



PLEC DE PRESCRIPCIONS TÈCNIQUES PER A LA CONTRACTACIÓ DEL SERVEI D' AVALUACIÓ I PREDICCIÓ DE LA CONTAMINACIÓ LUMÍNICA A CATALUNYA MITJANÇANT MODELITZACIÓ MATEMÀTICA

EXPEDIENT: AG-2024-96

1. CONTEXT

La contaminació lumínica pertorba les condicions naturals del medi nocturn, pot afectar els ecosistemes i la biodiversitat, i pot tenir conseqüències perjudicials per al medi ambient en general. A més, dificulta la visió del cel nocturn, que forma part del paisatge i medi natural, i és un bé que cal preservar.

El Parlament de Catalunya va aprovar el 31 de maig de 2001, la Llei 6/2001, de 31 de maig, d'ordenació ambiental de l'enllumenament per a la protecció del medi nocturn.

El 27 d'agost de 2015 es va publicar al DOGC núm. 6944 l'aprovació del Decret 190/2015, de 25 d'agost, de desplegament de la Llei 6/2001, de 31 de maig.

El mateix Decret 190/2015 defineix la contaminació lumínica (CL) com l'augment dels fons de brillantor del cel nocturn natural, a causa de la dispersió i reflexió de llum procedent de la il·luminació artificial, i en el seu article 17.2 apartat b) estableix que el departament competent en matèria de medi ambient ha d'avaluar la qualitat del cel de nit a Catalunya.

El Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural (DACC), com òrgan competent en matèria de medi ambient, vetlla pel compliment de la Llei 6/2001 i per la protecció del medi nocturn a través de la Direcció General de Qualitat Ambiental i Canvi Climàtic (DGQACC), la qual té la funció d'avaluar i prevenir la contaminació lumínica arreu del país.

Un mètode objectiu de mesurament de la contaminació lumínica que permeti l'avaluació del seu impacte és el mesurament de la *brillantor del fons de cel*, que permet conèixer, a partir dels valors obtinguts, com de lluny estem dels valors que serien propis d'un cel amb foscors natural. És a dir, indica el nivell de qualitat ambiental del medi nocturn.

El mesurament de la brillantor del fons de cel dona dades importants per seguir l'evolució de l'impacte sobre el medi nocturn. Aquest indicador té el reconeixement de la comunitat científica internacional, però comporta la limitació d'obtenir dades només allà on es fan mesuraments i de no poder disposar d'una visió superficial de l'impacte de la contaminació lumínica.

En aquest sentit, l'any 2012 es van iniciar les campanyes de mesuraments anuals d'avaluació de qualitat del cel nocturn a indrets singulars de Catalunya, com els espais d'un especial interès, xarxa natura 2000 i alguns espais naturals de protecció especial.

De forma afegida, en els últims 4 anys s'han realitzat anàlisis exploratoris del funcionament de models matemàtics per realitzar prediccions del nivell de qualitat de cel nocturn a diferents indrets de Catalunya. Les prediccions matemàtiques han estat recolzades pels mesuraments realitzats en campanyes anteriors.

Per tal de fer el seguiment de l'estat de la qualitat del cel nocturn a Catalunya i poder millorar el seu abast territorial i la seva eficiència, el Servei de Prevenció i Control de la Contaminació Acústica i Lumínica (SPCCAL) considera necessari continuar amb l'avaluació utilitzant eines de predicció matemàtiques.

En aquest sentit, l'actual plec descriu les necessitats per obtenir resultats de l'afectació ambiental de la contaminació lumínica, amb la utilització de models matemàtics en tot el territori català.



2. OBJECTE DEL CONTRACTE

L'objecte d'aquest contracte és la realització del servei d'avaluació i predicció de la contaminació lumínica a Catalunya mitjançant modelització matemàtica, que consta de diferents necessitats a cobrir:

- Comparació de les dades de partida del model matemàtic (via satèl·lit i/o per inventari de les instal·lacions) i informe tècnic de la seva fiabilitat en ser utilitzades.
- Simulació de casos tipus d'estudi: en aquests casos s'avaluarà l'evolució de la brillantor del cel a diferents distàncies en funció de les característiques i magnitud d'unes instal·lacions d'enllumenat exterior predefinides.
- Avaluació de la brillantor de cel nocturn a tota Catalunya en condicions de nit astronòmica (nit serena i sense lluna) mitjançant la creació de diferents mapes de la situació actual i la predicció d'escenaris futurs.
- Comparació de les dades de les avaluacions de la situació actual amb les dades de mesures mitjançant sensors per la DQGACC.

3. FUNCIONS DE L'EMPRESA CONTRACTISTA

L'empresa contractista realitzarà les següents actuacions dividides en 3 fases:

Fase 1: Any 2024: Avaluació de la situació actual al zenit i simulació de casos tipus:

Aquesta fase té com a objectiu sistematitzar la metodologia del càlcul computacional (d'acord amb als requisits del model matemàtic descrits en el punt 5.1), avaluar la fiabilitat de les fonts d'informació en les dades finals obtingudes i obtenir dos mapes de la situació actual de la brillantor de cel nocturn a Catalunya.

De forma afegida també té com a objectiu l'obtenció de 30 casos tipus simplificats sobre l'efecte contaminant de l'enllumenat en diferents supòsits de càlcul predefinits.

Les tasques a realitzar seran les següents:

1. Obtenció de dades de partida sobre les instal·lacions d'enllumenat, necessàries pel model matemàtic:
 - Imatges mitjançant satèl·lit Suomi NPP (sensor VIIRS) o equivalent. Es consideraran vàlides aquelles que hagin estat captades al llarg de 2022 o posteriors.
 - Imatges mitjançant càmera fotogràfica realitzada des de la Estació Espacial Internacional (en anglès ISS) o equivalent. Es consideraran vàlides aquelles que hagin estat captades al llarg de 2021 o posteriors. O d'altres per mutu acord.
 - Anàlisi i preparació de les dades d'inventari d'instal·lacions facilitades per la DQGACC o equivalent a criteri de la DQGACC.
2. Tractament de les dades de mesures reals de brillantor de cel nocturn, facilitades per la DQGACC.
3. Totes les tasques auxiliars necessàries de preparació tècnica, informàtica o científica, per poder desenvolupar les simulacions de tot el contracte.
4. Execució de 30 casos tipus simplificats de simulació per a la predicció de la contaminació lumínica. En aquests casos s'avaluarà la contaminació lumínica amb unes condicions fixades per la DQGACC, d'acord amb les variables descrites al punt 5.2.
5. Execució del model matemàtic de la situació actual amb una *Simulació Tipus A* (segons descripció del punt 5.3.a) amb dades de partida extretes mitjançant satèl·lit orbital. En cas que alguna dada no es disposi, es podran utilitzar dades d'inventari o estimacions, sota aprovació de la DQGACC.
6. Execució del model matemàtic de la situació actual amb una *Simulació Tipus A* (segons descripció del punt 5.3.a) amb informació extreta a través de dades de partida mitjançant inventari d'instal·lacions. En cas que alguna dada no es disposi, es podran utilitzar dades de satèl·lit, sota aprovació de la DQGACC.



7. Preparació de totes les dades d'entrada i finals del càlcul per ser descarregades per la DGQACC. Extracció de resultats totals de modelització i extracció per ser visualitzades.
8. Treball tècnic d'avaluació dels resultats aconseguits:
 - Informe amb judici de valor sobre la fiabilitat de les fonts d'entrada utilitzades (inventaris reals i imatge satel·lital) i possibilitats de millora.
 - Comparació de les dades obtingudes en els dos mapes i amb les dades de mesures reals.
9. Elaboració de l'informe final de Fase 1 que inclogui la descripció de les fases de treball, anàlisi de les fonts d'informació, els resultats de les simulacions realitzades, avaluació dels resultats dels mapes per cadascuna de les simulacions i el treball tècnic d'avaluació dels resultats aconseguits.

Fase 2: Any 2025: Predicció de 3 escenaris futurs avaluats al zenit:

L'objectiu és predir la brillantor del cel al zenit a mig i llarg termini. Es plantejaran 3 escenaris tipus de tota Catalunya amb diferents modificacions massives dels sistemes d'enllumenat per tal de determinar l'impacte ambiental de diferents estats en funció de com podria ser l'evolució tecnològica o de les instal·lacions.

Les dades per considerar els supòsits dels escenaris futurs seran facilitats per la DGQACC.

També es desenvoluparà l'eina d'exportació inicial de dades a capes SHP per a la visualització mitjançant eines SIG de les dades obtingudes. L'eina serà executable en sistema Windows. Les especificacions d'aquest mòdul de suport es descriu a l'apartat 5.5.

Les tasques a desenvolupar són:

1. Revisió i consolidació de les dades de la situació actual, si s'escau (obtingudes en la fase anterior).
2. Preparació de les dades de partida dels escenaris futurs (dades facilitades per la DGQACC). Aquestes dades poden tenir en compte (a criteri de la DGQACC):
 - Modificacions de la tipologia de llum utilitzat.
 - Modificacions de tipus de làmpada utilitzada.
 - Variacions en l'enllumenat de titularitat privada.
 - La regulació del flux lluminós.
 - Variació en el factor d'utilització dels sistemes actuals.
 - Increment de la superfície urbana il·luminada per creixement urbanístic o consideració d'altres elements il·luminats.
 - Qualsevol d'aquestes variables a nivell de qualsevol punt del territori català.
3. Execució del model matemàtic amb els 3 escenaris futurs mitjançant una *Simulació Tipus A* (segons descripció del punt 5.3.a) .
4. Estudi de l'optimització en la realització de càlculs per estalviar de temps de càlcul: determinació de la mida de xarxa de càlcul, abast de l'anàlisi de les fonts contaminants, càlcul en azimuth i elevació, etc.
5. Versió inicial de l'eina d'exportació de les dades a visualització pel seu tractament amb eines tipus SIG (segons especificacions descrites a l'apartat 5.5).
6. Preparació de totes les dades d'entrada i finals del càlcul per a ser descarregades per la DGQACC. Extracció de resultats totals de modelització i extracció per ser visualitzades.
7. Elaboració de l'informe final de Fase 2 que inclogui els resultats de les simulacions realitzades, una avaluació i comparativa dels resultats dels escenaris futurs amb la situació actual i entre ells.



Fase 3: Any 2026: Avaluació i predicció complexa:

En aquesta fase és la modelització de la situació actual i de 4 escenaris futurs en direccions azimuthal i elevació a determinar.

També es desenvoluparà l'eina final d'exportació de dades a capes SHP per a la visualització mitjançant eines SIG de les dades obtingudes. L'eina serà instal·lable i executable en sistema Windows 10 o posterior. Les especificacions d'aquest mòdul de suport es descriu a l'apartat 5.5.

Les tasques a desenvolupar són:

1. Preparació de les dades de partida de les instal·lacions d'enllumenat i variables de la modelització d'acord amb les fases anterior i en mutu acord amb la DGQACC.
2. Execució del model matemàtic de la situació actual i 4 altres escenaris amb *Simulació Tipus B* (segons descripció del punt 5.3.b) . De forma alternativa es podran realitzar modelitzacions de d'escenaris parcials o alternatius per mutu acord entre la DGQACC i l'empresa contractista. Aquestes possibles variants s'hauran d'acordar a les reunions periòdiques de seguiment.
3. Versió final de l'eina d'exportació de les dades a visualització pel seu tractament amb eines tipus SIG.
4. Preparació de totes les dades d'entrada i finals del càlcul per a ser descarregades per la DGQACC. Extracció de resultats totals de modelització i extracció per ser visualitzades.
5. Elaboració de l'informe final de Fase 3 que inclogui :
 - Resultats de les simulacions realitzades.
 - Una avaluació i comparativa dels resultats dels escenaris futurs amb la situació actual i entre ells.
 - Proposta metodològica completa que inclogui la implantació d'una avaluació de la contaminació lumínica mitjançant modelització periòdica per a la predicció i a llarg termini a Catalunya. Ha d'incloure les especificacions d'entrada, necessitats finals de modelització pel càlcul matemàtic mitjançant supercomputació i especificacions de dades de sortida.
 - Valoració final sobre la necessitat d'adquirir dades d'entrada per sistemes alternatius més fiables.
 - Avaluació i pronunciament sobre la fiabilitat de les dades obtingudes. Estudi de la incertesa i error admissible.

4. FINALITATS I OBJECTIUS A ASSOLIR

Els objectius a assolir per la contractació són els següents.

- Elaboració de 30 casos d'estudi per a la modelització de instal·lacions d'enllumenat singulars.
- Un total de 10 mapes per a l'avaluació de qualitat de del nocturn de tot el territori de Catalunya. Ha d'incloure les dades numèriques en tot el rang espectral definit i tots els punts de Catalunya, i la extracció gràfica en format per ser visualitzat en format SIG i format JPG.
- Una eina per a la extracció de dades visuals exportables a sistema SIG a partir de les dades de sortida del model matemàtic.
- Informe tècnic de les simulacions executades i resultats obtinguts.

5. REQUERIMENTS TÈCNICS - COMPOSICIÓ DE L'EQUIP

L'empresa contractista disposarà dels suficients mitjans tècnics, materials qualitatius i personals per a desenvolupar les tasques objecte d'aquest contracte.



- Personal tècnic associat al contracte. Ha de disposar com a mínim de:
 - o Un director de projecte amb vinculació fixa a l'empresa licitadora.
 - o Una persona de perfil tècnic amb titulació d'enginyeria o ciències físiques com a mínim de grau universitari.
 - o Una persona per realitzar tasques de perfil administratiu. No requereix de titulació superior mínima.
- L'equip de treball (en concret les persones de perfil de direcció de projecte i de perfil tècnic adscrites al contracte) ha d'acreditar experiència demostrable en treballs relacionats amb la modelització de la brillantor de cel nocturn aplicada en els últims 5 anys i d'acord amb les característiques descrites a l'apartat 5.1.
- La possibilitat de disposar d'una capacitat de càlcul informàtic d'entre 2 i 5 milions d'hores de càlcul anuals al llarg dels anys d'execució del contracte, en funció de la necessitat de cada any.

La prestació regulada en el present plec haurà d'ajustar-se, almenys, als següents requisits tècnics, sens perjudici dels paràmetres a valorar mitjançant els criteris valoratius d'adjudicació establerts.

5.1. Requisits del model matemàtic utilitzat

El model matemàtic utilitzat en qualsevol dels càlculs realitzats en aquesta contractació, ha de poder calcular la radiància corresponent a la brillantor de cel nocturn tenint en compte les fonts d'enllumenat artificials. Les característiques del model sol·licitades són:

- Doble dispersió atmosfèrica (doble scattering), per avaluar impacte en les zones allunyades de més qualitat ambiental.
- Permetre el càlcul de la brillantor del cel nocturn en qualsevol angle d'azimut i elevació de la cúpula celeste.
- Permetre el càlcul de la brillantor de cel en qualsevol franja espectral d'entre 350 – 800 nm.
- Els mapes a calcular en aquesta contractació han d'utilitzar un mínim de 10 franges espectrals per punt, dintre de l'interval d'entre 350-780 nm. El número i amplitud ha de ser determinat per l'empresa licitadora i justificat tècnicament per a aconseguir la màxima precisió dels resultats obtinguts.
- Les dades de partida de les instal·lacions d'enllumenat han de poder introduir-se mitjançant inventari de les instal·lacions d'enllumenat, captura d'imatges per satèl·lit o combinació de les dues.
- Ha de tenir en compte les condicions orogràfiques de Catalunya.
- Ha de poder considerar les condicions atmosfèriques de la xarxa AERONET (profunditat òptica, tipus d'aerosol, humitat relativa, i qualsevol altra necessària). Les condicions utilitzades s'han de justificar per l'empresa contractista i han de ser aprovades per la DQGACC durant la primera fase del contracte.
- Ha de tenir en compte les condicions d'urbanització de l'entorn on estiguin instal·lats els llums: alçada del punt de llum, amplada dels carrers, alçada dels edificis (o equivalents).

5.2 Característiques tècniques dels casos tipus

Els casos tipus a realitzar correspondran a la simulació de la brillantor de cel que provoca una instal·lació d'enllumenat (municipi o instal·lació industrial), segons un model matemàtic de les característiques descrites al punt 5.1. Es vol avaluar la influència d'aquesta instal·lació o nucli urbà de forma aïllada en el seu entorn.

Com a resultat final es vol conèixer la brillantor del cel nocturn en diferents angles azimut i elevació de la cúpula celeste, en un distanciament de 0 a 100 km, mitjançant 50 punts de càlcul separats 2 km cada punt.



Els casos seran facilitats per la DGQACC i en la seva descripció es tindran en compte la variació de les variables següents:

1. Quantitat i/o mida de la instal·lació lumínica instal·lada (facilitant els lúmens totals instal·lats).
2. Característiques de les seves instal·lacions d'enllumenat:
 - a. Tipologia de llums i la seva fotometria.
 - b. Tipologia de làmpades i la seva potència (o flux lluminós)
 - c. Característiques urbanístiques de la zona on estan instal·lades.
 - d. Orografia de la zona d'instal·lació i la circumdant (màxim 100 km), si s'escau.
3. Els resultats de cada cas es sol·licitaran en un màxim de 7 angles de la cúpula celeste.
4. Els resultats en proporcionaran en format electrònic (de tots els resultats espectrals obtinguts) i en format taula i gràfic pels filtres sol·licitats per la DQGACC (B o V de Johnson-Cousin, V o V').

5.3 Tipologies de simulacions

Al llarg del contracte és sol·licitaran les següents tipologies de simulacions:

5.3.a. Simulació Tipus A

La modelització relativa a la Simulació tipus A correspon a una modelització de brillantor de cel nocturn de Catalunya amb les següents característiques:

- Anàlisi de la brillantor del cel al zenit.
- Segons un model matemàtic de les característiques descrites al punt 5.1.
- Ha de realitzar els càlculs que permetin la visualització per a una cel·la de càlcul mínima de 1x1 km a tot el territori de Catalunya (màxim de 32.500 punts de visualització d'informació), i amb resultats que siguin comparables amb tant en valor com en ubicació de les mesures amb:
 - o L'Atlas mundial de contaminació lumínica (<https://www.lightpollutionmap.info/>).
 - o Els resultats de mesura de brillantor de cel nocturn realitzats a la DQGACC (https://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/atmosfera/contaminacio_luminica/avaluacio-qualitat-cel-nocturn/) mitjançant:
 - Càmera CCD model ASTMON.
 - Fotòmetre Sky Quality Meter de la marca Unihedron amb angle de mesura tipus L.
- Els mapes a calcular en aquesta contractació han d'utilitzar un mínim de 10 franges espectral per punt, dintre de l'interval d'entre 350-780 nm. El número ha de ser determinat per l'empresa licitadora i justificat tècnicament per aconseguir la màxima precisió dels resultats obtinguts.
- Les dades resultants seran.
 - o Totes les dades de sortida en el format output de càlcul.
 - o La creació de la visualització dels següents mapes per a cadascuna de les simulacions: V(λ), V'(λ), V Johnson-Cousins i B Johnson-Cousins. De tipologia format i llegenda a definir per la DGQACC.
 - o Es facilitarà en format importable a Sistema d'Informació Georeferenciada (tipus SHP o equivalent) i imatges tipus format JPG de resolució mínima 3840x2160 o equivalent.

5.3.b. Simulació Tipus B

La modelització relativa a la Simulació tipus A correspon a una modelització de brillantor de cel nocturn de Catalunya amb les següents característiques:

- Anàlisi de la brillantor del cel a un angle elevació de 45° o 30° (a determinar) i a un angle azimuth corresponent a la direcció estimada de màxima contaminació lumínica.



- Segons un model matemàtic de les característiques descrites al punt 5.1.
- Ha de realitzar els càlculs que permetin la visualització per a una cel·la de càlcul mínima de 1x1 km a tot el territori de Catalunya (màxim de 32.500 punts de visualització d'informació), i amb resultats que siguin comparables tant en valor com en ubicació de les mesures amb:
 - o L'Atlas mundial de contaminació lumínica(<https://www.lightpollutionmap.info/>).
 - o Els resultats de mesura de brillantor de cel nocturn realitzats a la DQGACC (https://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/atmosfera/contaminacio_luminica/avaluacio-qualitat-cel-nocturn/) mitjançant:
 - Càmera CCD model ASTMON.
 - Fotòmetre Sky Quality Meter de la marca Unihedron amb angle de mesura tipus L.
- Els mapes a calcular en aquesta contractació han d'utilitzar un mínim de 10 franges espectral per punt, dintre de l'interval d'entre 350-780 nm. El número ha de ser determinat per l'empresa licitadora i justificat tècnicament per aconseguir la màxima precisió dels resultats obtinguts.
- Les dades resultants seran.
 - o Totes les dades de sortida en el format output de càlcul.
 - o La creació de la visualització dels següents mapes per cadascuna de les simulacions: V(λ), V'(λ) , V Johnson –Cousins i B Johnson –Cousins . De tipologia format i llegenda a definir.
 - o Es facilitarà en format importable a Sistema d'Informació Georeferenciada (tipus SHP o equivalent) i imatges tipus format JPG de resolució mínima 3840x2160 o equivalent.

5.4 Característiques de les dades d'inventari utilitzats.

La DQGACC facilitarà dades d'inventari de les instal·lacions d'enllumenat, per ser introduïdes al model matemàtic. Aquestes dades constaran, per a cada municipi de Catalunya:

- Total de potència de la instal·lació (en W i/o lúmens).
- Percentatge i tipologia de llums utilitzats (amb fotometria i/o FHSisnt).
- Percentatge i tipologia de làmpades utilitzades (en número o % segons la seva potència).
- Existència de sistema de regulació (si es coneix) i els nivells de regulació.
- Estimació de les instal·lacions d'enllumenat privat (si es coneix).

5.5 Especificacions genèriques de l'eina d'extracció de dades.

La sortida de dades de la modelització matemàtica mitjançant eines de computació és de tractament delicat i sovint complicat. Per tal de facilitar el tractament, es demana l'elaboració d'una eina que faciliti el tractament de les dades de sortida dels mapes descrits a l'apartat 5.3.

Les especificacions d'entrada:

- Poder tractar la informació de sortida dels models matemàtics, en totes les ubicacions (un mínim de 32.000 punts de visualització d'informació) i totes les franges espectrals.
- Poder definir els filtres de visualització en funció dels més habituals utilitzats. Per exemple: V(λ), V'(λ) , V Johnson–Cousins i B Johnson–Cousins.

Les especificacions de sortida:

- Poder definir el format de l'arxiu de sortida, com a mínim entre aquests: Sistema d'Informació Georeferenciada (tipus SHP o equivalent) i imatges tipus format JPG de resolució mínima 3840x2160 o equivalent.
- Poder definir la llegenda de sortida (tant en número de camps, com en format)



El programa ha de ser estable i poder ser instal·lat en sistema operatiu Windows 10 o superior.

6. SEGUIMENT DEL CONTRACTE

El seguiment del contracte es realitzarà mitjançant:

1. Reunions de seguiment: al llarg de cada any d'execució del contracte es realitzarà un mínim d'una reunió cada dos mesos de seguiment de la contractació. De forma prèvia, l'empresa contractista enviarà un informe a la DGQACC descrivint: estat de la contractació, temps de computació utilitzat i disponible segons la memòria de la empresa contractista (de cada fase) i resultats obtinguts.
2. Informe de control: de forma afegida als informes especificats a l'apartat 3, l'empresa contractista facilitarà un informe de control l'1 de juny de cadascuna de les fases anuals de contracte, on informará de l'estat de la contractació i es facilitaran les dades i mostraran els resultats preliminars obtinguts.
3. Informe final de cada fase: l'empresa contractista enviarà a la DGQACC un informe final de cada fase el dia 20 de novembre de cada any en curs. Aquests informes són els descrits a l'apartat 3 com a "informe final de fase".

La DGQACC en un termini de 10 dies des de la recepció dels informes dels punts 2 i 3, avaluarà la documentació presentada i notificarà via correu electrònic la seva validesa o requerirà esmena, si s'escau.

7. PROPIETAT DE LES DADES FACILITADES I RESULTANTS

La propietat de les dades rebudes, tractades i enviades, i qualsevol dada que es treballi en aquesta contractació seran propietat del Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural, i no podran ser utilitzades per l'empresa contractista per a cap altre fi que no sigui l'execució d'aquest contracte i farà un ús estrictament confidencial de totes elles.

Per delegació
(Resolució ACC/469/2022, de 24.2.2022,
DOGC núm. 8616 d'1.3.2022)

Mireia Boya e Busquet
Directora general de Qualitat Ambiental
i Canvi Climàtic

Signat digitalment