenurs Metàl·lics (HM)	20	2000	2000-5100	71	120	94
Vapor Mercuri (VM)	50	1000	3300-4200	36	64	48
Vapor Sodi Alta Pressió (VSAP)	50	2000	1950-2100	73	146	107
Vapor Sodi Baixa Pressió (VSBP)	18	180	1800-2000	35	198	143
LED	-	-	2000-7000	64	140	107

Taula 7.5. Dades bàsiques de diverses tecnologies de làmpades disponibles en el mercat.

Per tal de fer una diagnosi de l'estat actual i futur de les instal·lacions, s'ha emprat una classificació de lluminàries explicada amb anterioritat. En aquest cas, per adaptar-la a l'inventari de Deltebre s'ha considerat les característiques de les lluminàries predominants al municipi. Aquesta classificació s'exposa a continuació:

¹ Aquesta eficàcia correspon a la mitja de les analitzades a l'estudi], entre les diferents fonts de llum considerades. A continuació es considera una "eficàcia tipus" que partint d'aquest treball, pugui ser representativa en cada cas de les instal·lacions més comunes, no de la tecnologia existent.

Tipus	Descripció	Fotografia	Rendiment [%]	FHS _i [%]	Fotometria Tipus	Estat de servei	Valoració Global (Canvi)
A	Boles sense protecció		80%	50 %		Baix	Necessari
B	Boles amb protecció mínima		60%	40 %		Mig	Recomanat
C	Lluminàries ornamentals		60%	35 %		Mig	Recomanat
D1	Lluminàries sense cubeta difusora		70 ¹ %	10 %		Baix	Necessari
D2	Boles amb làmpada dins del difusor i Ornamentals adaptades		75%	5 %		Alt	No
E	Lluminàries viaries amb cubeta esfèrica		70%	5 %		Mig	Recomanat
F	Lluminàries vials amb cubeta plana		80%	1 %		Alt	No
G	Projectors		70%	Segons Orientació ó (20 % mig)		Alt	Regular Orientació

Taula 7.6. Taula dels valors considerats per a les diverses lluminàries de l'àmbit d'estudi.

¹ Tot i aquest valor sigui elevat, cal considerar que l'estat d'aquestes lluminàries el redueix considerablement a causa de la brutícia (no hi ha protecció de la làmpada) i sovint, han sobrepassat la seva vida útil.

7.2.3. Situació inicial

La informació sobre la situació inicial de les instal·lacions s'ha extret de la Auditoria energètica i mediambiental de l'enllumenat públic de Deltebre [13] i les dades del inventari facilitades per ELECNOR. A l'auditoria, es recull la possibilitat d'incrementar significativament l'eficiència energètica del conjunt d'instal·lacions d'enllumenat públic municipal.

A continuació s'ha desglossat la informació del inventari de Deltebre a l'inici de l'explotació de les instal·lacions i abans de les reformes. Tal i com s'ha explicat anteriorment, s'han analitzat diversos vectors per separat.

Sistemes d'enllumenat

A. Làmpades

Les làmpades s'han classificat segons la tecnologia que empen i la potència. A continuació es pot veure un resum gràfic:

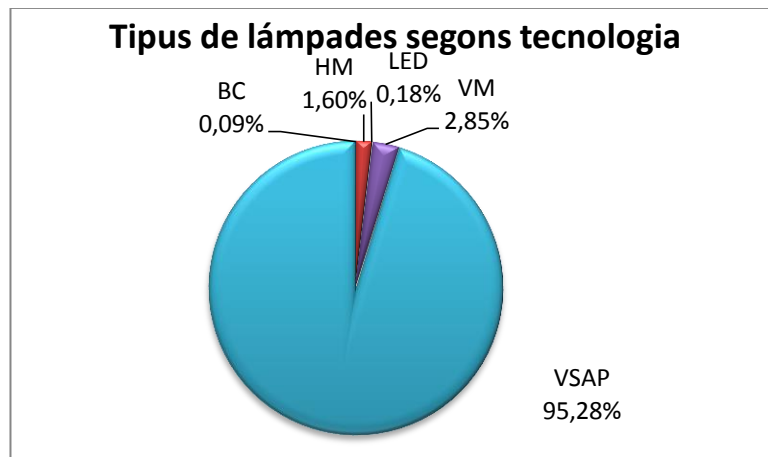


Figura 7.3. Classificació de les làmpades segons la tecnologia emprada per unitat.

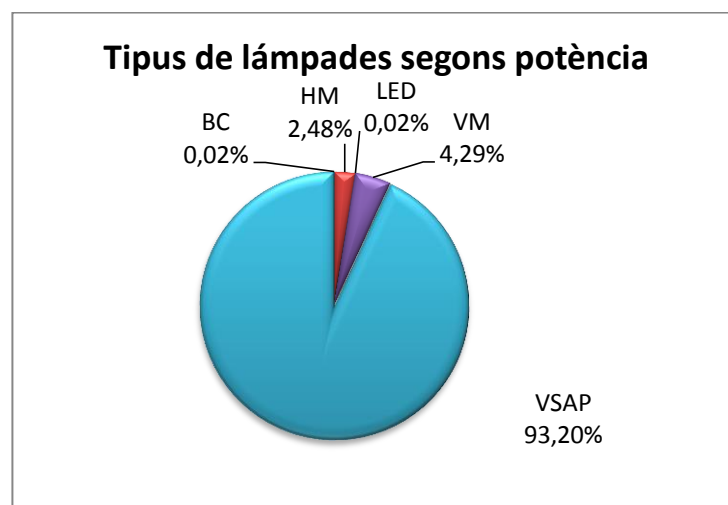


Figura 7.4. Classificació de les làmpades segons la tecnologia emprada per potència.

On es pot veure que la tipologia de làmpades predominants són les de Vapor de Sodi d'Alta Pressió (d'ara en endavant VSAP). Aquest fet és positiu ja que en el rang de potències superiors a 70 W, les làmpades de VSAP són les més eficients. A més, presenten una temperatura de color i espectre electromagnètic que afecta menys als essers vius així com minimitza la seva dispersió per l'esfera celeste.

Per altra banda, s'observa que les làmpades d'Halogenurs Metàl·lics (d'ara en endavant HM) així com les de Vapor de Mercuri (d'ara en endavant VM) no representen més d'un 3% de les unitats i un percentatge inferior al 5% de la potència cada una. En ambdós casos, aquests valors suggereixen que es tracta d'unes instal·lacions envellides però per dos casos completament diferents. Les làmpades de Vapors de Mercuri han desaparegut de les instal·lacions d'enllumenat públic per la seva baixa eficiència així com l'ús de làmpades d'HM s'ha estès de forma significativa degut a la millora de la seva eficiència (major flux lumínic per una determinada potència) i les seves bones propietats per proporcionar una visió semblant a la diürna.

Per últim, es pot constatar que les làmpades de Baix Consum i Led, representen una part marginal de les unitats instal·lades així com una part encara inferior (del 0,02%) de la potència instal·lada al municipi. Aquest fet és degut a que la majoria d'unitats instal·lades són de baixa potència.

A continuació es pot veure una taula amb un anàlisi més detallat de les tecnologies per potència.

Tecnologia	Potència unitat [W]	Unitats	Proporció unitats	Potència total [W]	Proporció potència
BC	22	3	0,09%	66	0,02%
HM	70	16	0,48%	1.120	0,33%
	150	29	0,88%	4.350	1,26%
	250	1	0,03%	250	0,07%
	400	7	0,21%	2.800	0,81%
LED	11	6	0,18%	66	0,02%
VM	125	70	2,12%	8.750	2,54%
	250	24	0,73%	6.000	1,74%
VSAP	70	1.384	41,90%	96.880	28,17%
	100	1.032	31,24%	103.200	30,01%
	150	632	19,13%	94.800	27,56%
	250	93	2,82%	23.250	6,76%
	400	6	0,18%	2.400	0,70%
Total general		3.303	100,00%	343.932	100,00%

Taula 7.7. Taula de l'anàlisi de detall de les tecnologies de làmpades emprades a l'àmbit d'estudi.

Finalment, s'ha determinat l'eficiència mitja del conjunt de les làmpades de la instal·lació realitzant el producte de la potència instal·lada de cada tecnologia segons una eficiència típica. La fórmula del càlcul és la d'una mitja ponderada i es pot observar a continuació:

$$\begin{aligned} & \text{Eficiència mitja de les instal·lacions} \\ & = \frac{\sum \Pi_{tipus} \text{Potència total} \cdot \text{Eficiència típica}}{\sum_{tipus} \text{Potència total}} \end{aligned} \quad \text{Eq. 7.1}$$

L'eficiència inicial de les làmpades de la instal·lació és de **97,4 lm/W**.

B. Luminàries

Abans de l'execució de les reformes d'enllumenat, les 3.303 lluminàries del municipi presentaven la següent distribució segons les tipologies exposades a la Figura 7.5.

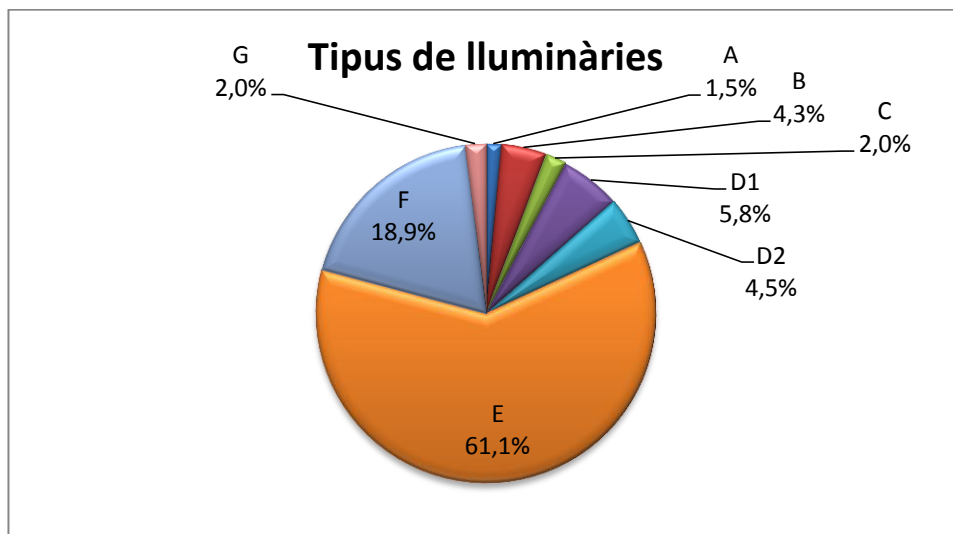


Figura 7.5. Resum gràfic del conjunt de lluminàries de l'àmbit d'estudi.

Tipus de lluminàries	Unitats	Proporció
A	48	1,5 %
B	141	4,3 %
C	67	2,0 %
D1	192	5,8 %
D2	150	4,5 %
E	2017	61,1 %
F	623	18,9 %
G	65	2,0 %
Total	3.303	100 %

Taula 7.8. Resumde detall de les lluminàries instal·lades a l'àmbit d'estudi.

Tenint en compte aquestes dades i el nombre de lluminàries de cada tipologia, s'ha determinat l'FHS; mig de les instal·lacions que és del 7,59 %.

Amb aquestes dades i la valoració global esmentada anteriorment (Figura 7.6), s'ha calculat la valoració global de les lluminàries en funció de si necessiten un canvi o són projectors en els que es recomana regular la orientació:

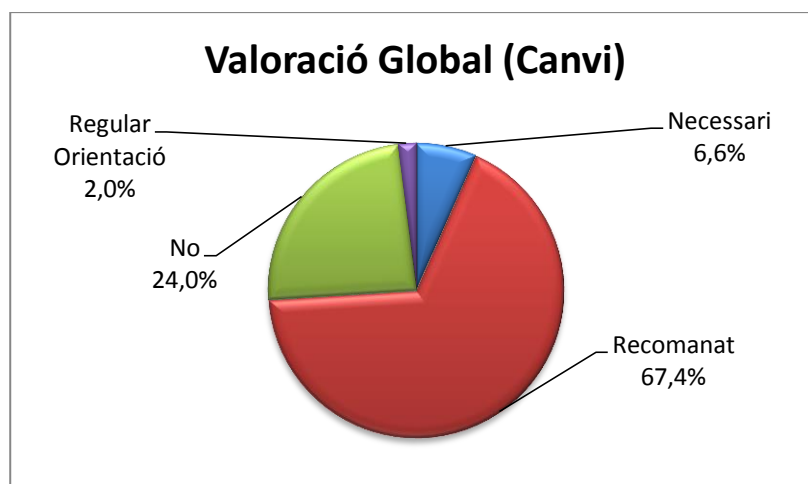


Figura 7.6. Representació gràfica de la valoració global de lluminàries.

Control i maniobra

C. Sistemes d'encesa i reducció

Els 50 quadres de maniobra que hi havia inicialment al municipi presenten les mateixes característiques, encesa a través de rellotge astronòmic i cap sistema de reducció.

Identificador Quadre	Sistema d'encesa actual	Sistema de regulació
69.1	Rellotge Astronòmic	Cap
69.2	Rellotge Astronòmic	Cap
...	Rellotge Astronòmic	Cap
...	Rellotge Astronòmic	Cap
69.49	Rellotge Astronòmic	Cap
69.50	Rellotge Astronòmic	Cap

Taula 7.9. Informació a nivell de quadre disponible per a l'àmbit d'estudi.

Un cop analitzats els sistemes d'encesa i regulació, cal fer una ullada a dos conceptes que permetran la realització posterior del càlcul de l'energia anual consumida per les instal·lacions. Aquests dos conceptes són:

$$\begin{aligned} \text{Hores Teòriques de Funcionament (HTF)} \\ = \text{Hores de funcionament de les instal·lacions} \end{aligned} \quad \text{Eq. 7.2}$$

$$\begin{aligned} \text{Hores Teòriques d'Utilització (HTU)} \\ = \text{Hores a Plena Potència} + \% \text{ Reducció}_{\text{elèctrica}} \\ \cdot \text{Hores a Reducció} \end{aligned} \quad \text{Eq. 7.3}$$

Així doncs, segons les coordenades del municipi de Deltebre i els horaris d'exploació inicials, s'obté un resultat de:

Hores teòriques de Funcionament (HTF) [h]	4.306
Hores teòriques d'Utilització (HTU) [h]	4.306

Taula 7.10. Hores de funcionament de les instal·lacions.

Del sistema d'encesa, cal dir que segons el criteri establert pel Real Decret 1890 [1], els sistemes d'encesa han de ser mitjançant un rellotge astronòmic i es permet fotocèl·lula per instal·lacions de potències inferiors a 5 kW.

Els rellotges astronòmics presenten l'avantatge que no requereixen ajustos cada cert temps. Funcionen d'acord amb la longitud i la latitud on es troba el quadre i es poden programar electrònicament per fer apagades parcials o reduccions sempre que es consideri oportú.

Quan s'utilitzen fotocèl·lules, aquestes, amb el temps es solen embrutar i acaben encenent-se molt abans del que realment caldria. A més, en casos en que el dia és molt nuvolós, pot ser que s'encengui l'enllumenat, quan hi ha suficient llum per veure-hi. Tot això fa que la fiabilitat d'una cèl·lula no sigui massa bona

En quant als sistemes de reducció de flux lumínic, cal considerar que són obligatoris per a instal·lacions noves de potències superiors a 5 kW. Aquests són molt útils en les hores de mínima circulació o activitat als carrers de les poblacions, donant la possibilitat de reduir el consum energètic. En aquesta línia hi ha dos sistemes generalitzats: la reducció punt a punt o la regulació en capçalera. En ambdós casos es pot arribar a reduccions del fins al 40% de la potència consumida, que incideix de forma directa sobre la factura energètica del municipi. Caldrà tenir-ho en compte a l'hora de valorar les instal·lacions després de les reformes.

7.2.4. Situació final

Per obtenir la situació final, s'ha analitzat els canvis proposats per l'empresa que va passar a gestionar les instal·lacions d'enllumenat. En l'anàlisi s'ha procedit de forma anàloga a la situació inicial.

A. Làmpades

Les làmpades s'han classificat segons la tecnologia que empen i la potència. A continuació es pot veure un resum gràfic:

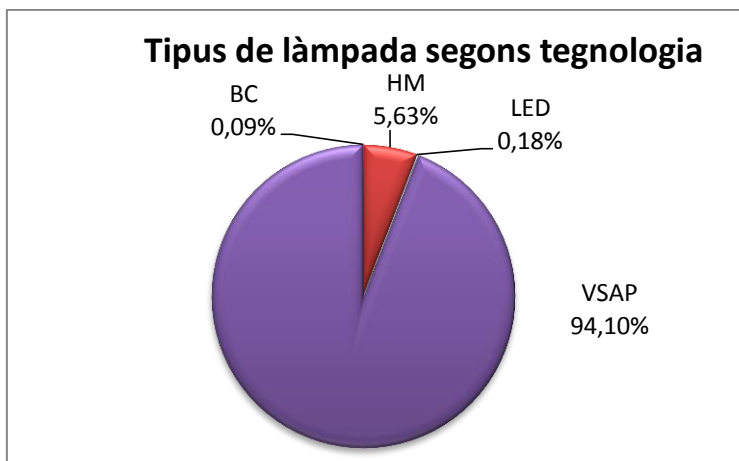


Figura 7.7. Classificació de les làmpades segons la tecnologia emprada per unitat.

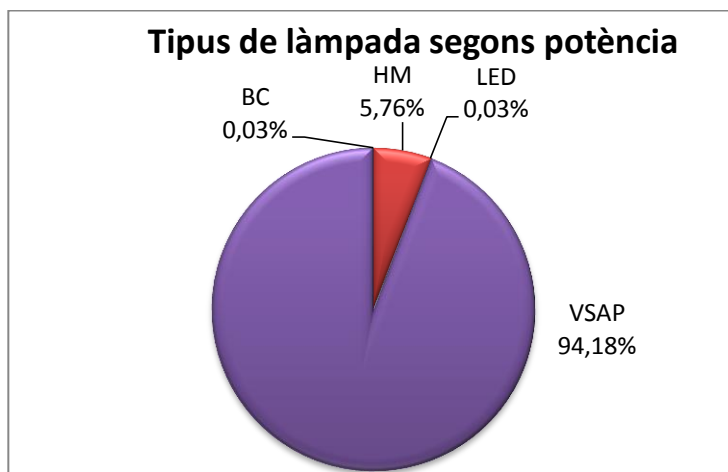


Figura 7.8. Classificació de les làmpades segons la tecnologia emprada per potència.

On es pot veure que les làmpades de VSAP han incrementat lleugerament la seva presència en el municipi. Les làmpades de HM representen ara més de tres cops de les unitats que eren inicialment i han duplicat el que representen en potència. Cal observar també que s’ha retirat totes les làmpades VM, un fet que denota que les instal·lacions s’han modernitzat i segueixen les tendències esmentades a l’anàlisi de la situació inicial.

En quant a les làmpades LED i BC, no ha hagut cap variació respecte a la situació inicial i segueixen sent una part marginal de les unitats instal·lades així com una part encara inferior de la potència instal·lada al municipi.

A continuació es pot veure una taula amb un anàlisi més detallat de les tecnologies per potència.

Tecnologia	Potència	Unitats	Proporció unitats	Potència [W]	Proporció Potència
BC	22	3	0,09%	66	0,03%
HM	50	28	0,85%	1400	0,61%
HM	70	136	4,12%	9520	4,18%
HM	100	22	0,67%	2200	0,97%
LED	11	6	0,18%	66	0,03%
VSAP	50	1108	33,55%	55400	24,33%
VSAP	70	1490	45,11%	104300	45,81%
VSAP	100	435	13,17%	43500	19,10%
VSAP	150	75	2,27%	11250	4,94%
Total general		3.303	100,00%	227.702	100,00%

Taula 7.11. Taula de l'anàlisi de detall de les tecnologies de làmpades emprades a l'àmbit d'estudi.

Finalment, amb el procediment anàleg a la situació inicial s'ha determinat l'eficiència mitja del conjunt de les làmpades de la instal·lació. La fórmula del càlcul és la Eq. 7.1 i amb els valors de la instal·lació després de les reformes es determina una eficiència mitja de **98,8 lm/W**.

B. Luminàries

Després de l'execució de les reformes d'enllumenat, les 3.303 lluminàries del municipi presenten la següent distribució segons les tipologies exposades a Taula 7.6.

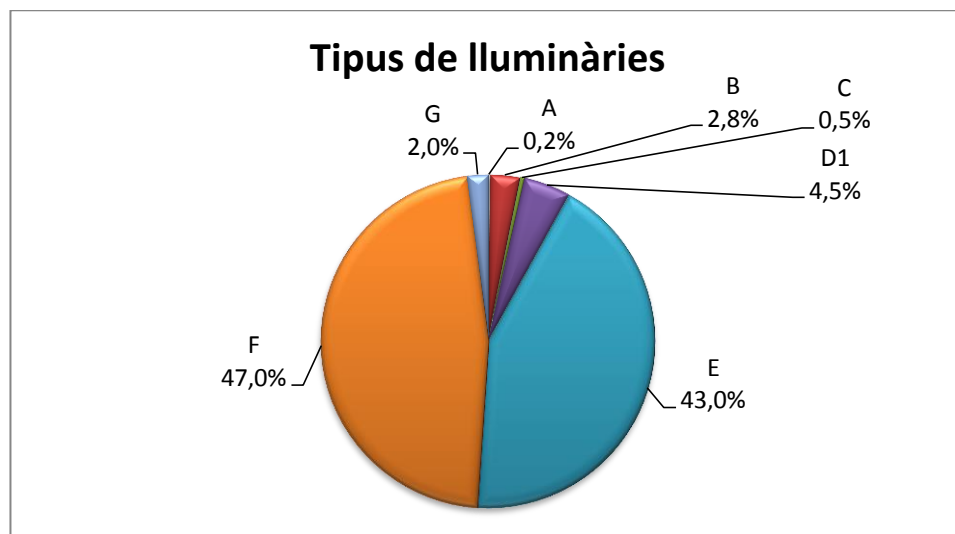


Figura 7.9. Resum gràfic del conjunt de lluminàries de l'àmbit d'estudi.

Tipus	Unitats	Proporció [%]
A	8	0,2%
B	93	2,8%
C	15	0,5%
D	150	4,5%
E	1421	43,0%
F	1551	47,0%
G	65	2,0%
Total	3.303	100%

Taula 7.12. Resumde detall de les lluminàries instal·lades a l'àmbit d'estudi.

Tenint en compte aquestes dades i el nombre de lluminàries de cada tipologia, s'ha determinat l'FHS_i mig de les instal·lacions que és 4,65 %.

Amb aquestes dades i la valoració global esmentada anteriorment, s'ha calculat la valoració global de les lluminàries en funció de si necessiten un canvi o són projectors en els que es recomana regular la orientació:

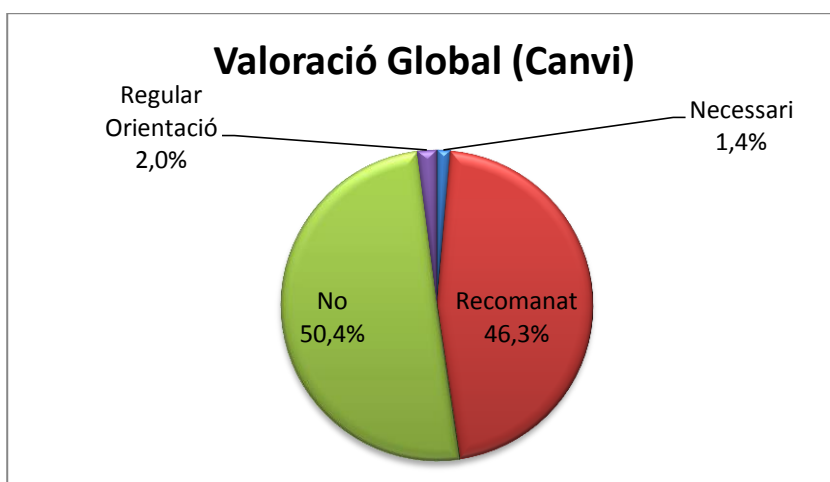


Figura 7.10. Representació gràfica de la valoració global de lluminàries.

Control i maniobra

C. Sistemes d'encesa i reducció

Dels 50 quadres de maniobra de les instal·lacions, no ha variat res, segueixen presentant encesa a través de rellotge astronòmic. La variació més significativa que s'ha apreciat és un sistema de reducció incorporat a l'equip auxiliar de tots els punts de llum amb la capacitat de reduir el flux lumínic al 50% i la potència elèctrica al 60%. L'ús d'aquest sistema mostra el seu alt potencial en

estalvi energètic i racionalització de l'enllumenat a més d'una ràpida amortització i la seva obligatorietat per instal·lacions noves amb més de 5kW [1].

Per tant, al haver reducció, les hores teòriques de funcionament (HTF) segueixen sent les 4.306 hores esmentades amb anterioritat. En canvi, segons la definició feta a les equacions Eq. 7.2 i Eq. 7.3a) al entrar en funcionament el sistema de reducció a les 3 hores del funcionament en horari d'hivern i a les 4 hores a l'estiu, les HTU difereixen de les d'abans de la reforma de les instal·lacions.

Hores teòriques de Funcionament (HTF) [h]	4.306
Hores teòriques d'Utilització (HTU) [h]	3.081

Taula 7.13. Hores de funcionament de les instal·lacions.

7.3. Aplicació del model estadístic

Un cop definides les característiques de les instal·lacions, s'ha codificat de la mateixa manera que les dades d'entrada al model estadístic obtingut a l'apartat 6.4.

És important tenir en compte les singularitats del municipi, així doncs, s'ha exclòs del càlcul les places per no formar part de les dades d'entrada del mateix així com aquells indrets on la lluminària és un projector per formar part d'una singularitat. Amb aquest criteri, s'ha analitzat 3.120 lluminàries, l'EFS de les lluminàries que manquen s'ha determinat segons la metodologia de referència explicada a 5.4.1.

De cara a la validesa dels resultats, és important la observació i anàlisi de cadascun dels factors que influeixen a la fórmula de la regressió estadística ja que els resultats vàlids s'obtenen al interpolar entre els valors coneguts dels factors. Segons aquesta condició, no tindria validesa, introduir valors d'algun factor que estiguessin fora del conjunt de dades que s'ha emprat per a realitzar la regressió, aquest anàlisi es pot trobar a l'Annex B.

Per últim, donat que l'EFS és un valor percentual, cal aplicar una darrera correcció a la informació obtinguda del model per tal de determinar el flux sortint de les instal·lacions del municipi de Deltebre. Aquest, és el factor de manteniment, té en consideració la depreciació de làmpades i lluminàries.

El factor de manteniment és la relació entre la il·luminància que hi ha en unes instal·lacions passat un cert temps del seu funcionament i a l'inici de l'explotació. Així, el factor de manteniment relaciona l'estat inicial de la instal·lació amb les condicions previstes de servei.

$$f_m = \frac{E_{servei}}{E_{inicial}} \quad \text{Eq. 7.4}$$

Aquest, per definició és inferior a 1, depèn principalment de:

- Tipus de làmpada, depreciació del flux lluminós i supervivència de les làmpades.
- Estanqueïtat del sistema òptic de la lluminària mantingut durant el transcurs del seu funcionament.

- Naturalesa i modalitat del tancament de la lluminària.
- Qualitat i freqüència de les operacions de manteniment.
- Grau de contaminació de la zona on s'instal·li la lluminària.

Segons el RD1890/2008 [1], aquest es pot calcular amb el producte de tres factors tabulats en funció d'unes hipòtesis:

$$f_m = FDFL \cdot FSL \cdot FDLU \quad \text{Eq. 7.5}$$

On:

- FDFL és el Factor de Depreciació del Flux lumínic de la Làmpada.
- FSL és el Factor de Supervivència de la Làmpada.
- FDLU el Factor de Depreciació de la Luminària.

Per tant, per al seu càlcul s'han realitzat un seguit d'hipòtesis basades en el coneixement de les instal·lacions:

- Les accions de manteniment preventiu es porten a terme cada 3 anys.
- Hi ha manteniment correctiu, per tant, es pot considerar FSL=1.
- Donat l'entorn salí i humit de l'entorn, es considera un grau de contaminació mig.

Obtenint uns valors per al factor de manteniment de:

Lluminària	A	B	C	D1	D2	E	F	G
Làmpada								
VSAP	73,80 %	73,80 %	47,70 %	47,70 %	73,80 %	73,80 %	73,80 %	73,80 %
HM	59,86 %	59,86 %	38,69 %	38,69 %	59,86 %	59,86 %	59,86 %	59,86 %
VM	62,32 %	62,32 %	40,28 %	40,28 %	62,32 %	62,32 %	62,32 %	62,32 %
BC	68,88 %	68,88 %	44,52 %	44,52 %	68,88 %	68,88 %	68,88 %	68,88 %
LED ¹	85 %							

Taula 7.14. Factors de manteniment obtinguts.

Aquest seguit de factors de manteniment segons la tecnologia emprada, s'han emprat per calcular les Emissions lumíniques en lúmens un cop determinat l'EFS per a tots els carrers que no presentaven singularitats. És rellevant esmentar que per aquelles situacions que se sortien dels valors dels factors analitzats s'ha emprat el càlcul aproximat de l'EFS segons Eq. 5.4.

¹ Donat que al RD 1890 no s'especificuen valors per a les lluminàries LED, s'ha emprat una nota informativa d'ANFALUM [14].

7.4. Taula resum de les característiques de les instal·lacions

Un cop determinats tots els paràmetres des del punt de vista de l'anàlisi mediambiental d'unes instal·lacions d'enllumenat, cal fer una recopilació de la informació rellevant i posar-la a la vista per tal de fer un anàlisi objectiu.

	Abans				Després				Diferencial relatiu respecte a l'inicial
Nombre de lluminàries	3.303				3.303				-
Valoració Global (Lluminàries)	Nec: 6,6 %	Rec: 67,4 %	No: 24,0 %	R.O.: 2 %	Nec: 1,4 %	Rec: 46,3 %	No: 50,4 %	R.O.: 2 %	-
Eficiència mitja làmpades [lm/W]	97,4				98,8				1,44 %
Potència instal·lada [kW]	343,9				227,7				- 33,79 %
Hores teòriques d'utilització [h/any]	4.306				3.081				- 28,45 %
Energia consumida a l'any [GW·h/any]	1.480,97				701,55				- 52,63 %
Factura elèctrica¹ [€/any]	281.384				133.294				- 52,63 %
FHS_{mig} [%]	7,59 %				4,87 %				-35,84 %
EFS_{mig} [%]	11,03 %				3,40 %				- 69,17 %
EFS [klm]	1.861,84				1.211,01				-34,96 %
GRE	2.110,30				1.230,19				- 41,71 %
Emissions atmosfèriques [tn CO₂]²	367.280,56				173.984,4				- 52,63 %

Taula 7.15. Taula resum de les característiques mediambientals més rellevants de l'àmbit d'estudi.

7.5. Conclusions sobre els resultats

Un cop acabada la renovació de les instal·lacions d'enllumenat públic municipal, es poden veure millores en les instal·lacions, algunes de més significatives que altres.

No ha s'ha afegit cap punt de llum al municipi però si que s'observa que la política de canvis ha reduït considerablement el nombre de lluminàries amb una baixa o molt baixa catalogació (Canvi necessari o Recomanable) així com les considerades com a òptimes (Canvi no necessari) han

¹ Amb el preu del kWh segons el valor emprat pel Grup d'Estudis Luminotècnics.

² Amb el factor d'emissió (248 g de CO₂/kWh a 2013) de la Guia Pràctica per al càlcul d'emissions de Gasos d'Efecte Hivernacle de l'OCCC de la Generalitat de Catalunya.

arribat al 50% de les instal·lades. Pel que fa a l'eficiència mitja de les làmpades s'observa que la política de canvis de làmpades ha estat positiva per a l'eficiència de les làmpades havent incrementat l'eficiència poc més d' 1lm/W.

Per altra banda hi ha una davallada fins a dos tercers parts de l'inicial de la potència instal·lada. Un altre factor que ha millorat ha sigut el de la racionalització de l'ús de l'enllumenat nocturn, ja que amb l'ús de la regulació de l'enllumenat, les hores "a plena potència" de les instal·lacions han disminuït un 28,45 %. Els dos factors anteriors han sigut crucials de cara al decrement de l'energia consumida per les instal·lacions amb la reducció proporcional de les emissions atmosfèriques i la facturació energètica de més del 50 %.

Seguint la tendència de molts dels indicadors analitzats, s'aprecia un descens de l' FHS_{mig} de gairebé un 70% respecte a l'inicial. Tot i que la renovació d'instal·lacions ha canviat un terç de les lluminàries del municipi, aquestes actuacions s'han portat a terme en les lluminàries menys eficients i això ha repercutit en aquest indicador.

Per últim, és important destacar la disminució en la potència lumínica emesa cap al cel més d'un 30 %, així doncs; des de la perspectiva oposada, des de l'espai, el municipi de Deltebre brilla menys intensament i ho fa durant menys hores.

Per últim, el GRE ha disminuït gairebé un 40 % part fruit en part de l'encert en l'elecció de la tipologia de làmpades així com la disminució del flux lumínic emès en general.

En definitiva, la valoració de la renovació de les instal·lacions és molt bona, mostrant una millora de les mateixes en tots els vectors mediambientals. Com a valors que esdevindran el punt de partida del desenvolupament de la ESE al municipi, hi ha un terç de les lluminàries renovades i unes condicions molt favorables per a l'amortització de la inversió.

Tot i això, de cara al futur, serà gairebé impossible disminuir d'una manera tan generosa la facturació energètica donat que el graó en quant a consum energètic de les instal·lacions que s'ha produït és molt profund. De cara al futur cal tenir en compte que caldria una gran millora en les tecnologies d'enllumenat per a poder generar una abaxada de potència similar i per tant, caldrà finançar la renovació de la part d'instal·lacions que estaran envellides.

Després de l'anàlisi de tots els vectors mediambientals, cal fer un apunt en quant al gran descens dels indicadors d'impacte mediambiental de les instal·lacions. Des del punt de vista integral, seria bo fer un anàlisi de les condicions lumíniques que es donen al municipi tot confirmant que les condicions visuals són apropiades per tal de poder establir algun judici més sobre les mateixes.

7.6. Comparació de l'indicador obtingut amb l'aproximat

Per tal de mesurar l'impacte mediambiental de la renovació d'instal·lacions, s'ha comptat amb diversos indicadors de l'afectació de les instal·lacions d'enllumenat, però també s'ha intentat redissenyar-ne un. Per tal de validar la qualitat del mateix, s'ha realitzat un seguit de càlculs tot analitzant si l'indicador obtingut a través de l'anàlisi estadístic funciona adequadament i millora la precisió d'indicadors emprats amb anterioritat al mateix.

Amb aquesta finalitat, s'ha comparat el càlcul aproximat de l'EFS a l'inici i final de la renovació de les instal·lacions per tal d'observar el comportament de l'indicador modelitzat en relació amb el càlcul aproximat de Eq. 5.4 que es mostra a continuació:

$$EFS = FTI \cdot \overline{FHS}_i + FTI \cdot (\overline{FHI} \cdot \nu) \quad \text{Eq. 5.4}$$

Cal tenir en compte que el \overline{FHS}_i i reflectivitat de l'asfalt són els únics factors que considera el càlcul de l'EFS. Aquest, està fitat inferiorment pel coeficient de reflectivitat de l'Asfalt, per tal de determinar-lo rigorosament s'ha tingut en compte els valors exposats a la Taula 5.1 així com la taula següent:

MATERIALES	REFLEXION %	TRANSMISION %	ABSORCION %
Vidrio claro 3 mm	6 a 10	80 a 92	2 a 8
Vidrio deslustrado	8 - 20	70 - 90	5 - 20
Vidrio opalino	40 - 78	12 - 50	4 - 30
Vidrio sintético claro	3 - 5	85 - 90	3 - 6
Vidrio sintético deslustrado	10 - 30	60 - 80	5 - 20
Espejo con superficie pulida y plateada	75 - 90		10 - 25
Espejo de vidrio plateado	70 - 94		6 - 10
Espejo de aluminio brillantado	85 - 90		10 - 15
Espejo de aluminio pulido	65 - 70		25 - 35
Espejo de aluminio satinado	55 - 60		40 - 45
Esmalte blanco	65 - 75		25 - 35
Laca de esmalte blanca	75 - 85		15 - 25
Papel con dibujo blanco	70 - 85		15 - 30
Terciopelo negro	2 - 4		96 - 98
Azulejos blancos	65 - 75		25 - 40
Chapa esmaltada blanca	60 - 80		20 - 40
Cinc	10 - 20		80 - 90
Cemento blanco	40 - 50		50 - 60
Enlucido de portland ordinario	30 - 40		60 - 70
Ladrillos rojos	15 - 25		75 - 85
Ladrillos amarillos	35 - 40		60 - 65
Madera clara	40 - 50		50 - 60
Asfalto	8 - 12		88 - 92
Pintura de paredes:			
blanca	70 - 85		15 - 30
amarilla	50 - 70		30 - 50
roja	25 - 40		60 - 75
parda, gris	25 - 50		50 - 75
verde, azul	15 - 45		55 - 85

Figura 7.11. Coeficients de Reflexió, Transmissió i Absorció de diversos materials de la construcció [15].

Establint un coeficient de reflexió de l'asfalt mig del 10 %, s'ha realitzat els càlculs tant per a la situació inicial com la final i comparat amb els intervals de predicció obtinguts del model estadístic. El resultat es pot observar a continuació:

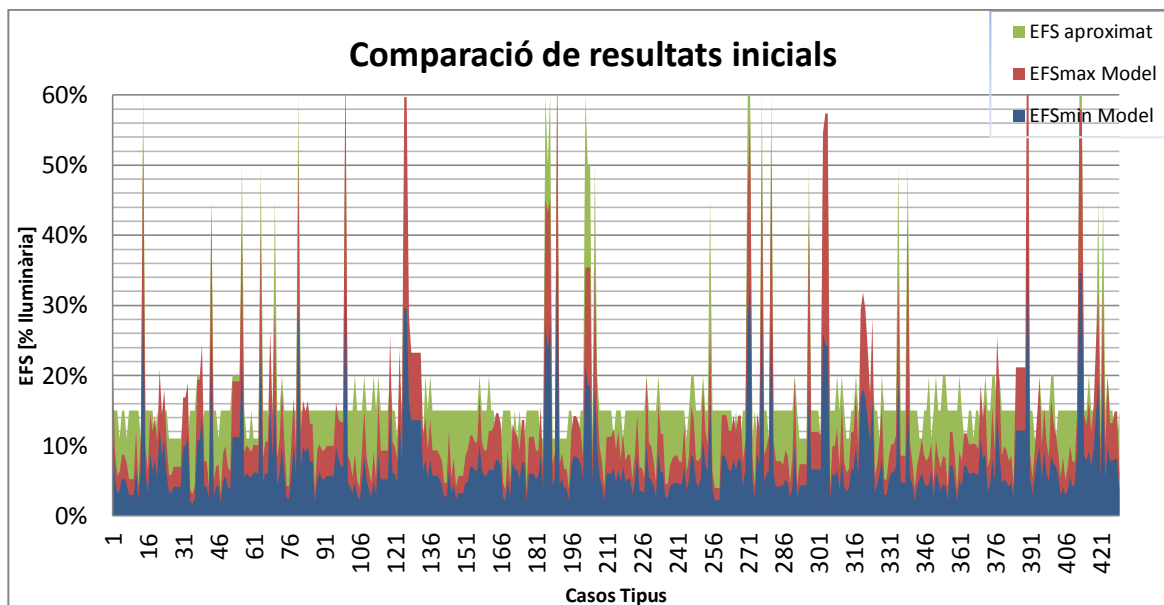


Figura 7.12. Comparació de resultats entre el càlcul aproximat i el model estadístic de l'EFS per l'estat inicial de les instal·lacions.

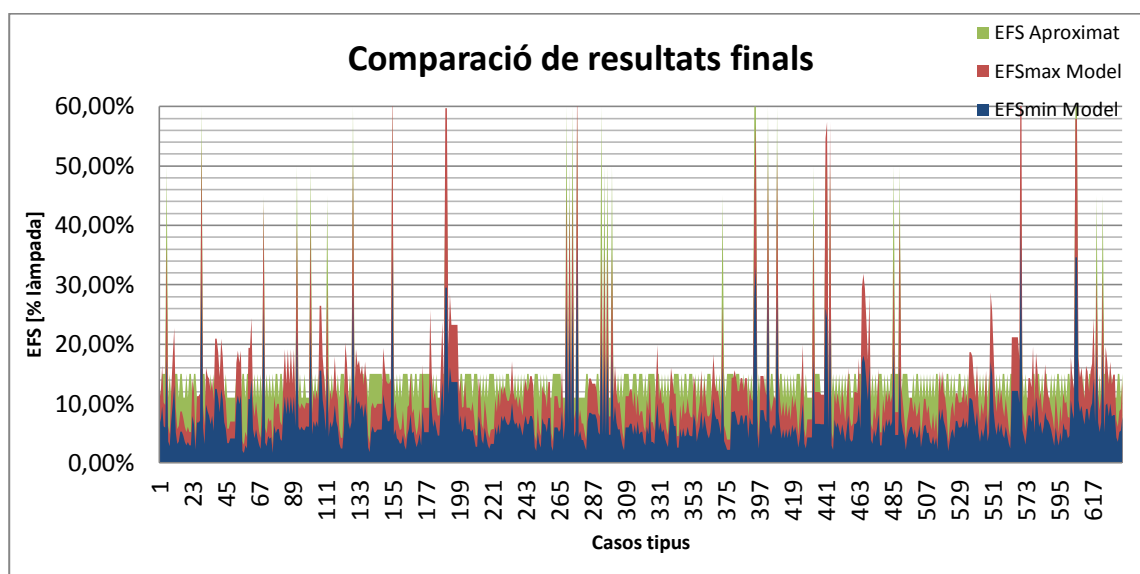


Figura 7.13. . Comparació de resultats entre el càlcul aproximat i el model estadístic de l'EFS per l'estat inicial de les instal·lacions.

El model estadístic en la seva aplicació pràctica presenta un ample ventall de valors i tots prou coherents. Cal constatar que alguns màxims de l'interval de predicció agafen valors molt alts però per norma general la predicció és estable en uns valors que semblen coherents. De l'observació i anàlisi de les gràfiques anteriors es desprèn que l'EFS calculat a través del model estadístic presenta per norma general un valor entre un 5 i un 10 % inferior al calculat segons el model aproximat. Aquest fet pot ser per marges o imperfeccions del càlcul aproximat o bé defectes de modelització, fet que és indeterminable en el transcurs del present projecte.

8. Mesures del fons celeste amb SQM

8.1. Punt de mesura continuu

Per tal d'obtenir una monitorització de la variació de la brillantor de l'esfera celeste durant la renovació d'instal·lacions d'enllumenat al municipi de Deltebre es va ubicar un SQM que va estar mesurant durant un període de 7 mesos. Aquest sensor estava ubicat a una distància de 5 quilòmetres en línia recta del municipi de Deltebre, a continuació es pot veure una imatge del seu emplaçament:

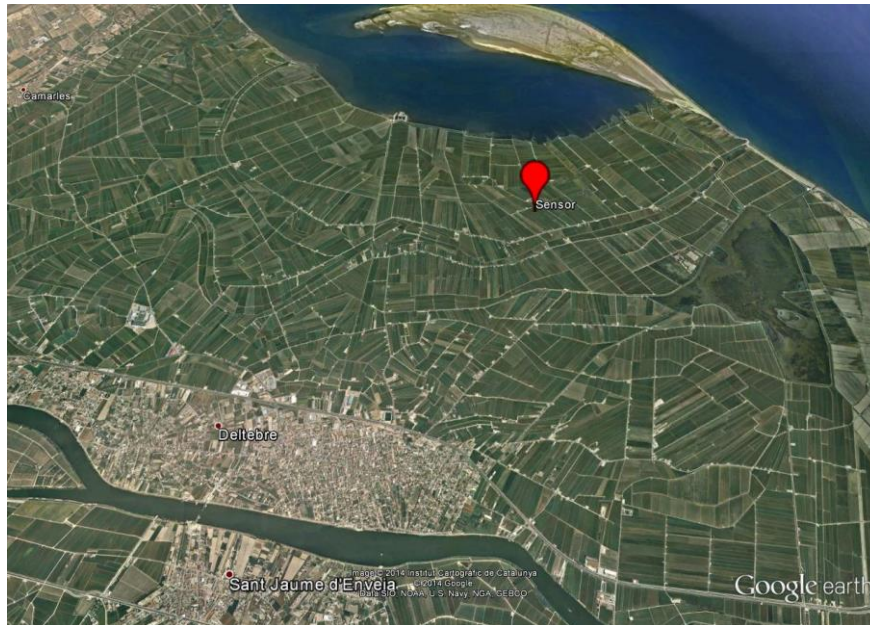


Figura 8.1. Ubicació precisa de la ubicació del sensor SQM.

Donat que la brillantor de l'esfera celeste es captura cada 15 minuts, s'ha obtingut un conjunt extens de 11.474 mesures. De cara a l'observació de les mesures, cal tenir en compte que:

- Les mesures vàlides són aquelles realitzades sense influència de la lluna o núvols.
- Cal descartar variacions en les mesures provocades per error experimental com pot ser la ubicació d'un au sobre el sensor o altres causes.
- Durant el període de mostreig, va haver un període de gairebé un mes en el que es va extreure el sensor per error d'una persona que desconeixia el projecte.

Tenint en compte això, s'han posat tots els valors obtinguts de forma gràfica per intentar observar alguna evolució de les mesures.

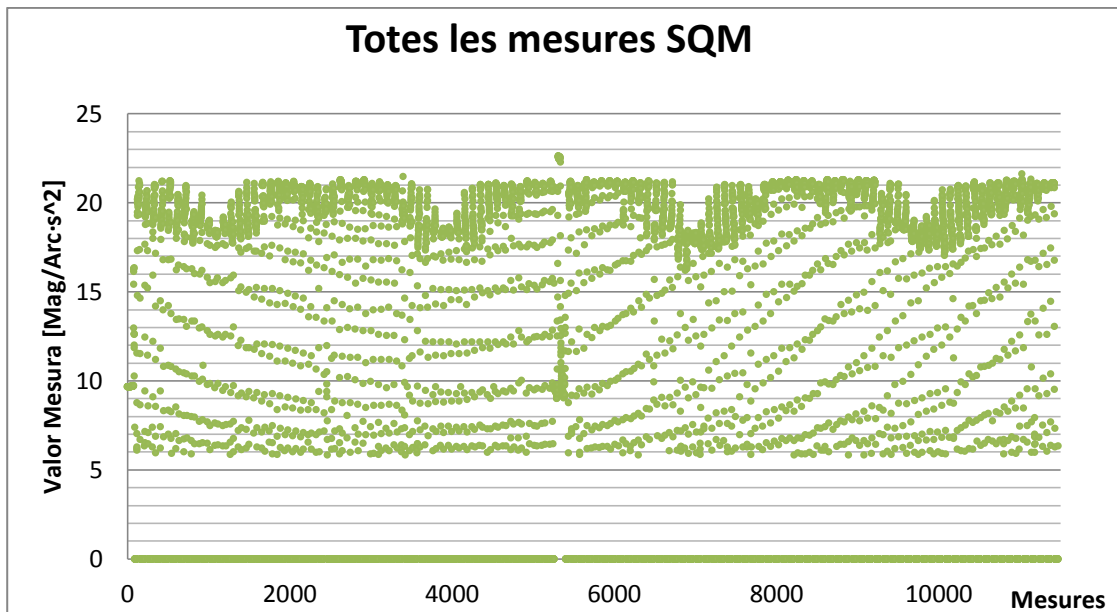


Figura 8.2. Representació de totes les mesures obtingudes a través de mesures fixes.

De l'observació de la totalitat de les dades es pot extreure:

- Que el sensor SQM no mesura per sota de 5 Mag/Arc·s².
- S'observa una oscil·lació dels valors entremitjos de mesura del fons celeste segurament influïda per els cicles lunars i les estacions.
- Hi ha un conjunt de mesures afectades per alguna irregularitat ja que s'obtenen valors molt extrems i superiors a 21,35 Mag/ Arc·s².
- Els valors interessants per l'anàlisi de l'evolució de la brillantor del fons celeste són aquells que es donen en unes condicions òptimes d'observació (sense lluna ni núvols).

Donat el seguit d'observacions anteriors i que de forma general, quan les condicions d'observació no són òptimes, no s'obtenen valors més elevats de Mag/Arc·s², s'ha realitzat un filtratge de dades. Per a fer-ho, s'ha descartat totes aquelles observacions que podrien provenir d'un error experimental així com intentant extreure aquelles mesures que poden interferir en l'anàlisi correcte de la brillantor de fons del cel.

A continuació es poden observar mesures diverses i el filtratge realitzat a fi d'observar la variació en la brillantor de l'esfera celeste que s'ha produït.

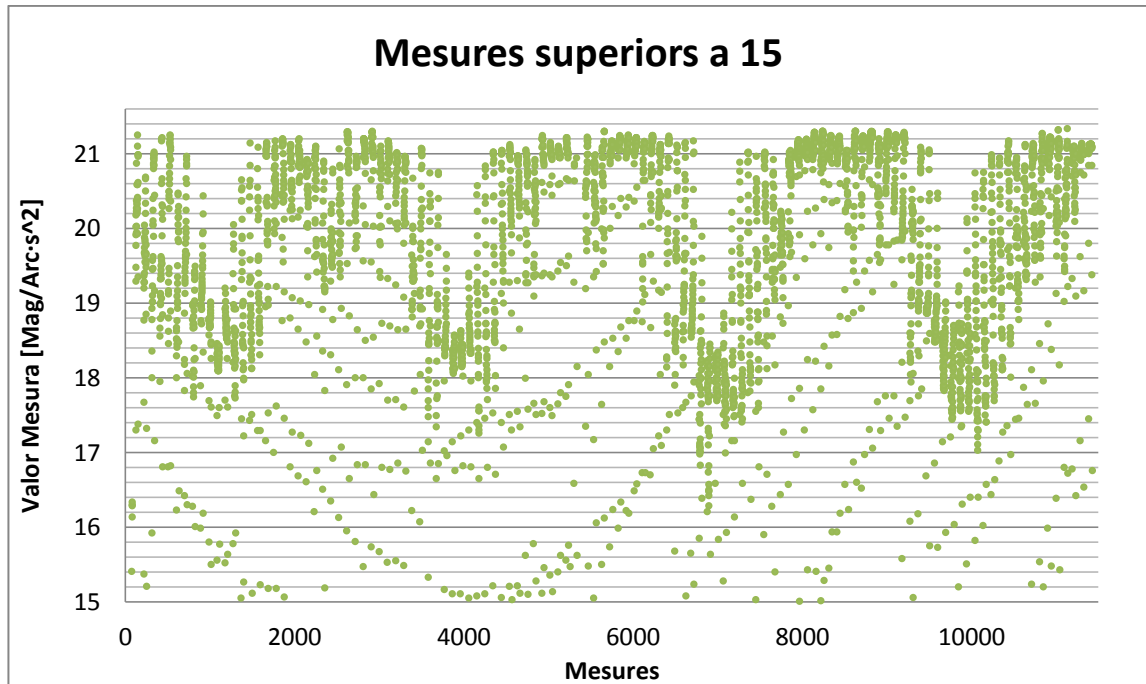


Figura 8.3. Representació de les mesures realitzades que compleixen les condicions de filtratge.

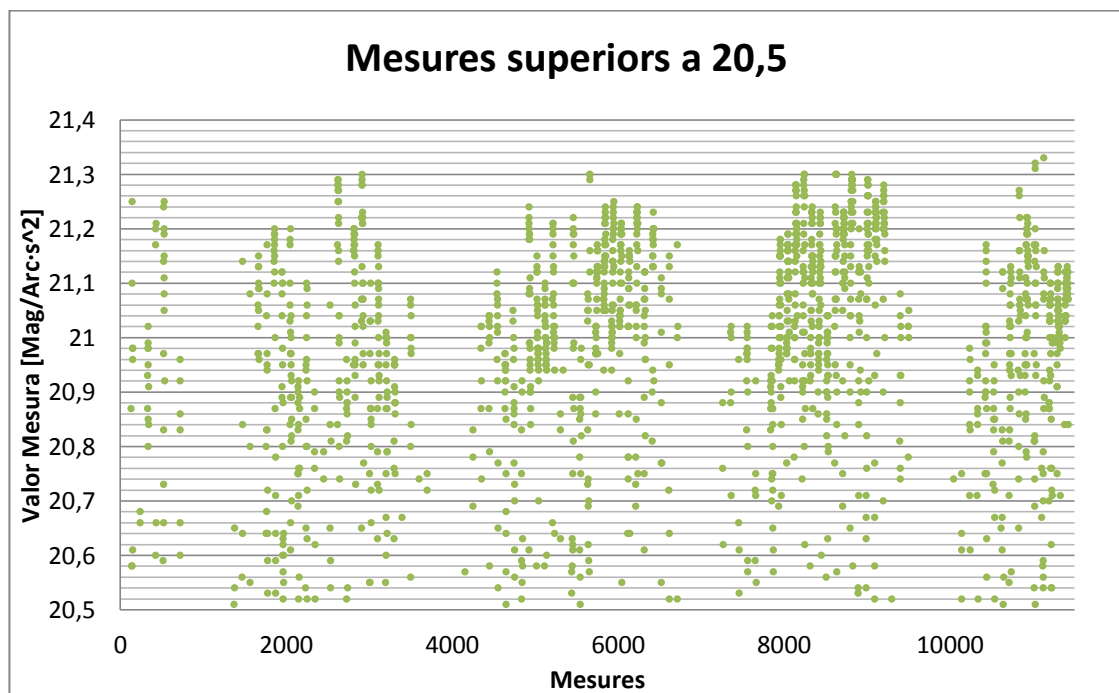


Figura 8.4. Representació de les mesures realitzades que compleixen les condicions de filtratge.

De l'observació de les gràfiques anteriors és interessant observar la variació sincrona de les dades en la qual es poden veure les fluctuacions en la brillantor del cel en funció dels cicles lunars o altres condicions meteorològiques. Per altra banda, encara que amb poca claredat, resulta interessant observar una lleugera tendència a l'augment de les dades.

A més de l'estudi realitzat amb anterioritat, també s'ha realitzat un anàlisi que ha permès determinar la foscor màxima assolida durant la nit. Tenint en compte que els cicles lunars fan que la mateixa només estigui present la totalitat de la nit durant uns dies determinats, el mostreig dels valors màxims de la nit permet observar les condicions òptimes d'observació de les nits en les que es dona:

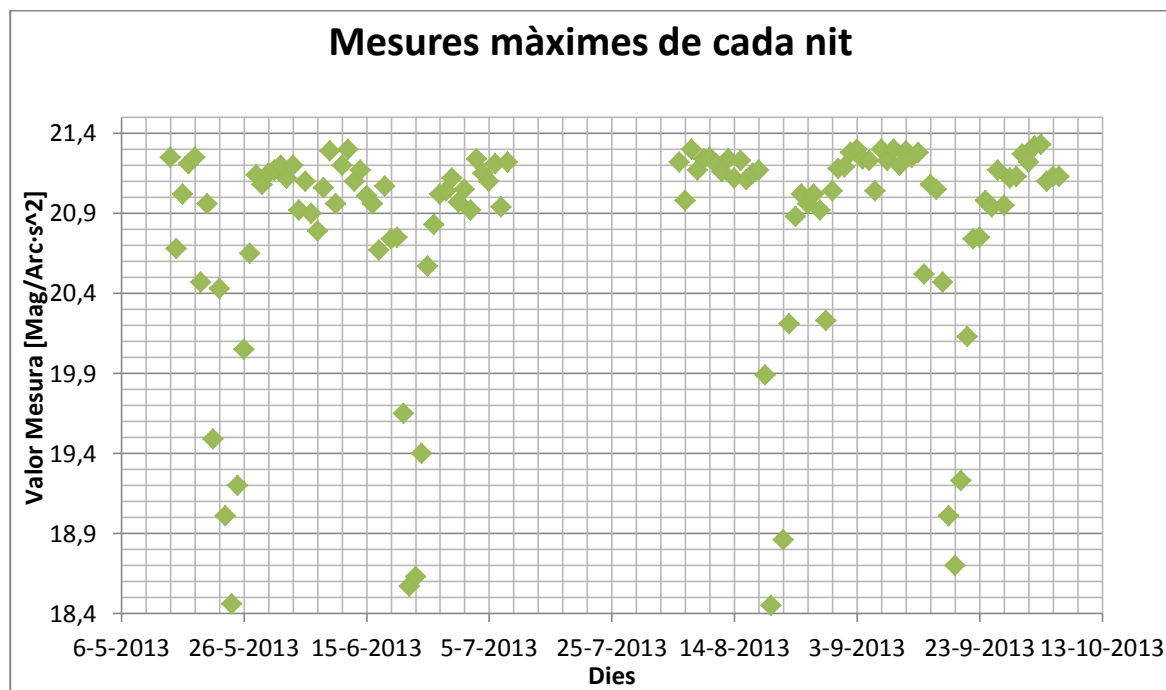


Figura 8.5. Representació cronològica de les mesures màximes de la nit obtingudes de forma fixa.

És important aprofundir en aquest estudi tenint en compte la taula següent:

Mag/arcsec ²	Cielo (estado)
< 19,5	Fuertemente luminoso
20,0	Muy luminoso
20,5	Luminoso
21,0	Poco luminoso
21,5	Medianamente oscuro
> 21,5	Muy oscuro

Taula 8.1. Valors de diverses calitats del cel nocturn [16].

Amb la finalitat d'observar amb claredat els valors que es troben per sobre de 21 i que comporten un cel poc lluminós, s'ha ampliat la gràfica anterior tot observant que la freqüència de valors elevats (superiors a 21,3 Mag/Arc-s²) augmenten:

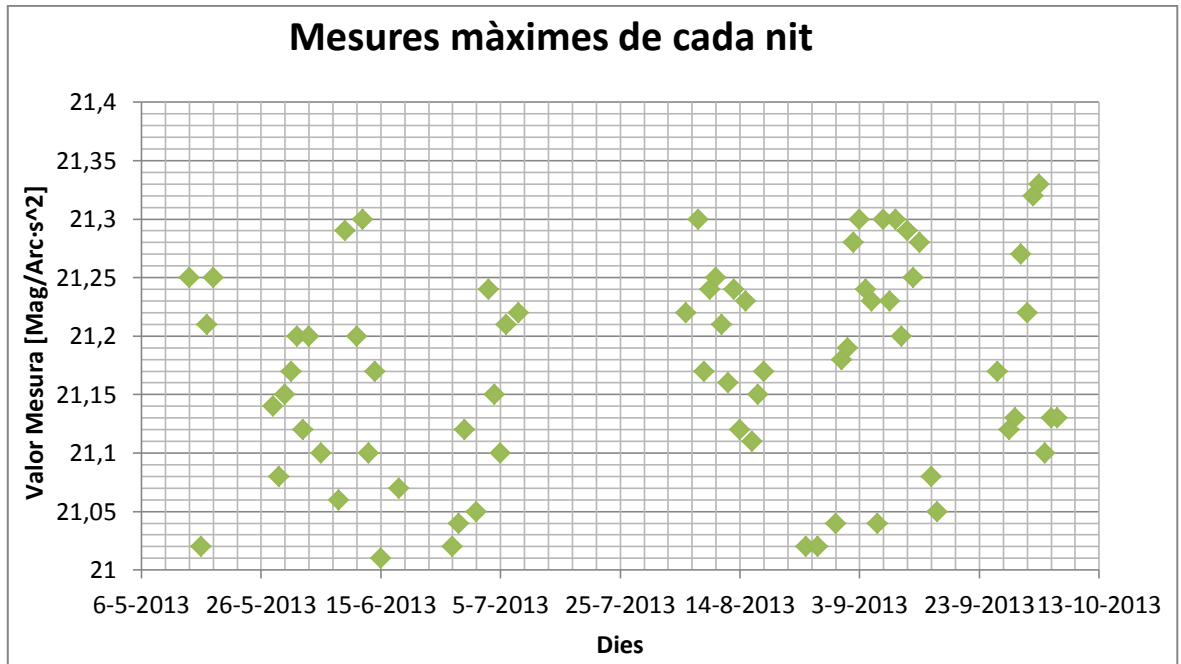


Figura 8.6. Ampliació de les mesures màximes de cada nit.

Així doncs, de la monitorització realitzada a través de mesures contínues es mostra un augment no quantificat de la qualitat del cel de l'entorn del municipi.

8.2. Mesures puntuals disperses

Una altra forma de monitoritzar la reforma d'instal·lacions s'ha realitzat a través de mesures de brillantor de l'esfera celeste per l'entorn del municipi. S'ha realitzat un total de 47 mesures la ubicació de les quals es pot observar a continuació:

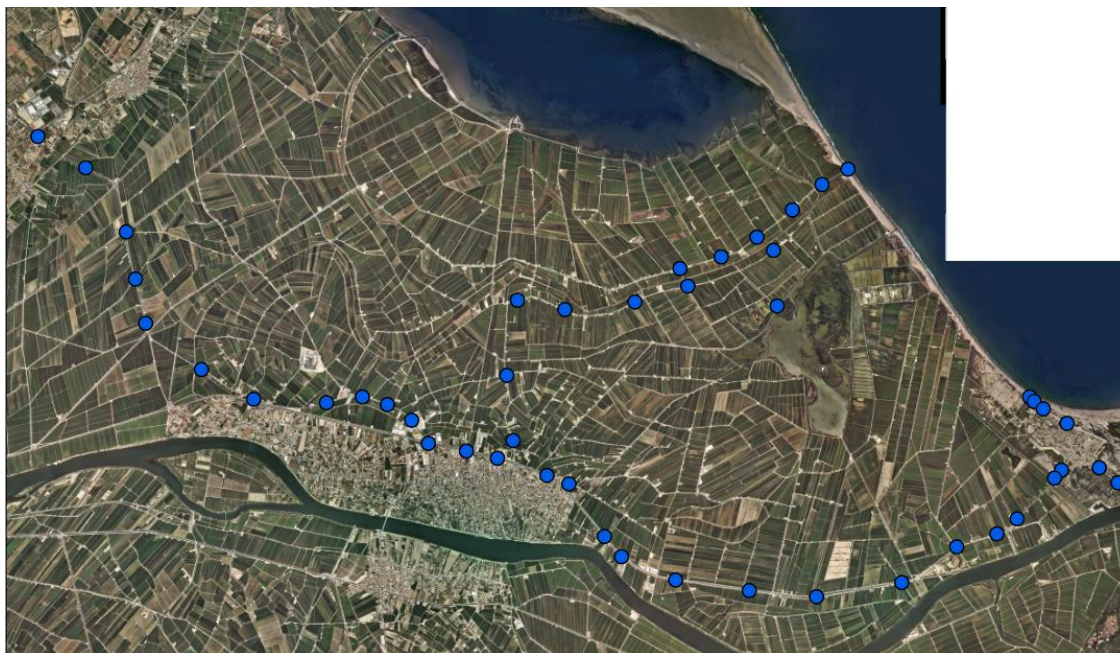


Figura 8.7. Mesures disperses realitzades a l'àmbit d'estudi.

S'ha realitzat mesures la nit del 14 de Març de 2013 així com el 6 d'Abril de 2014 després de la posta de lluna. El procés de mesura s'ha realitzat amb un GPS i un SQM per tal d'obtenir la major precisió i el mínim error de les mesures.

De cara a la observació dels resultats, és important tenir en compte que les mesures de les instal·lacions en el seu estat final es van fer en horari de reducció ja que és la forma en la que es troben la major part de la nit. Això fa que el flux lumínic baixi i segurament ha repercutit de forma additiva a la renovació d'instal·lacions en els resultats.

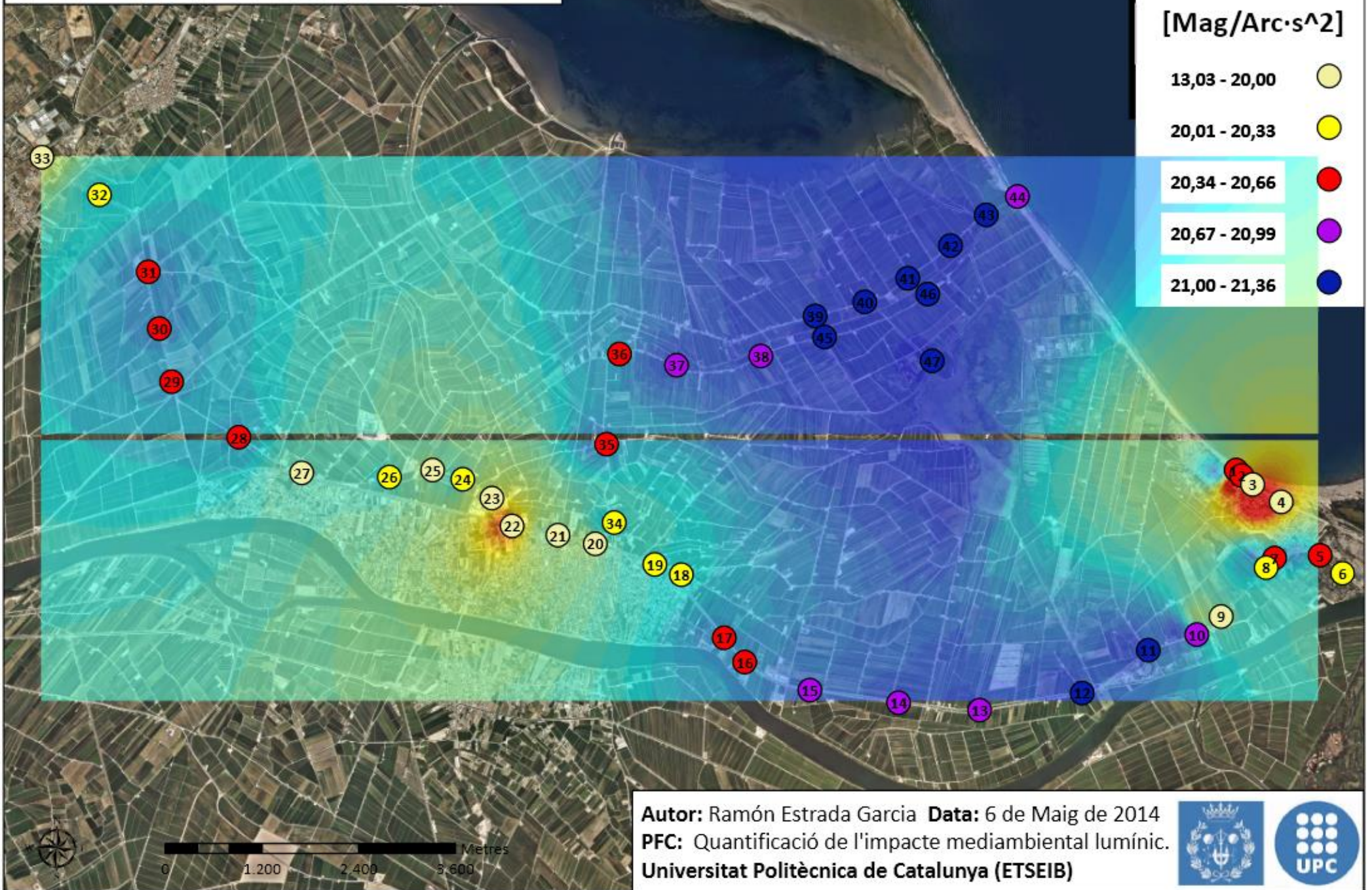
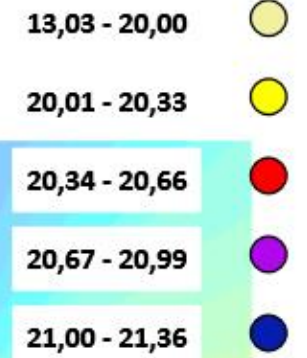
S'ha realitzat una interpolació quadràtica (com la dispersió de la llum) entre els diversos punts per tal de determinar una possible aproximació dels valors dels punts propers. Cal tenir en compte que el mallat inicial no estava realitzat amb aquesta finalitat així que hi ha alguns punts amb una predicció dubtosa però són útils de cara a l'observació de tendències generals.

És important remarcar que per al mapa de mesures Inicials i Finals s'ha emprat la mateixa llegenda amb els mateixos intervals fent que les mesures siguin comparables per inspecció visual. Com a avenç dels resultats és important remarcar que les mesures amb SQM han augmentat un 0,36 de mitja amb un increment relatiu mig de l'1,48% respecte a l'inici. A continuació es poden observar els resultats.

Mesures inicials disperses amb SQM

Llegenda

[Mag/Arc·s²]



Mesures finals disperses amb SQM

Llegenda

[Mag/Arc·s²]

13,03 - 20,00



20,01 - 20,33



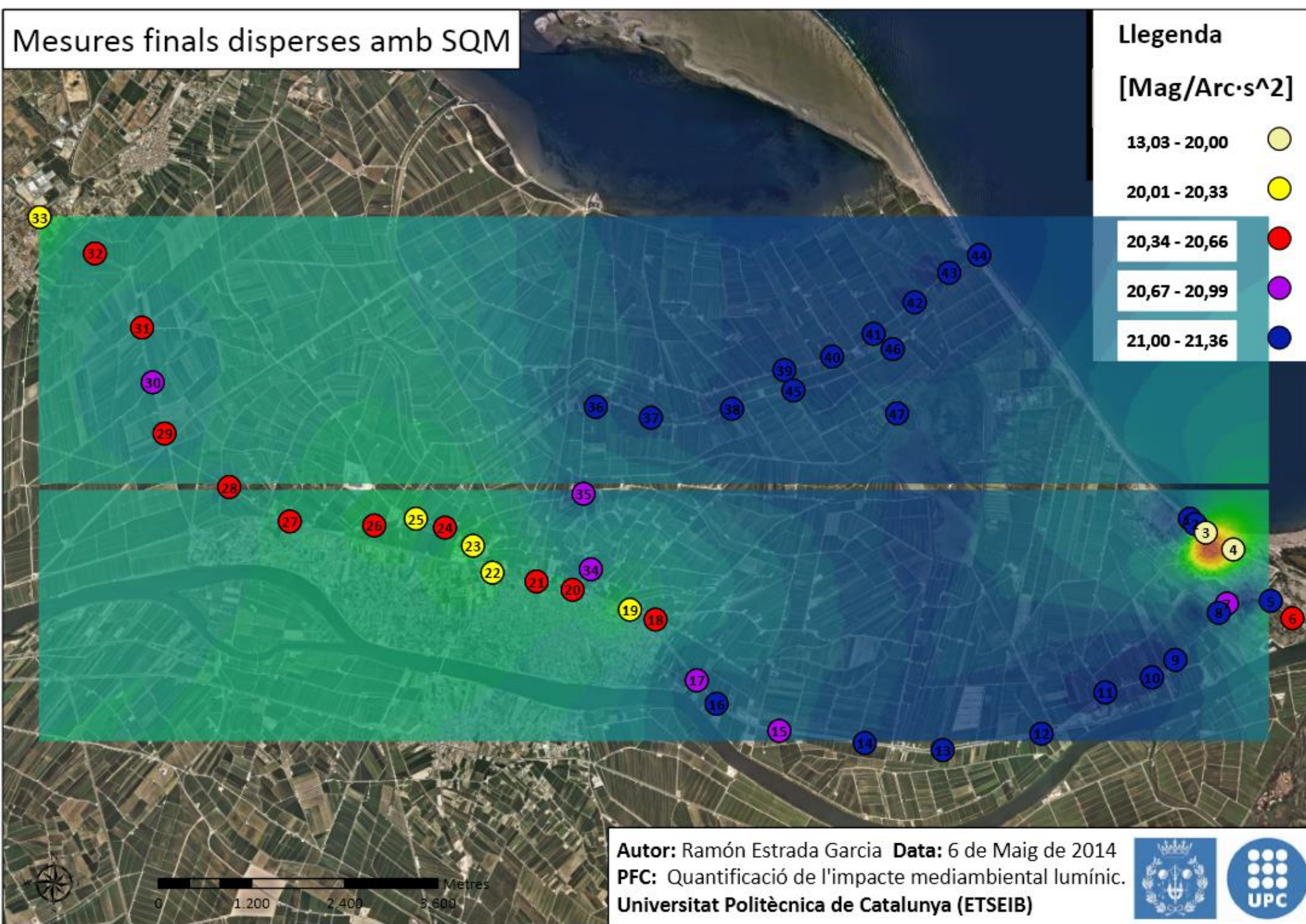
20,34 - 20,66



20,67 - 20,99



21,00 - 21,36



Autor: Ramón Estrada Garcia **Data:** 6 de Maig de 2014
PFC: Quantificació de l'impacte mediambiental lumínic.
Universitat Politècnica de Catalunya (ETSEIB)



Mesures finals respecte les inicials



8.3. Resum de resultats

De la realització de mesures amb SQM del procés de renovació d'instal·lacions s'han obtingut resultats molt positius que es sintetitzen a continuació:

- Les nits en que la capacitat d'observació és bona ha augmentat lleugerament, a més, els valors de mesura màxim de les nits també mostra un augment. En aquest sentit, es pot destacar que el nombre de nits amb valors de mesura majors o igual a $21,3 \text{ Mag/Arc}\cdot\text{s}^2$ s'ha incrementat d'una al mes a 3.
- Les mesures amb SQM pel territori mostren un descens de la brillantor de la esfera celeste prou gran. Les mesures al llarg del territori han augmentat un $0,36 \text{ Mag/Arc}\cdot\text{s}^2$ de mitja amb un increment relatiu mig de l'1,48% respecte a l'inici. Cal fer èmfasi en aquelles mesures properes al municipi, ja que són les que més afectades es veuen per el mateix i on s'han tingut augments significatius de les mesures amb SQM.
- En quant a valors de mesura inferiors després de les reformes, s'ha observat un descens elevat en un punt, causada segurament per la reparació de l'enllumenat de la zona ja que es trobava en mal estat.

9. Anàlisi de l'impacte ambiental del projecte

9.1. Introducció

L'impacte ambiental de les instal·lacions d'enllumenat i la seva quantificació ha sigut l'òptica adoptada durant tot el projecte i per tant cal diferenciar entre l'impacte mediambiental de la renovació d'instal·lacions objecte d'estudi i l'impacte mediambiental del projecte.

Des d'una perspectiva simplificadora i generalista, es podria considerar que l'impacte mediambiental d'unes instal·lacions és el producte de tres factors que s'esmenten a continuació:

- **Intensitat:** La quantitat d'impacte aplicat sobre el medi, seria equivalent a la potència elèctrica.
- **Durada en el temps:** És el lapse temporal amb impacte sobre el territori.
- **Localització:** Aquest és un dels factors més importants, ja que en funció de la capacitat de l'entorn per absorbir l'impacte a més de que l'afectació acumulativa i sinèrgica de factors és determinant a l'hora de mesurar l'impacte.

La ubicació de les instal·lacions d'enllumenat de Deltebre, en un entorn d'alta qualitat mediambiental fa que sigui indispensable el control de la renovació d'instal·lacions per garantir el funcionament de l'ecosistema que l'envolta. A més, donat que les instal·lacions d'enllumenat sovint desaprofiten una gran quantitat de llum i que estan en funcionament durant tota la nit, quan moltes aus estan actives, hi ha riscos de que tinguin un impacte significatiu sobre el medi ambient. A aquest efecte s'ha realitzat el càlcul dels indicadors mediambientals més representatius així com la monitorització del procés de renovació d'instal·lacions en apartats anteriors.

A continuació, per tal de determinar les afectacions mediambientals del projecte, s'ha realitzat un seguit de càlculs per demostrar les seves repercussions.

9.2. Potencial quantificador de l'impacte mediambiental del projecte

9.2.1. Selecció de polítiques de gestió de les instal·lacions

Gràcies als progressos realitzats durant aquest projecte en la quantificació de l'impacte mediambiental lumínic de les instal·lacions, s'ha pogut determinar un dels indicadors més rellevants del mateix. Així doncs, el projecte permet quantificar l'Emissió de Flux Superior d'un conjunt d'instal·lacions de forma precisa i els indicadors que se'n deriven del mateix.

A aquest efecte, si un cop realitzada la renovació d'instal·lacions es desitgés comparar l'ús de diverses tecnologies d'enllumenat es podria realitzar també una selecció d'entre diverses alternatives de disseny. Així, si es plantejés la opció d'il·luminar amb làmpades de tecnologies diverses, s'obtidria el resultat següent:

Tecnologia làmpada	GRE
Vapor de Sodi Alta Pressió	1.211,01
Vapor de Sodi Baixa Pressió	811,38
Halogenurs Metàl·lics Fred	2.325,14
Halogenurs Metàl·lics Càlid	1.901,29
LED Fred	3.524,04
LED Càlid	3.172,85

Taula 9.1. Taula comparativa del Grau Relatiu d'Emissió de les instal·lacions després de les reformes segons diverses tecnologies de làmpada.

Un resultat precís donada l'adaptació del càlcul de l'EFS a les diverses tipologies de carrer. Aquests resultats permetrien, junt amb els demés indicadors mediambientals ser la base per l'anàlisi i selecció d'alternatives.

9.2.2. **Alternatives en actuacions puntuals sobre les instal·lacions**

Donat que aquest projecte determina un nou mètode de càlcul per a un indicador mediambiental com és l'EFS, s'ha realitzat un anàlisi de l'afectació dels diversos paràmetres influents en l'afectació mediambiental de les instal·lacions d'enllumenat públic. Aquest anàlisi s'ha basat en fixar diversos els paràmetre d'un carrer i variar-ne dos per observar la variació de l'EFS a través d'una eina que dona els resultats segons els paràmetres introduïts.

Donat que l'indicador existent per a l'EFS, anomenat model aproximat ja té en compte els fenòmens procedents de la tipologia de lluminària, aquest anàlisi s'ha centrat en els altres factors. Per altra banda, cal tenir en compte que per obtenir un valor vàlid de l'EFS, els paràmetres introduït al model han de ser dels habituals en les instal·lacions d'enllumenat ja que el model només dona resultats vàlids dins dels rang de dades analitzat.

- **Variació de l'alçada de les lluminàries.** Per determinar l'afectació sobre l'EFS de la variació de l'alçada de les lluminàries, s'ha dissenyat un cas tipus i s'ha variat l'alçada determinant que aquesta fa que la reflexió sobre el carrer augmenti i s'escapi més flux lumínic cap a l'esfera celeste.

Alçada Edificis [m]	Amplada [m]	Ocupació	Reflectivitat	h. llum [m]	EFS	
					Tipus A	Tipus F
4	10	0	0,33	3	45,26%	10,72%
				5	33,17%	7,85%
				7	27,03%	6,40%

Taula 9.2. Resultat de l'aplicació de diversos valors al model estadístic.

- **Variació en l'amplada dels carrers.** Com ja s'ha comentat a l'apartat 6.5, aquest factor determina la superfície de reflexió de la llum, i per tant, té una gran influència sobre l'EFS.

Alçada Edificis [m]	h. Ilum [m]	Tipus Iluminària	Reflectivitat	Amplada [m]	EFS	
					Ocupació50	Ocupació100
6	7	E	0,33	15	9,69%	13,42%
				25	12,47%	17,14%
				35	14,71%	20,13%

Taula 9.3. Resultat de l'aplicació de diversos valors al model estadístic.

- **Variació en l'alçada dels edificis.** A continuació es pot veure l'efecte de l'alçada dels edificis, cal tenir en compte que aquest efecte no és extrapolable a les ciutats amb una alçada d'edificis diferents a la d'aquest estudi. Així doncs, en general es pot apreciar que l'EFS disminueix al augmentar l'alçada dels edificis així com augmenta amb la ocupació (degut a que també augmenta la superfície de reflexió).

Amplada [m]	h. Ilum [m]	Tipus Iluminària	Reflectivitat	Alçada Edificis [m]	EFS	
					Ocupació 50	Ocupació 100
20	5	D	0,50	4	17,81%	25,05%
				7	15,16%	17,79%
				10	13,69%	14,31%

Taula 9.4. Resultat de l'aplicació de diversos valors al model estadístic.

- **Variació en la ocupació.** Aquesta fa que augmenti la superfície sobre la que es reflexa la llum i per tant, a major ocupació, més flux enviat cap al cel. La variació produïda per la ocupació és menor al utilitzar lluminàries poc contaminants.

Amplada [m]	h. Ilum [m]	Alçada Edificis [m]	Reflectivitat	Ocupació	EFS	
					Tipus A	Tipus F
15	5	8	0,50	0	32,76%	8,38%
				50	39,17%	10,02%
				100	44,20%	11,31%

Taula 9.5. Resultat de l'aplicació de diversos valors al model estadístic.

En base a l'estudi realitzat en aquest apartat, es determina la utilitat del model de càlcul de l'EFS per a Estudis d'Impacte ambiental, auditories i d'altres estudis. Així, aquesta és una eina potent per a realitzar la selecció d'alternatives en futurs estudis de projecció d'instal·lacions d'enllumenat.

9.3. Resultats de l'estudi d'impacte ambiental del projecte

En base a la informació aportada en els apartats anteriors, es determina per tant, el potencial d'anàlisi de l'impacte ambiental de les instal·lacions d'enllumenat artificial d'aquest projecte. La aportació més significativa per a la quantificació de l'impacte ambiental de les mateixes es basa en la incorporació de factors diversos sobre l'EFS com element quantificador.

A més, la fórmula obtinguda s'ha codificat creant una eina de càlcul ràpid a través de softwares de càlcul comuns. Aquesta pot aportar un gran valor per a futurs anàlisis d'impacte ambiental d'instal·lacions d'enllumenat.

Aquest projecte resulta en un impacte ambiental positiu de cara a la selecció d'alternatives en instal·lacions d'enllumenat, la realització d'auditories de les mateixes així com en tot lo referent al disseny i renovació de les mateixes. Amb els resultats d'aquest projecte, s'augmenta la precisió amb la que es quantifica el focus contaminant (l'enllumenat) permetent realitzar càlculs ràpids que determinin l'impacte mediambiental lumínic de les mateixes.

10. Pressupost

El pressupost del projecte inclou tot lo referent a les hores d'enginyeria necessàries per tal de desenvolupar el projecte, tenint en compte que:

- Els elements per a fer mesures estaven disponibles per part del Grup d'Estudis Luminotècnics de la UPC.
- S'ha comptabilitzat les hores requerides per adquirir els coneixements necessaris per aplicar cadascuna de les eines aplicades al projecte a excepció de:
 - Processat de dades georeferenciades (SIG) ja que l'alumne que presenta el projecte està cursant una formació en aquesta àrea.
 - Coneixements bàsics d'enllumenat ja que a l'inici del projecte ja es portava diversos mesos exercint com a tècnic d'aquesta àrea.
- S'ha comptat amb el suport del director del projecte executant tasques de revisió i control una mitja de quatre hores setmanals. El temps de desenvolupament del projecte per part de l'alumne ha sigut d'un any amb una dedicació de mitja jornada. Per a tots els temps, s'ha considerat dos mesos no efectius per tancament de la universitat a l'agost i en període nadalenc.

Tenint en compte això i en base a la planificació realitzada, s'han desenvolupat les tasques següents:

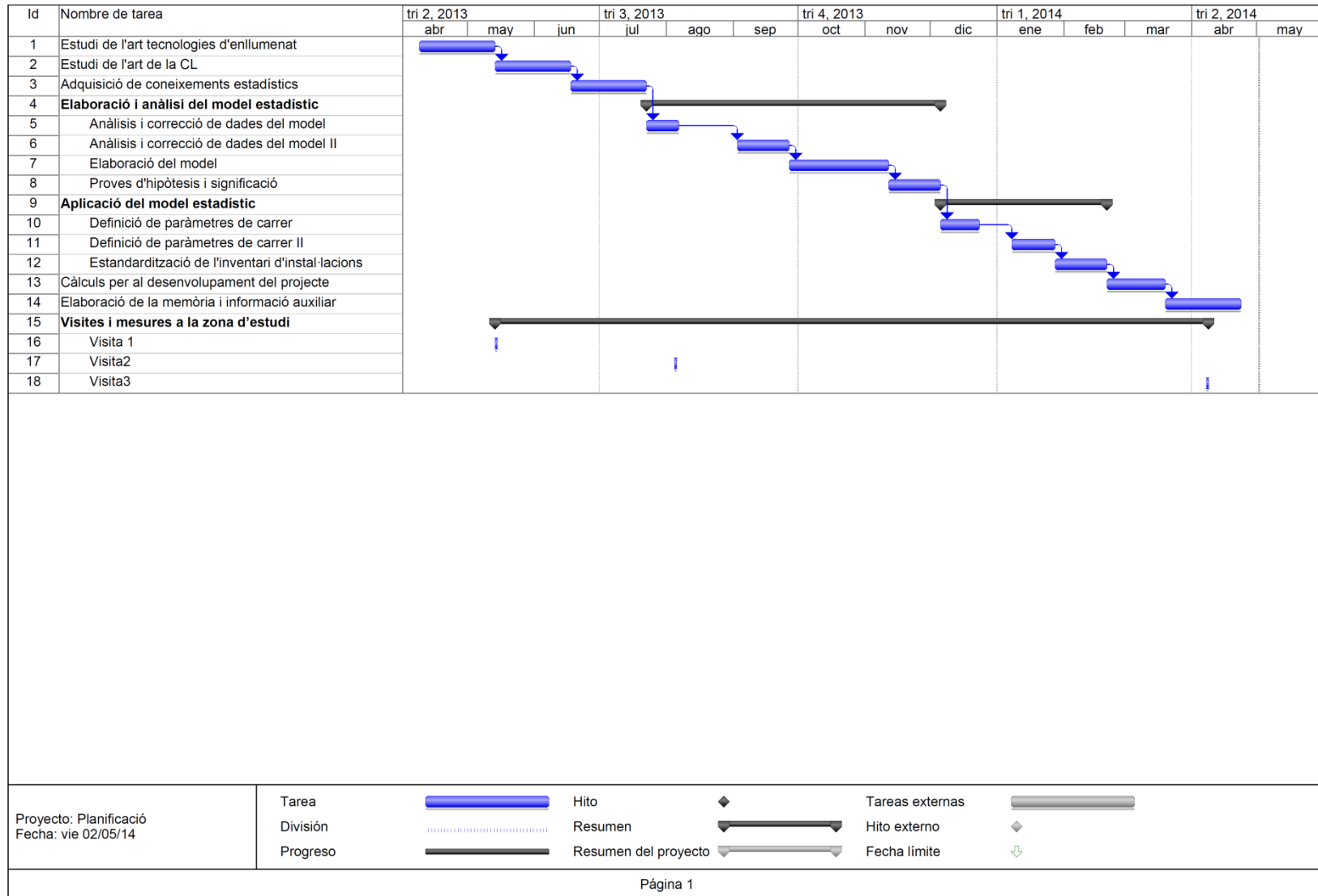
- **Estudi de l'estat de l'art en tecnologies d'enllumenat.** Donat que el projecte està centrat en l'enllumenat municipal, cal una formació en il·luminació prou extensa. A l'inici del projecte, l'alumne que el realitza ja portava uns mesos d'experiència, fet que ha fet que aquest procés fos prou àgil.
- **Estudi de l'art en Contaminació Lumínica.** Per tal d'aprofundir en l'EFS i els mètodes de mesura i quantificació de la contaminació lumínica així com les seves afectacions, es va recopilar i analitzar informació en referència a la mateixa.
- **Adquisició de coneixements estadístics.** Donat que ja es comptava amb diverses assignatures de l'àmbit estadístic, la major part d'aquesta tasca consisteix en aprofundir i recordar els coneixements sobre regressió lineal rebuts així com l'aprenentatge en software estadístic.
- **Elaboració i anàlisi del model estadístic.** Aquesta tasca s'ha subdividit en quatre apartats:
 - Anàlisi i correcció de dades. Aquesta tasca conté tot lo relacionat a estudiar la parametrització i simulacions realitzades a [11] així com la confirmació de les dades repetint les simulacions.
 - Elaboració i aplicació de models. Aquesta tasca representa el gruix tècnic del projecte podent-se desglossar en:
 - Anàlisi de les dades inicials a través d'estadístiques descriptives.
 - Observació de relacions entre variables i fenòmens anòmals.
 - Prova i selecció de transformacions de variables.
 - Obtenció i validació del model estadístic definitiu.

- Proves de significació i hipòtesis. En aquesta tasca es va fer diverses proves per validar les hipòtesis així com per determinar que el model es comportava de forma raonable amb les dades de l'àmbit d'estudi.
- **Aplicació del model estadístic.** Aquesta tasca s'ha dividit en tres subtasques:
 - Definició dels paràmetres de carrer. Aquest va ser un període en el que es van classificar totes les tipologies de carrer del municipi.
 - Estandardització de l'inventari de les instal·lacions. Es va homogeneïtzar l'inventari de les instal·lacions per tal de poder realitzar l'anàlisi de resultats.
 - Realització de càlculs i extracció de resultats. En aquest període es va aplicar el model a l'inventari de les instal·lacions així com analitzar els vectors mediambientals de la renovació de les mateixes.
- **Càlculs per al desenvolupament del projecte.** En aquest apartat s'inclou tot lo relacionat amb el post-procés de dades per a obtenir informació útil. Així, dins d'aquesta etapa es pot esmentar els procediments relacionats amb la monitorització de la renovació d'instal·lacions, georeferenciació de les mesures de camp, etc.
- **Elaboració de la memòria i informació auxiliar.** En aquest apartat s'inclou tot el procés de redacció de la memòria i annexos així com l'elaboració de mapes i gràfics propis.
- **Visites i mesures a la zona d'estudi.** Donada l'aplicació directe del projecte al municipi de Deltebre, s'han realitzat mesures i inspeccions de camp tres dies concrets, dos de planificats i un a causa d'un imprevist.

A aquestes tasques, se'ls ha assignat una durada que es pot observar a continuació:

Tasca		Dies laborables [dies]	
Estudi de l'art tecnologies d'enllumenat		20	
Estudi de l'art de la CL		20	
Adquisició de coneixements estadístics		20	
Elaboració i anàlisi del model estadístic	Anàlisi i correcció de dades del model	20	60
	Elaboració del model	20	
	Proves d'hipòtesis i significació	20	
Aplicació del model estadístic	Definició dels paràmetres de carrer	9	35
	Estandardització de l'inventari de les instal·lacions	11	
	Realització de càlculs i extracció de resultats	15	
Càlculs per al desenvolupament del projecte		15	
Elaboració de la memòria i informació auxiliar		20	
Visites i mesures a la zona d'estudi		3	
Total		200	

I a continuació es mostra el diagrama de Gantt del projecte:



Tenint en compte les tasques de suport del director del projecte, els recursos humans del projecte es poden valorar com segueix:

Hores d'enginyeria	Preu [€/hora]	Hores [h]	Total [€]
Enginyer Junior	15	800	12.000
Enginyer Sènior	40	176	7.040
Subtotal			19.040

Taula 10.1. Despeses en recursos humans realitzades durant el projecte.

A més, tenint en compte la realització de mesures amb un cost directe aplicable a causa del desplaçament i dietes provocades:

Dietes	Preu [€]	Quantitat	Total [€]
Trajectes (anada i tornada) a la zona d'estudi	80	3	240
Dietes per mobilitat	20	3	60
Subtotal			300

Taula 10.2. Conjunt de despeses causades pel desplaçament a l'àmbit d'estudi.

Per últim, cal tenir en compte la amortització dels sensors i materials emprats. Aquesta s'ha calculat en base al seu preu i tenint en compte que de mitja es realitzen dos projectes per part del Grup d'Estudis Luminotècnics UPC.

Materials	Preu [€]	Vida útil [anys]	Amortització [€/projecte]
Sensor SQM	160	4	20
Sensor SQM registrador	320	4	40
Ordinador	600	4	75
Subtotal			135

Per últim, cal aplicar diversos conceptes per tal d'obtenir el pressupost total del projecte, aquest s'han determinat en base al RD 1098/2001 del 12 d'Octubre i són:

- Despeses generals. És una partida en base al cost brut del projecte que inclou imprevistos així com materials fungibles. En definitiva, és una reserva per adquirir tots aquells elements necessaris per a l'execució del projecte.
- Benefici Industrial. És el benefici esperat per l'entitat contractant.

Un cop aclarits tots aquests conceptes, només cal fer unes quantes operacions aritmètiques per obtenir el preu del projecte.

Pressupost del projecte	Cost [€]
Cost del projecte d'enginyeria	19.040,0
Dietes i mobilitat	300,0
Amortitzacions	135,0
Total parcial	19.475,0
Despeses generals (13%)	2.531,8
Benefici Industrial (6%)	1.168,5
Total parcial	23.175,3
IVA (21%)	4.866,8
Pressupost total de projecte	28.042,1

Taula 10.3. Resum dels costos del projecte.

11. Conclusions

En el present projecte, s'ha realitzat un estudi de l'estat de l'art en contaminació lumínica citant els diversos referents en el càlcul d'indicadors per a l'estudi de l'impacte ambiental de les instal·lacions d'enllumenat.

Per altra banda, també s'ha realitzat una breu introducció a les eines estadístiques aplicades així com realitzat el desenvolupament d'un indicador de l'impacte mediambiental de les instal·lacions d'enllumenat en municipis amb construccions de baixa alçada. El model obtingut, mostra uns resultats molt bons amb un coeficient de correlació ajustat de més del 97 %. A més, les prediccions realitzades amb el mateix en el procés de validació creuada presenten un error absolut inferior al 3 % en tots els casos. A continuació s'aporten les millores ambientals que suposa l'EFS del model:

- Consideració de factors rellevants del carrer com són l'ocupació o amplada així com la reflectivitat de les façanes adjacents.
- Adaptació més precisa a les condicions de cada cas ja que la funció de càlcul no està fitada inferiorment.
- Possibilitat de millora i adaptació a casos concrets a través de l'ampliació dels casos analitzats per el model.

Per contra, presenta alguns inconvenients:

- El procés d'obtenció del model així com de realització de simulacions és molt llarg i costós.
- Hi ha casos pels quals no es pot aplicar el model per presentar singularitats o casos que no estan en la base de dades inicials.

També és rellevant esmentar que en comparació amb el càlcul aproximat de l'EFS s'observa una divergència inferior al 10 %, un fet que mostra que el model de l'EFS obtingut segueix la tendència marcada pel model aproximat. És rellevant esmentar que dins d'aquest marge, el model obtingut és més precís per tenir en compte més factors significatius. Amb el model, també s'ha desenvolupat una eina de càlcul ràpid que pretén apropar el model amb les seves particularitats i modelització al funcionament diari de projecció i disseny d'instal·lacions d'enllumenat.

S'ha realitzat un breu anàlisi de les característiques de les instal·lacions d'enllumenat abans i després de la realització de reformes en les mateixes. D'aquest estudi s'ha determinat la disminució de l'impacte mediambiental lumínic a través de diversos indicadors. Així doncs, tant l'energia consumida per les instal·lacions com l'energia malbaratada en forma de contaminació s'han disminuït considerablement fins a xifres de més del 50 %. També es detecta una disminució del Flux Hemisfèric Superior instal·lat mig de les instal·lacions de gairebé el 70 % així com la seva repercussió en el Grau Relatiu d'Emissió de les instal·lacions que ha disminuït més del 40%.

Per últim, s'ha realitzat la monitorització d'aquests canvis produïts en les instal·lacions obtenint un augment de la qualitat del cel a l'àmbit d'estudi quantificat a través de l'augment de la

freqüència de mesures superiors a $21,3 \text{ Mag/Arc}\cdot\text{s}^2$. També s'ha determinat un augment de les mesures disperses pel territori de $0,36 \text{ Mag/Arc}\cdot\text{s}^2$ respecte a l'inici fet que suposa una disminució de la brillantor del cel en més del 25 %.

De tot el projecte es desprèn la necessitat de realitzar les intervencions sobre l'enllumenat en forma d'una optimització i racionalització del consum. En aquest aspecte, és molt important aplicar el concepte grec i llatí "Meden Agan" o "Ne quid nimis" que volen dir res en excés. Una filosofia que aplicada tant a l'àmbit humà com al tècnic, repercuteix en una solució de compromís entre la desmesura i l'agonia per falta de recursos.

12. Agraïments

El redactor d'aquest projecte vol agrair la informació sobre la renovació de les instal·lacions facilitada per les diverses parts implicades en el procés.

Cal fer una menció especial per al director del projecte, Manuel García Gil per la seva confiança i ajuda des de l'inici de la introducció de l'alumne al món de l'enllumenat així com per la seva disponibilitat continua durant la realització d'aquest projecte.

També és important agrair la col·laboració de Lesly Maria Acosta Argueta en tot el que és matèria d'estadística des de la teoria a la pràctica. Per altra banda, també s'agraeix la introducció al software estadístic i resolució de dubtes de Josep-Anton Sànchez Espigares.

La realització d'aquest PFC no hauria sigut possible sense el suport, caliu i comprensió de familiars i amics de la persona que l'ha realitzat.

13. Bibliografia

13.1. Referències bibliogràfiques

Exemples de llibres, articles, catàlegs, material informàtic i material obtingut a la xarxa:

- [1] *REAL DECRETO 1890/2008*, del 14 de Novembre de 2008.
- [2] Héctor Antonio Solano Lamphar (2010). *Medición de la contaminación lumínica en espacios naturales. Propuesta de un modelo predictivo*. Departament d'Estudis Luminotècnics (EL), Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- [3] Generalitat de Catalunya, *Mapa de protecció envers la contaminació lumínica*. [<http://sima.gencat.cat/Visors/PCL/Inici.html>]. Consultat el 24 d'Abril de 2014.
- [4] Instituto Astrofísico de Canarias. [<http://www.iac.es/>] Consultat l'11 de Març de 2014.
- [5] SHIRKEY, R. C. (2006) *A Model for Nighttime Urban Illumination Nuevo México, EUA*, U.S. Army. Research Laboratory, Computational and Information Sciences Directorate, Battlefield Environment Division.
- [6] SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & SOLANO LAMP HAR, H. A. (2009) "*Metodología RAMAL-UPC para análisis cuantitativo de la contaminación lumínica*". IN CEI (Ed.) XXXV Simposio nacional de iluminación. Comité español de iluminación. Pontevedra, España.
- [7] Carlos SIERRA GARRIGA. *APLICACIONES LUMINOTÉCNICAS DE CÁMARAS DIGITALES*, UPC – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- [8] Miguel Nievas Rosillo (2012). *Fotometría absoluta y brillo de fondo de cielo con AstMon-UCM*. Amb Jaime Zamorano - Dpto. Astrofísica y CC. De la Atmósfera José Luis Contreras - Dpto. Física Atómica, Molecular y Nuclear.
- [9] [<http://ca.wikipedia.org/wiki/Homoscedasticitat>] Consultat el 21 d'Abril de 2014.
- [10] [<http://joan-astor.blogspot.com.es/p/delta-de-lebre-116.html>] Consultat el 21 d'Abril de 2014.
- [11] Manuel García Gil (2001), *Diagnòstic de la contaminació lumínica i experiència pilot d'actuacions de millora a El Masnou*. Projecte Final de Carrera d'Enginyeria Industrial.

- [12] Generalitat de Catalunya i el Col·legi d'Enginyers Industrials de Catalunya (2013), *Estudi de les Millors Tecnologies Disponibles en enllumenat*.
- [13] Consultoria Lumínica (2011). *Auditoría energética y medioambiental de Ecoalumbrado público de Deltebre*.
- [14] Butlletí nº12 de Gener de 2010 d'ANFALUM. *Cómo seleccionar y comprar luminarias LED's para aplicaciones de Alumbrado Exterior*. ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE FABRICANTES DE ILUMINACIÓN.
- [15] Dr. Arquitecte Buenaventura Bassegoda Musté (1982). *Cálculos y Ensayos, Estudio de los Proyectos II*, EDITIONS EYROLLES y EDITIONS TECHNIQUES, París.
- [16] Pierantonio Cinzano, Fabio Falchi, Christopher D.Elvridge. *"Stato del cielo notturno e inquinamento luminoso in Italia"*.

13.2. Bibliografia complementària

Héctor Antonio Solano Lamphar (2010). *Medición de la contaminación lumínica en espacios naturales. Propuesta de un modelo predictivo*. Departament d'Estudis Luminotècnics (EL), Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

Manuel García Gil, Ramón San Martín Páramo, Héctor Solano Lamphar, Pau Francia Payàs; (2012). *Contaminación Lumínica: Una visión desde el foco contaminante: El alumbrado artificial*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.