ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

Barcelona, 2010

MEDICIÓN DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN ESPACIOS NATURALES

Propuesta de un modelo predictivo

Por: Héctor Antonio Solano Lamphar
Director: Dr. Ramón San Martín Páramo

MEDICIÓN DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN ESPACIOS NATURALES

Propuesta de un modelo predictivo

Héctor Antonio Solano Lamphar

Departament d'Estudis Luminotècnics (EL), Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Campus Sud, Edif. H, Av. Diagonal, 647, 08028 Barcelona, Spain

Director: Dr. Ramón San Martín Páramo

Doctorado en Ingeniería de proyectos: Medio Ambiente, Calidad, Seguridad y Comunicación.

Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universidad Politécnica de Catalunya

Barcelona, 2010

A mis Padres, a mi Hermana, a Sofía.

Con todo mi cariño, admiración y respeto.

AGRADECIMIENTOS

Es para mí un placer expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas, instituciones y empresas que de una u otra forma significaron un soporte en la realización de esta tesis doctoral.

En especial y con sinceridad a mi director Dr. Ramón San Martin Páramo por manifestar siempre un apoyo absoluto, una excelente dirección y un trato personal excepcional.

A los expertos revisores por las acertadas observaciones que realizaron de la tesis.

Al Dr. Lázaro Cremades Oliver por su accesibilidad y disponibilidad.

Al Dr. Miroslav Kocifaj por los excelentes consejos en parte del desarrollo de la propuesta de investigación.

A los buenos amigos de la "pecera": Manu, Toni, Pau, Edgar, Berenice; y a los buenos amigos del piso 10: Luis, Dayra, Joaquina, Brenda, con quienes compartí agradables momentos de trabajo, de amistad y de diversión. De cada uno de ellos aprendí grandes cosas.

A mi familia y a Sofía que siempre me motivaron, me tuvieron paciencia, me aconsejaron y me ayudaron considerablemente en el desarrollo de esta tesis.

Al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACyT) por el impulso al progreso científico de México y en lo personal por el apoyo recibido.

A todas las personas que representaron un sostén, antes y durante los estudios de doctorado.

A todos ellos mi franca gratitud…

Pasada la media noche
La Vía Láctea
Descansa en un bambú

MASAOKA SHIKI

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo primario realizar una serie de análisis que evaluaran los factores que afectan directamente a zonas naturales expuestas a la contaminación lumínica. Para posteriormente utilizar los datos levantados y desarrollar una propuesta de modelo para la caracterización de la contaminación lumínica en espacios afectados por la iluminación artificial nocturna proveniente de focos contaminantes identificados.

Se seleccionaron los instrumentos adecuados para llevar a cabo una serie de mediciones lumínicas y recogida de datos de acuerdo a los factores de afectación reconocidos en zonas determinadas próximas a los focos de influencia, en diferentes lugares de España y México. Los lugares fueron elegidos por la principal característica de ser zona natural y de acuerdo a los factores de posible afectación.

Se realizó trabajo de laboratorio para el tratamiento de los datos que dieron las pautas para el buen desarrollo de la investigación y el cumplimiento de los objetivos propuestos. Se recrearon mapas lumínicos de superficie de las áreas estudiadas y se buscaron tendencias en los datos levantados apoyándose en herramientas estadísticas de correlación paramétrica, evidencia empírica que respaldó el razonamiento de la investigación.

Posteriormente se estudió la manera de llevar a cabo la propuesta del modelo con la cual fuera posible establecer el grado de intensidad de luz, en cualquier punto de espacios afectados por la contaminación lumínica, proveniente de los focos contaminantes cercanos a dichos puntos. La propuesta fue desarrollada tomando en cuenta las metodologías similares ya existentes y el tratamiento de los datos obtenidos.

Finalmente, el modelo se generó en una herramienta informática y se analizó cotejando los datos obtenidos por el mismo con los datos derivados de las investigaciones in situ.

PALABRAS CLAVE

Contaminación lumínica, modelo predictivo, recogida de datos, luminancia, espacio natural.

ABSTRACT

This research was made with the main objective to perform a series of analyses to assess factors that directly affect natural areas exposed to light pollution. Later the lifted data was used to develop a proposal model for the characterization of light pollution in affected areas from identified polluting sources of artificial night lighting.

Appropriate instruments were selected to perform a series of light measurement and collection of data according to affectation factors recognised in certain areas close to the sources of influence in different parts of Spain and Mexico. Sites were chosen by the main feature to be natural area and related to the factors of possible impacts.

There was laboratory work to take care of the data that provided the guidelines to conduct properly the investigation and the fulfilment of the objectives of the work. Light maps of the studied areas were recreated and tendencies were found based on multivariate statistical tools to correlate the data, empirical evidence that supported the research analysis.

Afterwards, was studied how to carry out the model with which possible to set the degree of intensity of light at any point in areas affected by light pollution from pollutants focus near of these points. The proposal was developed taking into account similar methodologies and the treatment of the data obtained.

Finally, the model was generated in a computer tool and was discussed checking the data obtained by the same with the data derived from the results in situ.

KEYWORDS

Light pollution, predictive modelling, data collection, luminance, natural environment.

ÍNDICES

Primera parte: La contaminación lumínica xiv

Segunda parte: Caracterización de la contaminación lumínica xv

Tercera parte: Desarrollo de la investigación xv

Cuarta parte: Razonamiento de la investigación xvii

Quinta parte: Bibliografía y anexos xviii

Índice de figuras xix

Índice de tablas xxiv

Glosario de términos xxvi

ÍNDICE

0. INTRODUCCIÓN 1

0.1. Definición del problema objeto de investigación 3
0.2. Justificación del problema objeto de investigación 7
0.3. Preguntas de investigación 8
0.4. Hipótesis 9
0.5. Objetivo general 9
0.5.1. Objetivos específicos 9
0.6. Delimitaciones 10
0.7. Sinopsis de la metodología utilizada 10
0.8. Estructura de la tesis 11
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA INTRODUCCIÓN 13

PRIMERA PARTE La contaminación lumínica 15

INTRODUCCIÓN 17

CAPÍTULO 1. El problema 18
1.1. Contaminación lumínica 19
1.2. El efecto de la contaminación lumínica en la variación de condiciones nocturnas de espacios naturales 31
1.3. El efecto de la contaminación lumínica en la astronomía 38
1.4. Efectos de la contaminación lumínica en seres humanos 46

CAPÍTULO 2. Las variables 49
2.1. Coeficiente de transmisión de la atmósfera 49
2.2. Orografía 53
2.3. Iluminación natural nocturna 54
2.4. Focos contaminantes 54

CAPÍTULO 3. Los instrumentos de medición 57
3.1. Luminancímetro 57
3.2. Sky Quality Meter 58
3.3. Instrumentos con tecnología CCD 59
3.4. Cámaras digitales 61

3.5. Imagen satelital 62
3.6. Fotómetro astronómico 63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA PRIMERA PARTE 65

SEGUNDA PARTE Caracterización de la contaminación lumínica 77

INTRODUCCIÓN 79

CAPÍTULO 4. LOS MODELOS DE ANÁLISIS DE LA CL 80
4.1. Modelo de Walker 80
4.2. Modelo de Treanor 81
4.3. Modelo de Berry 81
4.4. Modelo de Pike 83
4.5. Modelo de Garstang 85
4.6. Modelo de Albers y Duriscoe 86
4.7. Modelo de Cinzano 87
4.8. Modelado con observaciones de estrellas 88
4.9. Modelado usando GIS 88
4.10. Modelo de Aubé 90
4.11. Modelo de Kocifaj 91
4.12. Conclusiones 93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA SEGUNDA PARTE 95

TERCERA PARTE Desarrollo de la investigación 97

INTRODUCCIÓN 99

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA UTILIZADA 100
5.1. Definición de la investigación 101
5.2. Recopilación de información y decisiones primarias 101
5.3. Trabajo de campo 104
5.4. Razonamiento de datos 106
5.5. Determinación del modelo 107
5.6. Aprobación del modelo 107
5.7. Escrito final y conclusiones 107

CAPÍTULO 6. RECOGIDA EXPERIMENTAL DE DATOS 109
6.1. Fase 1: Estudio en el Parque Natural del Delta del Ebro 109
6.1.1. Descripción del Ámbito de estudio 110
6.1.2. Programación inicial y fases de trabajo 111
6.1.3. Planteamiento inicial del estudio 112
6.1.4. Trabajo de campo y recopilación de información, fase 1a 117
6.1.5. Nuevo trabajo de campo y recopilación de información, fase 1b 119
6.1.5.1. Datos climatológicos 123
6.1.6. Conclusiones recogida de datos fase 1 124
6.2. Fase 2: Estudio en el Área Natural del Mar de Cortés 124
6.2.1. Descripción del Ámbito de estudio 124
6.2.2. Programación inicial y fases de trabajo 125
6.2.3. Planteamiento inicial del estudio 126
6.2.4. Trabajo de campo y recopilación de información 129
6.2.5. Conclusiones recogida de datos fase 2 129
6.3. Fase 3: Parque natural de Aigüestortes i Estany de Sant Maurici 129
6.3.1. Descripción del Ámbito de estudio 130
6.3.2. Programación inicial y fases de trabajo 131
6.3.3. Planteamiento inicial del estudio 132
6.3.4. Trabajo de campo y recopilación de información 136
6.3.5. Conclusiones recogida de datos fase 3 137
6.4. Conclusiones de la recogida experimental de datos 137

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS LUMÍNICO 139
7.1. Fase 1: Análisis lumínico en el Parque Natural del Delta del Ebro 139
7.1.1. Medidas obtenidas 139
7.1.2. Mapas de intensidad lumínica celeste 141
7.1.3. Datos EFS y GRE 143
7.1.4. Mapa definitivo del Delta del Ebro 144
7.1.5. Conclusiones del análisis lumínico de la Fase 1 145
7.2. Fase 2: Análisis lumínico en el Área Natural del Mar de Cortés 146
7.2.1. Medidas obtenidas 146
7.2.2. Datos EFS y GRE 148
7.2.3. Mapas de intensidad lumínica celeste 149
7.2.4. Conclusiones del análisis lumínico de la fase 2 149
7.3. Fase 3: Análisis lumínico en el parque natural de Aigüestortes y Estany de Sant 150

Maurici
7.3.1. Medidas obtenidas 150
7.3.2. Datos EFS y GRE 150
7.3.3. Mapas de intensidad lumínica celeste 151
7.3.4. Conclusiones del análisis lumínico de la fase 2 152
7.4. Conclusiones del análisis lumínico 152

CAPÍTULO 8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO 155
8.1. Correlación entre mediciones lumínicas y humedad relativa 155
8.2. Correlación entre mediciones lumínicas y temperatura 156
8.3. Correlación entre datos arrojados por instrumentos 158
8.4. Correlación entre número de habitantes del foco y datos Ley de Walker 159
8.5. Correlación entre número de habitantes del foco y datos GRE 159
8.6. Correlación entre mediciones lumínicas y distancia de medición 161
8.7. Correlación entre mediciones lumínicas y datos EFS 164
8.8. Análisis de regresión lineal múltiple 166
8.8.1. Contaminación lumínica vs datos climatológicos 166
8.8.2. Luminancímetro vs SQM 168
8.8.3. Número de habitantes del foco vs datos modelo de Walker (1970) 168
8.8.4. Número de habitantes del foco vs datos EFS 168
8.8.5. Mediciones lumínicas vs distancia de medición 168
8.8.6. Mediciones lumínicas vs datos EFS 169
8.9. Conclusiones del análisis estadístico 169
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA TERCERA PARTE 171

CUARTA PARTE Fórmulación de propuesta y razonamiento de la investigación 173

INTRODUCCIÓN 175

CAPÍTULO 9: PROPUESTA DE NUEVO MODELO 176
9.1. Análisis del foco contaminante 177
9.1.1. Flujo dirigido 177
9.1.2. Características geométricas del foco contaminante 181
9.2. Análisis del observador 182
9.2.1. Determinación de distancias y ángulos 182
9.3. Determinación de corrección por curvatura de la tierra 185

9.4. Análisis del coeficiente de transmisión de la atmósfera 186
9.4.1. Extinción atmosférica 188
9.4.1.1. Dispersión por moléculas de Rayleigh 189
9.4.1.2. Extinción por ozono 189
9.4.1.3. Dispersión por aerosoles 190
9.4.2. Cálculo del coeficiente de transmisión 191
9.5. Análisis de probabilidad de dispersión 192
9.6. Determinación de obstáculos por orografía 194
9.7. Modelo que evalúa la variación de condiciones nocturnas de luminosidad en espacios afectados por la Contaminación Lumínica con atmósfera diáfana 196
9.8. Propuesta de corrección para condiciones adversas de climatología 200
9.8.1. Modelo que evalúa la variación de condiciones nocturnas de luminosidad en espacios afectados por la Contaminación Lumínica con condiciones adversas de climatología 202
9.9. Fórmula para conocer la contaminación lumínica de un punto influenciado por varios focos contaminantes 203
9.10. Pruebas al modelo propuesto 204
9.10.1. Caso real 204
9.10.2. Analizando la influencia por montañas 208
9.10.3. Herramienta informática 209
9.11. Conclusiones de la propuesta 210

CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES DE LA TESIS DOCTORAL 213
10.1. Conclusiones definitivas, contraste de hipótesis y cumplimiento de objetivos 213
10.1.1. Conclusiones en base al planteamiento inicial del estudio y resultados obtenidos 213
10.2. Aportaciones de carácter original 214
10.3. Propuestas de continuación 215
10.4. Publicaciones derivadas de la tesis doctoral 216
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA CUARTA PARTE 219

QUINTA PARTE Bibliografía y anexos 221

BIBLIOGRAFÍA 223
ANEXOS 241

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 0.1 Lámparas de gas desarrolladas en el siglo 19 4
Fig. 0.2 Esquema de luminaria contaminante y la recomendación para su arreglo 5
Fig. 0.3 Simulación de la contaminación lumínica en relación a la luminaria. (Nixon 2008) 5
Fig. 1.0 Esquema divisional del marco teórico 17
Fig. 1.1 Atlas nocturno de Europa. (Cinzano, Falchi & Elvidge 2001) 18
Fig. 1.2 Recomendación para un buen diseño de luminaria vial 18
Fig. 1.3 Logotipo de la real sociedad astronómica de Canadá (RASC 2009) 20
Fig. 1.4 Contaminación lumínica en la ciudad de Hong Kong (World Wildlife Fund 2010) 20
Fig. 1.5 Certificado que emite "La asociación internacional por un cielo oscuro" a las luminarias que no contaminan lumínicamente (IDA 2010) 21
Fig. 1.6 Ejemplo de luz intrusa -Light trespass- (Lighting research center, 2010) 22
Fig. 1.7 El espectro relacionado con la contaminación lumínica de tres diferentes tipos de lámparas (Osterbrook & Martel 1992) 24
Fig. 1.8 Crecimiento de la electricidad y de la iluminación a través de los años (Hanel 1997) 25
Fig. 1.9 Fotografías de Kyoto por la noche en periodos de baja y alta iluminación, respectivamente (Iizuka & Isobe 1998) 26
Fig. 1.10 Distribución de la intensidad luminosa de luminarias de alumbrado público utilizadas en Japón en 1998 (Kawakami & isobe 1998) 27
Fig. 1.11 Atlas nocturno mundial. (Cinzano, Falchi & Elvidge 2001) 29
Fig. 1.12 Algunas imágenes tomadas en "la hora del planeta" (World Wildlife Fund 2010) 30
Fig. 1.13 Diferencia entre un cielo oscuro y el mismo con contaminación lumínica. (IDA 2009) 31
Fig. 1.14 Bosque afectado por la contaminación lumínica (Conner, 2001) 32
Fig. 1.15 Imagen de campaña de introducción de la palabra "escotobiología" por los estudiosos de la influencia de la contaminación lumínica en los seres vivos (Muskoka heritage foundation 2008) 33
Fig. 1.16 La luz artificial y su influencia en la variación de condiciones nocturnas naturales. (Longcore & Rich 2004) 34
Fig. 1.17 Esquema del efecto de la iluminación artificial nocturna en murciélagos Rydell (2006) 35
Fig. 1.18 Efecto de los faros en la migración nocturna de aves (Montevecchi 2006) 36
Fig. 1.19 Miles de efemerópteros muertos a causa de una luz de seguridad (Rich & Longcore 2006) 37

Fig. 1.20 Comparaciones de las intensidades entre la lámpara de mercurio y la lámpara de sodio dependiendo de la longitud de onda (Fletcher & Crampton 1973) 38
Fig. 1.21 Uno de los primeros atlas nocturnos, en este ejemplo de EUA. Hoag (1976) 39
Fig. 1.22 Observatorio nacional de radioastronomía (NRAO 2010) 41
Fig. 1.23 Contaminación lumínica en el monte palomar (Caltech 2009) 42
Fig. 1.24 Observatorios astronómicos que presentaban reglamentos para su preservación en 1991(Schreuder 1991) 43
Fig. 1.25 Esquema de la recomendación de Cordell (1993) 44
Fig. 1.26 Caricatura de ejemplo de la luz intrusa y su solución. (RASC 2008) 46
Fig. 2.1 Espectroscopio utilizado por Aube como ayuda en la detección de aerosoles (Aube 2005) 50
Fig. 2.2 Mapas del fondo del cielo de Barcelona y de Seva, respectivamente, en Mag/arcseg2 (Torra y Fernández 2000) 52
Fig. 2.3 Comparación de resultados del modelo de Krisciunas y Schaefer con datos de mediciones realizadas (Krisciunas & Schaefer 1998) 54
Fig. 2.4 Luminarias ofrecidas a la venta por "Starry night Lights" y aprobadas por la IDA como no contaminantes (SNL 2009) 55
Fig. 2.5 Máximos valores permisibles de luminancia en plano vertical y de intensidad luminosa emitida por luminarias, recomendaciones del CIE. (IAC2002) 55
Fig. 2.6 Recomendaciones realizadas por el CIE para iluminancias en zonas peatonales (IAC2002) 56
Fig. 2.7 Descripción de tipos de zonas peatonales (IAC2002) 56
Fig. 3.1 Ejemplo de luminancímetros (LMT 2006) 58
Fig. 3.2 El SQM y las instrucciones para su correcto uso (Unihedron 2007) 59
Fig. 3.3 Fotografía astronómica tomada con objetivo "ojo de pez" 61
Fig. 3.4 Europa y sus puntos luminosos, en un Extracto del primer mapa satelital de la noche (Sullivan 1991) 62
Fig. 3.5 Mapa de los mejores lugares para observaciones astronómicas en África y Asia, identificados por medio de satélite meteorológico (Querci & Querci 1998) 62
Fig. 3.6 Brillo artificial del cielo nocturno a nivel del mar en Italia (Cinzano, Falchi & Elvidge, 2002) 63
Fig. 3.7 Fotómetro portable recomendado por Upgren (1992) 64
Fig. 3.8 Fotómetro astronómico 64
Fig. 4.0 Esquema divisional del estado del arte 79
Fig. 4.1 Relación entre población y lúmenes de iluminación de calles de ciudades de California –EUA- con el modelo de Walker. (Walker 1977) 80

Fig. 4.2 Esquema de la propagación de la iluminación de la ciudad con el modelo de Treanor. (Treanor 1973) 81
Fig. 4.3 Esquema del modelo de Treanor. (Treanor 1976) 83
Fig. 4.4 El crecimiento de la contaminación lumínica en Ontario, en intervalos de 5 años, según el modelo de Pike (1976) 84
Fig. 4.5 Esquema del modelo de Garstang (1986) 85
Fig. 4.6 Mapa lumínico obtenido con el modelo de Albers y Duriscoe (2001) 87
Fig. 4.7 Extracto del atlas de brillo artificial nocturno. (Cinzano, Falchi & Elvidge 2001) 87
Fig. 4.8 Mapa del brillo del cielo nocturno en Japón según el método de observaciones de estrellas de Isobe & Kosai (1998) 89
Fig. 4.9 Mapa de la contaminación lumínica en Terán (Tavoosi et al 2009) 90
Fig. 4.10 Esquema del modelo Illumina. (Aubé, 2005) 91
Fig. 4.11 Modelo para la medición de la contaminación lumínica en cielos con nubes (Kocifaj 2007) 92
Fig.5.0 Esquema divisional del desarrollo de la investigación 99
Fig. 5.1 Metodología utilizada 100
Fig. 6.1 Seguimiento de las Etapas de la investigación 112
Fig. 6.2 Tipos de mediciones utilizados en esta fase 113
Fig. 6.3 Primeras cuadrículas sobre mapa (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008) 114
Fig. 6.4 Grafico de las poblaciones cercanas al parque según el modelo de Walker (1970) (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008) 116
Fig. 6.5 Representación de las poblaciones de interés de estudio. (Solano., San Martín & García 2009a) 117
Fig. 6.6 Imágenes del lugar (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008) 118
Fig. 6.7 Esquema de recorridos de mediciones (Solano., San Martín & García 2009a) 119
Fig. 6.8 Recorrido de medición en imágenes correspondiente a r La aldea-Deltebre (Solano., San Martín & García 2009a 121
Fig. 6.9 Recorrido de medición en imágenes correspondiente a Deltebre-Riumar (Solano., San Martín & García 2009a) 122
Fig. 6.10 Seguimiento de las Etapas de la investigación. 126
Fig. 6.11 Tipo de medición utilizada en esta fase 126
Fig. 6.12 Recorrido de medición 127
Fig. 6.13 Foco de contaminación estudiado 128
Fig. 6.14 Área desde donde se realizaron las mediciones 130
Fig. 6.15 Seguimiento de las Etapas de la investigación 132
Fig. 6.16 Tipos de mediciones utilizados en esta fase 133

Fig. 6.17 Espacio donde se realizaron las mediciones 134
Fig. 6.18 Grafico de las poblaciones cercanas al parque según Ley de Walker (1970) 135
Fig. 6.19 Representación de las poblaciones de interés de estudio 136
Fig. 6.20 Tipos de luminarias encontradas en el lugar 136
Fig. 7.1 Esquema de recorrido entre la aldea y Deltebre (Solano., San Martín & García 2009b) 140
Fig. 7.2 Gráficos de recorridos de mediciones (Solano., San Martín & García 2009b) 141
Fig. 7.3 Grafico de porcentaje de mediciones encontradas (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008) 141
Fig. 7.4 Mapa lumínico del fondo del cielo según MgArcseg (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008) 142
Fig. 7.5 Mapa lumínico de iluminancias del suelo según Luxes (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008) 142
Fig. 7.6. Mapa definitivo con su respectivo gráfico (Solano., San Martín & García 2009a, 2009b, 2010a, 2010b) 145
Fig. 7.7 Gráficos de recorridos de mediciones 147
Fig. 7.8 Porcentaje de mediciones entre Los Mochis y Topolobampo, los colores corresponden a los elegidos para el mapa lumínico 148
Fig. 7.9 Mapa lumínico del recorrido entre Los Mochis y Topolobampo (Los colores en relación se observan en el grafico de la Fig. 7.8) 149
Fig. 7.10 Porcentaje de mediciones en el lugar, los colores corresponden a los elegidos para el mapa lumínico 151
Fig. 7.11 Mapa lumínico del área de estudio, las mediciones correspondientes al color se muestran en la fig. 7.10 152
Fig.8.1 Histograma de la correlación entre las dos variables. (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009) 156
Fig. 8.2 Histograma de la correlación entre las dos variables (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009) 157
Fig. 8.3 Histograma de correlación entre los dos instrumentos (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009) 158
Fig. 8.4 Histograma de correlación entre habitante e índice EFS (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009) 161
Fig. 8.5 Histograma de correlación entre mediciones hacia focos contaminantes y distancia de medición Deltebre -Marzo 2008- (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009) 163

Fig. 8.6 Histograma de correlación entre mediciones hacia focos contaminantes y distancia de medición Deltebre -Noviembre 2008-(Solano., San Martín, García & Ferrero 2009) 164
Fig. 8.7 Histograma de correlaciones entre mediciones hacia focos contaminantes y EFS del foco (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009). 166
Fig. 9.0 Esquema divisional de la formulación de propuesta y razonamiento de la investigación 175
Fig. 9.1 Explicación grafica del FHS y el FHI (Solano., San Martín, García 2009b) 180
Fig. 9.2 Explicacion grafica del flujo dirigido (Solano., San Martín, García 2009b) 180
Fig. 9.3 Comportamiento descriptivo de la fórmula de flujo ditigido 181
Fig. 9.4 Gráfica del área de la ciudad (Solano., San Martín, García 2009b, 2010c) 181
Fig. 9.5 Esquema de la propuesta con distancias y ángulos de trabajo (Solano., San Martín, García 2009b) 183
Fig. 9.6 Caracterización de la curvatura de la tierra (Solano., San Martín, García 2010c) 186
Fig. 9.7 Gráfica de los resultados de la fórmula tradicional de masa de aire 187
Fig. 9.8 Gráfica de los resultados de la fórmula Kasteng y Young (1989) de masa de aire 188
Fig. 9.9 Esquema de probabilidad de dispersión 192
Fig. 9.10 Esquema de obstáculo por orografía entre el observador y la ciudad(Solano., San Martín, García 2010c) 194
Fig. 9.11 Representación grafica del primer ángulo solido (Solano., San Martín, García 2009b) 197
Fig. 9.12 Esquema del modelo completo (Solano., San Martín, García 2010c 200
Fig. 9.13 Esquema del modelo completo para varios focos contaminantes 204
Fig. 9.14 Esquema de la simulación realizada con ejemplo de toma de distancia (Solano., San Martín, García 2009b) 205
Fig. 9.15 Variación de la contaminación lumínica con la distancia (Solano., San Martín, García 2010c) 206
Fig. 9.16 Histograma de correlación entre mediciones in situ y simulaciones del modelo propuesto (Solano., San Martín, García 2009b) 207
Fig. 9.17 Histograma de correlación entre mediciones in situ y simulaciones del modelo propuesto 209

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Descripción de zonas medioambientales adoptadas por la CIE. (Narisada & Schreuder, 2004) 19
Tabla 6.1 Tabla explicativa de la recogida experimental de datos 109
Tabla 6.2 Datos de las poblaciones cercanas según el modelo de Walker (1970) (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008) 115
Tabla 6.3 Datos climatológicos en contraste con el clima del lugar (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009) 123
Tabla 6.4 Datos de las poblaciones cercanas según el modelo de Walker (1970) 135
Tabla 7.1 Ejemplo de Mediciones de recorrido entre La aldea y Deltebre (Solano, San Martín & García 2010a) 139
Tabla 7.2 Análisis correspondiente a los focos contaminantes 144
Tabla 7.3 Mediciones de luminancia de fondo de cielo 146
Tabla 7.4 Análisis correspondiente al foco contaminante 148
Tabla 7.5 Mediciones de luminancia de fondo de cielo 150
Tabla 7.6 Análisis de los focos contaminantes que afectan al lugar estudiado 151
Tabla 8.1. Correlaciones de mediciones y la humedad relativa 155
Tabla 8.2. Correlaciones de mediciones y la temperatura 157
Tabla 8.3 Correlaciones entre los dos instrumentos de medición 158
Tabla 8.4 Correlaciones entre población y datos generados con el modelo de Walker (1970) 159
Tabla 8.5 No. de habitantes y EFS de las poblaciones analizadas con este trabajo 160
Tabla 8.6 Correlaciones entre población y datos EFS 160
Tabla 8.7 Correlaciones entre mediciones y distancia del foco 162
Tabla 8.8 Correlación Deltebre (Marzo 2008) 162
Tabla 8.9 Correlación Deltebre (Noviembre 2008) 163
Tabla 8.10 Datos de mediciones hacia focos contaminantes y EFS de la población 165
Tabla 8.11 Correlación entre mediciones y EFS –ley cuadrática aplicada-. 165
Tabla 8.12 Coeficientes de correlación 166
Tabla 8.13 Estadísticas de la regresión 167
Tabla 8.14 Estadísticas de la regresión de las variables individuales 167
Tabla 9.1 Reflexiones de diferentes tipos de cemento 179
Tabla 9.2 Reflexiones de diferentes tipos de superficie (Shirkey 2008). 179
Tabla 9.3 Análisis de los focos analizados en la simulación 205
Tabla 9.4 Contraste de datos obtenidos por el modelo y mediciones in situ (Solano., San Martín, García 2009b) 206

Tabla 9.5 Análisis estadístico de los datos de simulación de caso real vs mediciones 207
Tabla 9.6 Contraste de datos obtenidos por el modelo y mediciones in situ en relación a la orografía 208
Tabla 9.7 Análisis estadístico de los datos de simulación vs mediciones con obstáculo orográfico 208
Tabla 9.8 Pantallas de la herramienta informática 210

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Anon.	Anónimo
AOM	Alcance óptico meteorológico
CCD	Acrónimo del inglés: charge-coupled device - dispositivo de cargas eléctricas interconectadas-
Cd/m^2	Candela por metro cuadrado
Cel Fosc	Associació contra la Contaminació Lumínica -Asociación contra la contaminación lumínica-
CIE	Acrónimo del francés: Commission Internationale de l´Eclairage -comisión internacional de la iluminación-
EFS	Emisión de flujo superior
Escotobiología	el estudio de la obscuridad como soporte de vida
FHI	Flujo hemisférico inferior
FHS	Flujo hemisférico superior
FL	Fluorescente
FTI	Flujo total instalado
GB	Gigabyte
GHz	Gigahercio
GIS	Acrónimo del inglés: Geographic Information System -Sistema de Información Geográfica-
GRE	Grado relativo de emisión
HM	Hidrogenuros metálicos
IAU	Acrónimo del inglés: International astronomical unión –Unión astronómica internacional-
ICSU	Acrónimo del inglés: International council of science -Consejo Internacional de Uniones Científicas
IDA	Acrónimo del inglés: International Dark Sky Asociation -la asociación internacional por un cielo oscuro-
in situ	En el sitio
INC	Incandescente
K	Kelvin
km	Kilómetros
LED	Acrónimo del inglés: Lighting emiting diode -diodo emisor de luz-
lm/W	Lúmenes por Watt
LMK	Acrónimo del Alemán: Lichtmeßtechnik –Técnica de medición de la luz
$Mag/arc\text{-}seg^2$	Magnitudes por arco segundo al cuadrado

MB	Megabyte
N	Cantidad de observaciones
NASA	Acrónimo del inglés: National Aeronautics and Space Administration- Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio-
NOAO	Acrónimo del inglés: National Optical Astronomy Observatory -Observatorio de Astronomía Óptica Nacional-
NRAO	Acrónimo del inglés: National Radio Astronomy Observatory -observatorio radioastronómico nacional-
OMM	Organización meteorológica mundial
RAMAL-UPC	Modelo Ratio y Análisis Medio Ambiental Lumínico
RGB	Acrónimo del inglés: Red Green Blue color model -modelo de color Rojo, Verde y azul-.
SNL	Acrónimo del inglés: Starry night lights -luces de noche estrellada-
SQM	Acrónimo del inglés: sky quality meter -medidor de la calidad del cielo
UNESCO	Acrónimo del inglés: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization -Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura-
VM	Vapor de mercurio
VSAP	Vapor de sodio a alta presión
W	Watts

Introducción

En este apartado se expone una introducción al problema que motivó la elaboración de este trabajo doctoral, los objetivos que se persiguieron y las hipótesis que se buscaron comprobar con la investigación.

Asimismo, se explican las partes que componen este documento.

0.1. Definición del problema objeto de investigación

La luz, considerada como su mayor fuente de energía, tiene una importancia fundamental para la vida de nuestro planeta. Las regulaciones climatológicas, la producción de alimentos, las funciones biológicas que incluyen el control de los ciclos biorrítmicos de los organismos, son sólo algunos ejemplos de la importancia que conlleva. Asimismo, el sistema visual de la mayoría de los seres vivos, que funciona a través del análisis de esa energía en forma de ondas luminosas, tanto naturales como artificiales, ha tomado una relevancia especial relegando a otros sistemas a planos secundarios o complementarios. De hecho, en diversos estudios se ha comentado que el 80% de la percepción en los seres humanos se realiza a través de la visión. (Solano 2005a, 2005b).

La visión es posible gracias al sistema lumínico; ondas electromagnéticas son captadas por el órgano visual y procesadas por partes específicas del cerebro para posteriormente ser interpretadas como imágenes, ayudando a tener una correcta percepción del entorno. El sistema lumínico está conformado por la luz natural y la luz artificial. La luz natural proviene principalmente del sol y en pequeñas cantidades por organismos o elementos naturales que la generan. La luz artificial contempla la que se produce a través de mecanismos ideados por los seres humanos.

El descubrimiento de la iluminación artificial ha representado un gran avance en la historia de la humanidad; empezando por el manejo del fuego, que permitió soportar el clima en épocas de frio, ahuyentar las fieras y adentrarse en las cavernas que antes estaban en total oscuridad. Posterior al fuego se fueron descubriendo nuevas formas de iluminación artificial. Desde las antiguas antorchas con leños encendidos; pasando por aceites, brasas, ceras y otros implementos; hasta la iluminación artificial actual, que comprende una serie de complejos elementos para mantener iluminadas las ciudades y que ha permitido realizar actividades que anteriormente sólo se efectuaban con luz natural.

La iluminación artificial comenzó a crecer intensamente a partir de la revolución industrial. Las recién implementadas fábricas, sobre todo textiles, necesitaban de una iluminación que permitiera jornadas de trabajo no únicamente en ambiente diurno, sino nocturno. Por lo tanto se ideó una lámpara tipo quinqué, que contenía una mecha y un depósito en donde se podía colocar, a manera de combustible, aceite de ballena, petróleo o queroseno -conocido como corriente de aire-. Posteriormente este dispositivo evolucionó a la bien conocida lámpara de gas, Fig. 0.1, que ha sido muy útil antes del descubrimiento y manejo de la electricidad.

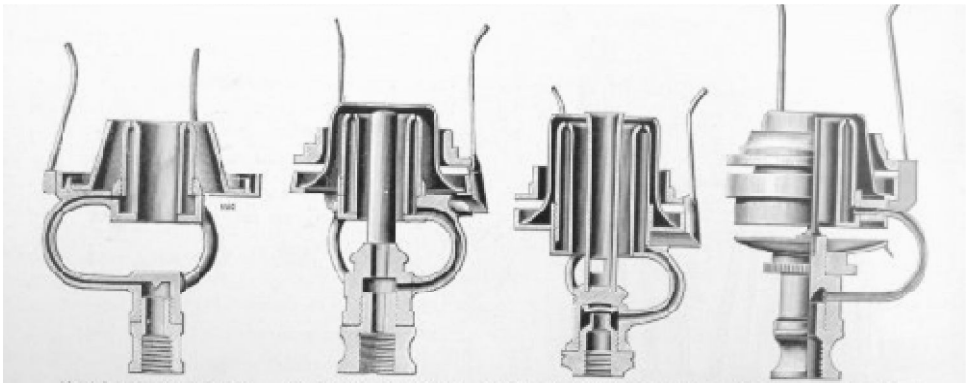


Fig. 0.1 Lámparas de gas desarrolladas en el siglo 19

Hoy en día se utilizan luminarias dotadas de lámparas de diferentes tipos -Incandescente, fluorescente, vapor de mercurio, vapor de sodio, LED conocido como diodo emisor de luz-, entre otros, que funcionan con electricidad y que cada vez permiten obtener una mayor y mejor iluminación con un menor consumo.

Sin embargo, algunos tipos de iluminación artificial representan una serie de inconvenientes. Desde hace algunos años y relacionado con la iluminación artificial, se ha empezado a investigar un nuevo problema que actualmente va en franco y no agradable crecimiento. A pesar de ser un nuevo problema, constituye una grave molestia para los seres vivos expuestos a éste y un gran derroche innecesario de energía. Nos referimos a la contaminación lumínica.

La contaminación lumínica se origina al llevar a cabo un mal diseño del alumbrado artificial y por lo tanto un uso ineficiente del mismo; éste alumbrado mal diseñado, envía irradiación lumínica a zonas del cielo donde obviamente no es necesario. Esta luz colisiona contra las partículas suspendidas en el espacio y se regresa desde la bóveda celeste a las zonas terrestres perturbando el ciclo elemental nocturno.

La iluminación artificial existe desde hace millones de años; pero hasta hace poco, debido principalmente al crecimiento mal gestionado de la ciudades, nos encontramos con el grave problema de la contaminación lumínica. El mal uso de proyectores, la iluminación publicitaria no controlada, y la ausencia de horario de apagado de iluminación habitual y ornamental contribuyen igualmente a generar y aumentar éste problema. Agregando que también se produce la contaminación lumínica al emplear intensidades excesivas y rangos espectrales no necesarios. Estos hechos han suscitado que se tenga una concepción errónea del problema, ya que en ocasiones se cree que se evitaría la contaminación lumínica si se deja de usar la iluminación artificial nocturna, cuando lo que se requiere es tener un buen diseño de la misma. En la Fig. 0.2

se observa un ejemplo de mal diseño y buen diseño, respectivamente, y en la Fig. 0.3 se puede observar una simulación de la contaminación lumínica con diferentes tipos de luminarias.

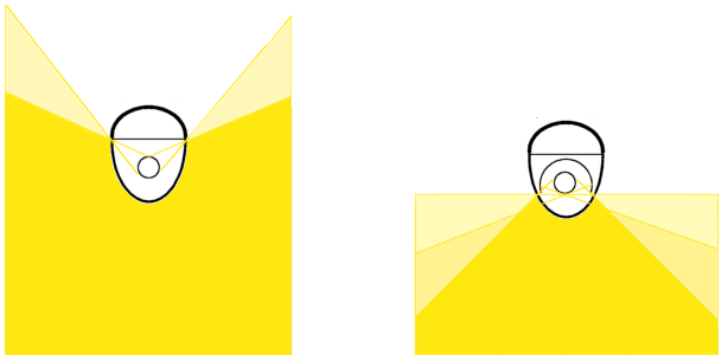


Fig. 0.2 Esquema de luminaria contaminante y la recomendación para su arreglo

Una manifestación evidente de éste problema se puede observar en un aumento del brillo del cielo nocturno, lo que hace que en muchas ciudades sea imposible la visión astronómica. Es por eso que muchos investigadores de los astros, afectados por la contaminación lumínica, han realizado campañas y reglamentos para tratar de resolver el problema. Estos reglamentos se utilizan sobre todo en los lugares cercanos y de influencia a los observatorios astronómicos. Otro efecto negativo lo vemos en el consumo irresponsable de energía; toda esa luz desperdiciada, enviada a espacios donde no se necesita, tuvo que generarse antes; lo que produce un aumento indirecto al problema del calentamiento global y la emisión de gases de invernadero.

Fig. 0.3 Simulación de la contaminación lumínica en relación a la luminaria. (Nixon 2008)

Además, entre las afectaciones que genera la contaminación lumínica se encuentra también el perjuicio a la biodiversidad, un tema que se ha tratado en menor medida pero de tanta o más

importancia que las anteriores. La luz, o su ausencia que es la obscuridad, son factores ambientales que influyen poderosamente en las condiciones de vida de las especies biológicas, incluidos los seres humanos. A través de su evolución, las formas vivientes de nuestro planeta se han adaptado a los ciclos astronómicos que los acompañan; los cambios de temperatura y humedad ambiental, entre otros; típicos de las estaciones del año y, principalmente, la alternancia entre la luz y oscuridad que ocurre cada día. El nivel bajo de iluminación que evidentemente existe por la noche es un ciclo natural al cual están familiarizados la mayoría de los organismos de la biodiversidad terrestre.

Desde hace aproximadamente tres décadas, se han llevado a cabo investigaciones acerca de las graves consecuencias que representan las alteraciones en esos ciclos a los que los seres vivos están acostumbrados desde hace millones de años. Muchos organismos pertenecientes tanto al reino animal como el vegetal, de hecho, presentan su mayor actividad durante la oscuridad, numerosas especies de insectos son de costumbres nocturnas y algunas flores por la noche generan un mayor olor para poder atraerlos y polinizarse. El hecho de contar con una iluminación innecesaria, que altere los ciclos naturales nocturnos, da pie a que haya graves desequilibrios ecológicos en la vida del planeta tierra. Hay muchos investigadores, sobre todo biólogos, que analizan el efecto directo de la contaminación lumínica que se produce en los alrededores del foco contaminante, normalmente ciudades.

La caracterización de la contaminación lumínica tuvo sus orígenes a principios del siglo 20. Si bien es cierto que el fenómeno empezó a estudiarse con mayor interés a partir de los años setenta, anteriormente se tiene conocimiento de investigadores que se interesaban por esa aurora que se veía por encima de las ciudades. Elvey y Roach (1937) realizaron una investigación con el objetivo de analizar las variaciones de luminancia que se experimentaban en el cielo nocturno. Se utilizó un fotómetro fotoeléctrico y se obtuvieron mediciones de diferentes horas de la noche y en diferentes temporadas.

Sin embargo, las metodologías y modelos con el objetivo de caracterizar a la contaminación lumínica se desarrollaron tiempo después. La mayoría de estos fueron ideados por astrofísicos que buscaban sitios adecuados para observaciones del cielo nocturno, Walker (1970), Berry (1976) y Garstang (1984) fueron los pioneros.

Después de analizar las metodologías existentes observamos que no se cuenta con una herramienta que sirva de apoyo a las investigaciones del efecto de la contaminación lumínica en espacios naturales y determinación de puntos adecuados para la observación astronómica, que permita conocer el efecto que produce la contaminación lumínica en la variación de condiciones

nocturnas en espacios afectados, que sea adecuada en cuanto a resultados, aborde todos los factores que intervienen en el problema, realice una caracterización adecuada del foco contaminante y que sea sencilla de usar.

0.2. Justificación del problema objeto de investigación

Las últimas investigaciones indican que el uso excesivo e irresponsable del alumbrado de exteriores es la causa de una nueva agresión medioambiental que amenaza, ni más ni menos, con eliminar la noche; perturbando de ésta manera dicho período cósmico. Éste fenómeno se conoce con el nombre de contaminación lumínica **(**Horts 2001**)**.

La contaminación lumínica afecta las observaciones astronómicas y evita que en muchos lugares sea imposible observar la belleza del cielo nocturno, que se está buscando sea declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO.

La contaminación lumínica es un derroche de energía innecesario y un directo aporte significativo al problema del calentamiento global de nuestro planeta.

La contaminación lumínica es un problema evidente que afecta a todo ser vivo que interactúa con la iluminación. Altera los ciclos naturales del ser humano, de la fauna e incluso de la flora. La mayoría de los organismos terrestres son fotosensibles y se relacionan considerablemente con los diferentes niveles de iluminación que ocurren cada día. Por lo tanto, cualquier mínima alteración de esos niveles ocasiona desequilibrios que no son para nada favorables.

Actualmente, para poder conocer el nivel de contaminación lumínica producida por la iluminación artificial nocturna es necesario utilizar ciertos instrumentos que representan una indiscutible dificultad en el análisis del fenómeno. Algunos instrumentos tienen un costo excesivo que los hacen de difícil adquisición y para usarlos en ocasiones se requieren conocimientos muy especializados. Otras herramientas se centran específicamente en la medición de la luminancia de la bóveda celeste sin tomar en cuenta todos los factores que aumentan o disminuyen la contaminación lumínica -Características del foco contaminante, características atmosféricas de extinción y dispersión de la luz, características climatológicas y características de terreno-.

Asimismo, existen una serie de metodologías ideadas con el objetivo de la caracterización de la contaminación lumínica; que han sido de gran utilidad en el entendimiento del fenómeno, sin embargo, después de analizarlos, se planteó la posibilidad de proponer alguno acorde a las características buscadas. Esta herramienta debe ser accesible en su uso y fiable en su resultado,

servir de análisis para evaluar la variación de condiciones nocturnas en espacios naturales afectados por la contaminación lumínica e involucrar los factores de efecto en el problema. Los investigadores que se dedican al análisis del problema que representa la iluminación artificial en la variación de condiciones nocturnas en espacios afectados por la contaminación lumínica, requieren una herramienta que les de las bases para conocer el grado de afección en el área que están estudiando.

Por lo tanto, este trabajo se propuso con la principal motivación de caracterizar la contaminación lumínica de diferentes lugares para así tener las bases para formalizar un modelo que permita reconocer cuál es la problemática que existe sobre la variación de condiciones nocturnas en espacios afectados por la contaminación lumínica, y que sirva de herramienta de apoyo a investigaciones en la biodiversidad e investigaciones sobre localización de puntos de observatorios astronómicos.

0.3. Preguntas de investigación

Derivadas de las inquietudes que suscita este trabajo y tomando en cuenta los planteamientos que comentamos anteriormente, nos surgen las siguientes preguntas de investigación.

¿Es posible llevar a cabo una determinación de la magnitud de la contaminación lumínica, expresada en valores de la luminancia del fondo celeste, tomando en cuenta los factores que caracterizan al fenómeno?

¿Es posible tomar en cuenta esos factores y crear un modelo para evaluar la variación de condiciones nocturnas en espacios afectados por la contaminación lumínica como herramienta de apoyo a investigaciones relacionadas?

0.4. Hipótesis

Derivadas de las preguntas de investigación surgieron las siguientes hipótesis.

A. La magnitud de la contaminación lumínica expresada en valores de “luminancia de fondo celeste” viene determinada por:

- las características fotométricas de los focos contaminantes.
- la distancia entre los focos contaminantes y la zona de estudio.

- ❖ la influencia del clima -en este caso humedad y temperatura ambiente- en la transmisión de la luz a través de la atmósfera.
- ❖ los obstáculos orográficos que se tengan entre el observador o zona de estudio, y el foco contaminante.
- ❖ La dispersión de la luz causada por aerosoles y moléculas en suspensión.
- ❖ La extinción de la luz causada por aerosoles y moléculas en suspensión.

B. Es posible obtener un modelo predictivo que englobe dichos factores y que permita el cálculo, caracterización y simulación de la magnitud de la contaminación lumínica en un caso determinado.

0.5. Objetivo general

La finalidad principal de este trabajo de tesis doctoral fue conocer la afectación que produce la contaminación lumínica sobre el territorio, originada por focos contaminantes próximos, para que fuera posible emplear esta información en estudios referentes a la variación de condiciones de iluminación nocturna en espacios naturales y poder proponer un modelo de análisis factible en el estudio de la contaminación lumínica.

0.5.1. Objetivos específicos

A. Estudiar en situaciones reales la influencia de cada uno de los parámetros antes citados para caracterizar la distribución de luminancias de la bóveda celeste nocturna en su efecto sobre la variación de las condiciones nocturnas en espacios naturales afectados por la contaminación lumínica, por cuatro vías alternativas o complementarias:

- ❖ Metodología de cuantificación en función de:
  a. Magnitud y posición de los núcleos contaminantes -ciudades, carreteras, empresas, entre otros-.
  b. Condiciones climatológicas y atmosféricas, analizando su respectiva influencia en el aumento y disminución de la contaminación lumínica.
  c. Orografía del territorio.
- ❖ Metodología de medición “in situ”
- ❖ Crear mapas lumínicos de los lugares analizados.
- ❖ Determinar tendencias de los factores que caracterizan a la contaminación lumínica.

B. A partir de los datos obtenidos; crear un modelo de análisis para evaluar la variación de condiciones nocturnas en espacios afectados por la contaminación lumínica que funcione como herramienta de apoyo a investigaciones en la biodiversidad, astronomía amateur y de aproximación del efecto.

C. Comprobar la capacidad del modelo mediante la aplicación en situaciones reales, revisiones de expertos y publicaciones.

0.6. Delimitaciones

Es indudablemente necesario demarcar el campo que aborda una investigación doctoral. Esto funciona como un camino para delimitar aquellos ámbitos sobre los que se desarrollará el estudio, para facilitar su ejecución y valoración.

Así mismo, estas delimitaciones ayudan a que las futuras investigaciones que se basen en éste trabajo no caigan en incertidumbre. Por lo tanto, se procedió a definir las siguientes delimitaciones tomando en cuenta parámetros espaciales, funcionales y técnicos.

- ❖ El modelo propuesto deberá enfocarse a las áreas analizadas en la presente investigación; es decir, espacios que presenten variación de sus condiciones nocturnas debido a la contaminación lumínica.
- ❖ Será recomendado sólo para evaluar el grado o nivel aparente de intensidad de luz proveniente de la bóveda celeste y de los focos determinados; y se deberán tomar en cuenta los factores, tal y como se indicará a lo largo de este trabajo, que aumentan o disminuyen el nivel de contaminación lumínica, como el clima, características atmosféricas del lugar y la orografía del terreno.
- ❖ Así mismo, se recomienda incluir la variable orografía siempre y cuando el obstáculo orográfico se localice entre el observador y el foco contaminante.

0.7. Sinopsis de la metodología utilizada

Hablando abreviadamente, la metodología utilizada para la realización de este trabajo consistió en cuatro fases primordiales:

Investigación documental. Con la cual se sentaron las bases para la caracterización teórica del presente trabajo.

- ❖ Se requirió un análisis exhaustivo del problema para: determinar los factores que lo involucran y las actividades necesarias a analizar con la presente investigación, la determinación de los problemas que otros autores han encontrado en el contexto estudiado, la determinación de los ataques al problema que se han utilizado anteriormente.
- ❖ Se llevó cabo la determinación de las metodologías para el análisis de la contaminación lumínica que actualmente existen y de esta manera se establecieron las características de la propuesta metodológica.

Investigación de campo. Consistente en cuatro fases a lo largo de dos años, en diferentes regiones, que ayudaron a analizar los factores de influencia en el problema estudiado y que permitieron la recogida experimental de datos para su posterior tratamiento.

- ❖ Se analizaron los factores establecidos en la investigación documental.
- ❖ Se utilizaron los instrumentos recomendados por otros investigadores.
- ❖ Se llevó a cabo el levantamiento de datos bajo las oportunas circunstancias de la medición in situ.

Investigación de laboratorio primaria. Con la cual se analizaron los datos obtenidos y se encontraron tendencias, para posteriormente realizar las propuestas convenientes.

- ❖ Se llevó cabo correlaciones de datos apoyándose en herramientas estadísticas de dispersión.
- ❖ Se graficaron los datos para encontrar tendencias.

Investigación de laboratorio secundaria.

- ❖ Se realizó la propuesta metodológica una vez concluida la investigación de laboratorio primaria.
- ❖ Se reforzó la metodología con pruebas piloto y apoyo de publicaciones recientes.

0.8. Estructura de la tesis

El trabajo se compone de los siguientes apartados: Una introducción en la cual se discute sobre la necesidad de realizar el trabajo y el aporte científico que se estará haciendo con la investigación, unos antecedentes –primera parte- en donde se abordan las investigaciones preliminares que se refieren al tema tratado y los aspectos necesarios para su investigación, un estado del arte -segunda parte- con el cual se exponen las metodologías similares que existieron antes de la

propuesta surgida con este trabajo, un desarrollo de la investigación -tercera parte- en el que se explica la metodología que se utilizó, la manera en que fue la recogida experimental de datos, las fases de tomas de datos que se tuvieron en la investigación y los análisis lumínicos estadísticos a los que fueron sometidos los datos obtenidos.

Un razonamiento de la investigación -cuarta parte- en la que se abordan las derivaciones que se tuvieron después de analizar los datos levantados, incluyendo el desarrollo del modelo propuesto y la explicación de sus características; y en la cual se exponen las conclusiones generales presentando las pruebas que se realizaron al modelo propuesto, las ventajas que se encontraron y la previsión de desarrollo futuros.

Y un apartado de bibliografía y anexos -quinta parte-, en el cual se señalan las fuentes teóricas que fueron necesarias para el entendimiento y desarrollo de esta investigación de tesis doctoral, y en donde se incluyen los anexos necesarios para la mejor esquematización y reproducibilidad del presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA INTRODUCCIÓN

1. BERRY, R. L. (1976) Light pollution in Southern Ontario. *The journal of the royal astronomical society of Canada,* 70**,** 3.

2. ELVEY, C. T. & ROACH, F. E. (1937) A photoelectric study of the light from the night sky. *The Astrophysical Journal* 85**,** 213-241.

3. GARSTANG, R. H. (1984) Model for Artificial Night-Sky Illumination. *Bulletin of the American Astronomical Society,* 16**,** 904.

4. HORTS, F. P. (2001) ¿Quién nos ha robado la vía láctea? El problema de la contaminación lumínica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra,* 7**,** 2.

5. NIXON, D. (2009) *Light pollution Simulator*. [citado: 8 de diciembre de 2009]; Disponible en: www.need-less.org.

6. SOLANO LAMPHAR, H. A. (2005a) Ergoftalmología: Análisis de los Factores que Inciden en la Astenopía de los Trabajadores de Inspección Visual en la Industria Electrónica de Ciudad Juárez. *.Division De Estudios de Posgrado e investigacion.* Ciudad Juaréz, ITCJ.

7. SOLANO LAMPHAR, H. A. & REYES MARTÍNEZ, R. M. (2005b) Ergoftalmología: Análisis de los Factores que Inciden en la Astenopía de los Trabajadores de Inspección Visual en la Industria Electrónica de Ciudad Juárez. IN SEMAC (Ed.) *VII Congreso Internacional de Ergonomía. Sociedad de Ergonomistas de México, A.C.* Monterrey, México.

8. WALKER, M. F. (1970) Light pollution model. *Publications of the ASP,* 82**,** 672.

Primera Parte

La contaminación lumínica

En este apartado se tratan las investigaciones que se han realizado con el objetivo de abordar el problema de la contaminación lumínica.

La narración, dentro de cada capítulo, se presenta de manera cronológica, es decir, se tomó en cuenta la fecha de publicación de las investigaciones analizadas.

INTRODUCCIÓN

Esta parte, planteada a manera de marco teórico, representa una exploración bibliográfica del problema y está divido en tres principales secciones que se pensó necesario analizar separadamente debido a la importancia que representan a la investigación. El primer capítulo es el problema en su estado más concreto es decir, la contaminación lumínica. El segundo capítulo está relacionada con las variables que se creyó influyen directamente en el problema y el tercer capítulo concerniente a los instrumentos que se utilizaron para el análisis de la investigación.

A su vez, el capítulo del problema se divide en una exploración general de la contaminación lumínica, seguido de la relación y la influencia que ejerce sobre la variación de condiciones nocturnas en espacios naturales, el efecto en los seres humanos y por último el efecto que produce la contaminación lumínica en las observaciones astronómicas.

El capítulo de variables se divide en los factores que se estudiaron como influencia en la contaminación lumínica es decir, el coeficiente de transmisión de la atmósfera, la orografía, la iluminación natural nocturna y los focos contaminantes.

Por último, en el capítulo de instrumentos se estudiaron los aparatos que se utilizan en recogidas experimentales de datos al trabajar con contaminación lumínica; luminancímetros, el medidor de la calidad del cielo –SQM-, dispositivos con sensores CCD, cámara digital, imagen satelital y fotómetro astronómico.

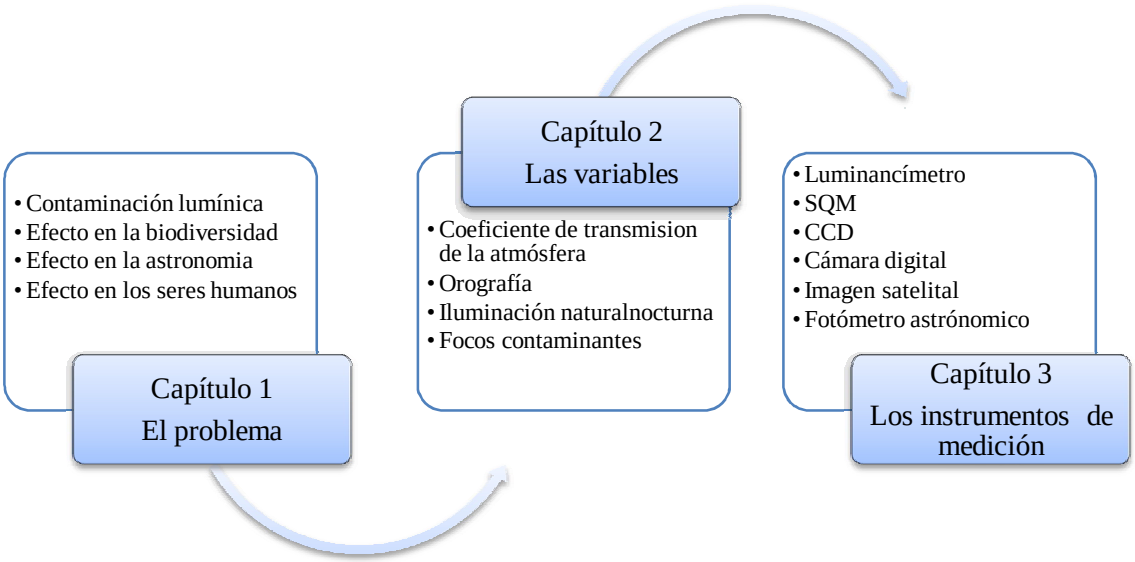


Fig. 1.0. Esquema divisional del marco teórico

CAPÍTULO 1. EL PROBLEMA

Nos enfrentamos a un nuevo ataque medioambiental, originado por el uso excesivo e irresponsable del alumbrado de exteriores. Este problema altera el proceso natural nocturno de iluminación y afecta los procesos biológicos de los seres vivos expuestos a él, dificulta las observaciones astronómicas y ocasiona un derroche de energía innecesario. Este fenómeno se conoce con el nombre de contaminación lumínica y gráficamente se puede observar en los conocidos atlas nocturnos de Cinzano, Falchi & Elvidge (2001), fig. 1.1.

Fig. 1.1 Atlas nocturno de Europa. (Cinzano, Falchi & Elvidge 2001)

La contaminación lumínica se origina cuando se emite flujo luminoso, proveniente de fuentes de iluminación artificial, en direcciones, intensidades y rangos espectrales innecesarios para la actividad que desempeñan. Uno de los principales consejos en el combate de la contaminación lumínica es tener un buen diseño del alumbrado artificial; acción que no solo disminuiría la contaminación lumínica, también ahorraría mucha energía desperdiciada. No es conveniente apagar todas las fuentes de iluminación nocturna, puesto que muchas de ellas son necesarias, lo que sí es imprescindible es realizar una adecuada gestión, diseño y acomodo de ellas –véase Fig. 1.2.

Fig. 1.2 Recomendación para un buen diseño de luminaria vial

La contaminación lumínica no se conoce tan ampliamente como otros tipos de contaminación ambiental; sin embargo, cada vez es más divulgada a tal grado que muchos países, organizaciones como la comisión internacional de iluminación –CIE- y comunidades autónomas están implementando reglamentos y recomendaciones para su tratamiento. De hecho la CIE realizó una clasificación de zonas medioambientales de acuerdo a sus características de iluminación artificial nocturna –Tabla 1.1-.

Zona	Características	Iluminación medioambiental	Ejemplos
E1	Natural	Específicamente obscuro	Parques nacionales o sitios protegidos
E2	Rural	Distrito de bajo brillo	Áreas rurales
E3	Suburbano	Distrito de medio brillo	Suburbios residenciales
E4	Urbano	Distrito de alto brillo	Áreas comerciales

Tabla 1.1 Descripción de zonas medioambientales adoptadas por la CIE. (Narisada & Schreuder, 2004)

1.1. Contaminación lumínica

El estudio de la contaminación lumínica es más antiguo de lo que se piensa. Si bien es cierto que el fenómeno empezó a analizarse con mayor interés a partir de los años setenta, se tiene conocimiento de investigadores que anteriormente se interesaban por esa aurora que se veía por encima de las ciudades.

Es preciso mencionar a Elvey y Roach (1937) que realizaron una interesante investigación con el objetivo de analizar las variaciones de luminancia que se experimentaban en el cielo nocturno. Utilizaron un fotómetro fotoeléctrico y obtuvieron mediciones de diferentes horas de la noche y en diferentes temporadas. Aunque a esta investigación no continuaron otras en futuro cercano.

Se necesitaron más de tres décadas para que aparecieran nuevas investigaciones relacionadas con la contaminación lumínica, un análisis no íntegro del fenómeno de la contaminación lumínica empezó desde mediados de los años setenta; las organizaciones astronómicas, preocupadas por este inconveniente que afectaba en gran medida sus observaciones, unieron esfuerzos para tratar de disminuirlo. Sin embargo, se tiene conocimiento de pocas investigaciones relacionadas en ese tiempo, debido al desconocimiento que se presentaba del problema. Una de ellas es la que publicó en junio del año de 1976, inspirados por Walker (1973), la real sociedad astronómica de Canadá –RASC- organización pionera en el estudio de la contaminación lumínica y que aun sigue generando importantes contribuciones –fig. 1.3. La persona que presento la investigación fue Berry (1976) y lo que hizo fue proponer una escala de contaminación lumínica en relación con las medidas de luminancia del cielo. Específicamente en Mag/arc-seg^2**,** un tipo de magnitud muy utilizada por los astrónomos en la medición de la calidad del fondo del cielo.

Fig. 1.3 Logotipo de la real sociedad astronómica
de Canadá (RASC 2009)

Años después crecieron las investigaciones relacionados con la contaminación lumínica y a partir de ese momento hubo una gran cantidad de estudios, los primeros concernientes a la visión astronómica. Es decir, los modelos e investigaciones primarias para la caracterización del problema y de los cuales se tiene conocimiento, corresponden a trabajos hechos con la finalidad de determinar la contaminación lumínica como efecto en las observaciones astronómicas.

Podemos citar como ejemplo los modelos de Walker (1970), que después caracterizó la contaminación lumínica en California y Arizona (Walker, 1973), y Garstang (1984) que son de los que se ha tenido una mayor difusión. También relacionado la caracterización que realizó Hendry (1984) en donde concluyó que la contaminación lumínica y su efecto a los observatorios, crece un 20 por ciento anualmente. Es por eso que, aunque últimamente la atención de la contaminación lumínica se centra con un buen detalle en la afectación a los seres vivos; sin duda, el descubrimiento del problema se realizó después que investigadores de la astronomía, amateurs y profesionales, se dieron cuenta que se cubría de un molesto brillo la bóveda celeste y les impedía realizar sus observaciones de manera adecuada.

Fig.1.4 Contaminación lumínica en la ciudad de Hong Kong (World Wildlife Fund 2010)

Posterior a las primeras investigaciones vinieron otras, que abordaban diferentes aspectos y que por lo tanto ayudaron a que el problema se fuera conociendo y divulgando en mayor medida. De

esta manera, Crawford y Hunter (1988) originaron una asociación internacional muy importante contra la contaminación lumínica conocida como “La asociación internacional por un cielo oscuro” –International Dark Sky Asociation-, que es una campaña, todavía existente, llevada a cabo por personas que desean reducir la contaminación lumínica. Los miembros de dicha organización buscan "reclamar" el cielo de noche y que se puedan ver las estrellas, reducir los efectos de la iluminación artificial en el medio ambiente y reducir el mal uso de la energía.

El movimiento comenzó con los astrónomos profesionales y aficionados que estaban alarmados por el resplandor nocturnal de áreas urbanas. Como ejemplo, en la propuesta se mencionaron las características del efecto de la contaminación lumínica en el observatorio de Griffith y el observatorio de Palomar, en Los Ángeles. Según las investigaciones de “La asociación internacional por un cielo oscuro” el observatorio de Griffith es inútil para la astronomía, debido a la niebla por el día y a la contaminación lumínica por la noche, mientras que el observatorio de Palomar está siendo amenazado por la postura desgarbada de la ciudad de California.

En los posteriores años siguió habiendo congresos organizados por la asociación, siempre enfocados al entendimiento y la búsqueda de la disminución del efecto del problema en todos los aspectos que contiene. Se puede encontrar una interesante recopilación, de las publicaciones de la asociación entre 1988 y 1993, llevada a cabo por Cinzano (1993). De hecho, uno de los fundadores de la “comisión internacional por un cielo obscuro”, Hunter (1991), realizó una investigación bastante interesante sobre el costo económico de las contaminación lumínica, los datos son alarmantes: para generar la electricidad desperdiciada por la iluminación que se va por encima de la horizontal, se necesitaron 30 millones de barriles de petróleo, lo que cuesta al país (EUA) mil millones de dólares al año (Hunter, 1997). La asociación se volvió tan importante y ha sido tan reconocida que hoy en día muchos fabricantes de luminarias se enorgullecen de tener un certificado de luminaria amigable al cielo oscuro, emitido por la asociación, fig. 1.5.

Fig. 1.5 Certificado que emite “La asociación internacional por un cielo oscuro” a las luminarias que no contaminan lumínicamente (IDA 2010)

Aparecieron consecutivamente investigaciones y escritos que explicaban un problema reciente y las características que este tenía. Se puede mencionar uno que englobaba los principales conceptos referentes a la contaminación lumínica y que se publicó en el observatorio nacional Kitt Peak de Tuczon, Arizona, en los Estados Unidos de Norteamérica en el año de 1991. Este artículo es solo una pequeña introducción al problema de la contaminación lumínica. (Crawford 1991). Otro parecido fue publicado en la ya mencionada real sociedad astronómica de Canadá. En el escrito, Lewis (1991) explica como el problema es responsabilidad de todos y que debemos hacer para mejorarlo.

Asimismo, Tanner (1991) investiga sobre un problema que no se había tomado con la importancia que debería: la luz intrusa, esquematizada en la fig. 1.6. Esa molesta luz que entra por la ventana nos orilla a bajar las persianas para poder dormir adecuadamente. Tanner (1991) recomienda tener una mejor distribución y control sobre la iluminación, principalmente de tipo público.

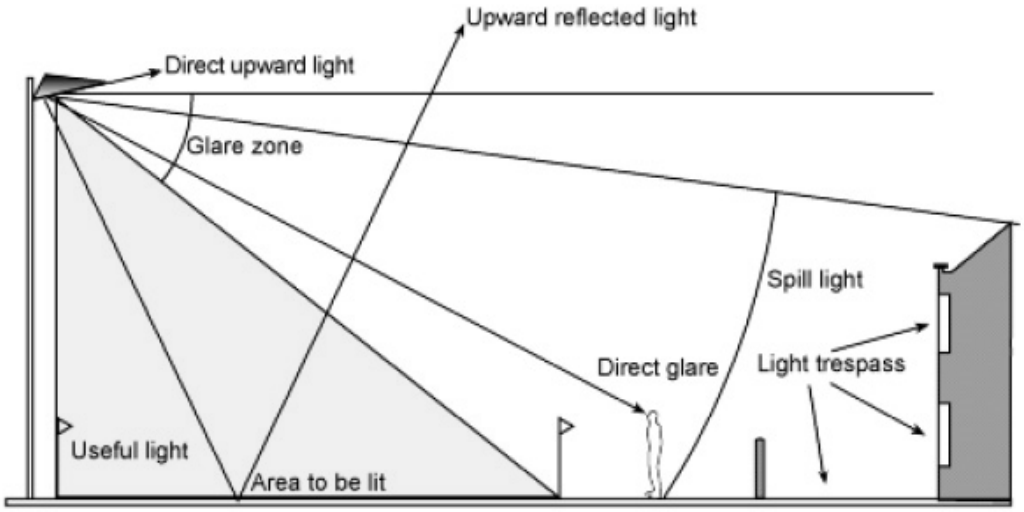


Fig. 1.6 Ejemplo de luz intrusa -Light trespass- (Lighting research center, 2010)

Otros estudios se orientaron en analizar las fuentes de luz y determinar el grado de contaminación de las mismas. Enfocándose en el análisis del tipo de luminarias y el estudio de tipo de longitud de onda de la lámpara. Tal es el caso de una investigación llevada a cabo en 1991 cuyo título es: "El efecto de la iluminación pública en la bóveda celeste". Las principales razones por la que existe la iluminación pública son por seguridad de tráfico, seguridad personal, confort y estética (Cunnan, 1991).

Un evento que queda para la historia de la divulgación de la contaminación lumínica ocurrió en julio de 1992, la UNESCO realizó la declaración de la reducción de los impactos ambientales adversos a la astronomía, en una exposición que tenía el mismo nombre. Fue realizada con el

apoyo de grupos como “La asociación internacional por un cielo oscuro” y astrónomos que veían un creciente problema afectando sus observaciones. Ha sido una manifestación de gran importancia para los investigadores de la contaminación lumínica.

En palabras textuales, esta declaración contiene lo siguiente (Anon. 1993):

“Nosotros los participantes de la Exposición IAU/ICSU/UNESCO sobre Impactos Ambientales Adversos a la Astronomía declaramos que el cielo nocturno, con sus hermosas estrellas y su mensaje acerca de nuestro lugar en el Universo, es un precioso tesoro de la humanidad, en el cual confiamos para nuestro conocimiento y compresión de nuestros orígenes y destino, y que la astronomía es una de las más fundamentales, apreciadas y accesibles de las ciencias.

Sin embargo, encontramos de la civilización que nutre nuestra ciencia está produciendo un entorno con una influencia negativa desesperadamente seria sobre la ciencia astronómica. Los cielos, que han sido, y siguen siendo, una inspiración para toda la humanidad, han sido dañados hasta el punto de ser desconocidos para las nuevas generaciones. Un elemento esencial de nuestra civilización y cultura está perdiéndose rápidamente y ésta pérdida afectará a todos los países del mundo.

Creemos que éste es un problema global que debe ser abordado por organizaciones intergubernamentales y, acordemente, solicitamos a la UNESCO y al ICSU (Consejo Internacional de Uniones Científicas) a emplear todos los medios disponibles para proveer asistencia a la astronomía; a preservar los sitios de los mejores observatorios astronómicos con la protección adicional de la designación como Patrimonio de la Humanidad; a instar a estados miembros a proveer protección legal a sus principales observatorios con el fin de preservar las condiciones naturales de observación; a instar a las agencias espaciales y al Comité de las Naciones Unidas para el Uso Pacífico del Espacio Exterior a lograr acuerdos en los niveles de desperdicios espaciales y buscar procedimientos factibles de remover esta amenaza a la observación astronómica; a instar a todas las organizaciones gubernamentales, intergubernamentales y no-gubernamentales cuyas actividades puedan afectar el ambiente astronómico a poner el mayor empeño en asegurar que el impacto de sus efectos sea mínimo y a perseguir la investigación de vías para la potencial protección legal a nivel internacional.”

Posteriormente, algunos astrónomos se aventuraron a analizar el nuevo problema con investigaciones íntimamente relacionadas con sus conocimientos de astronomía. Una de ellas fue la que realizaron Osterbrook y Martel (1992). Con este trabajo analizaron el espectro del cielo nocturno de 1988 y 1989 y lo compararon con el espectro que se pudo ver en al año de 1976,

guardado en archivos del observatorio de la universidad de California, examinando diferentes tipos de lámparas -fig. 1.7-. Por otra parte, Garstang (1992, 1993) después de haber dado a conocer su modelo internacionalmente reconocido, continuó publicando sobre el problema de la contaminación lumínica y la forma más conveniente de caracterizarlo y medirlo.

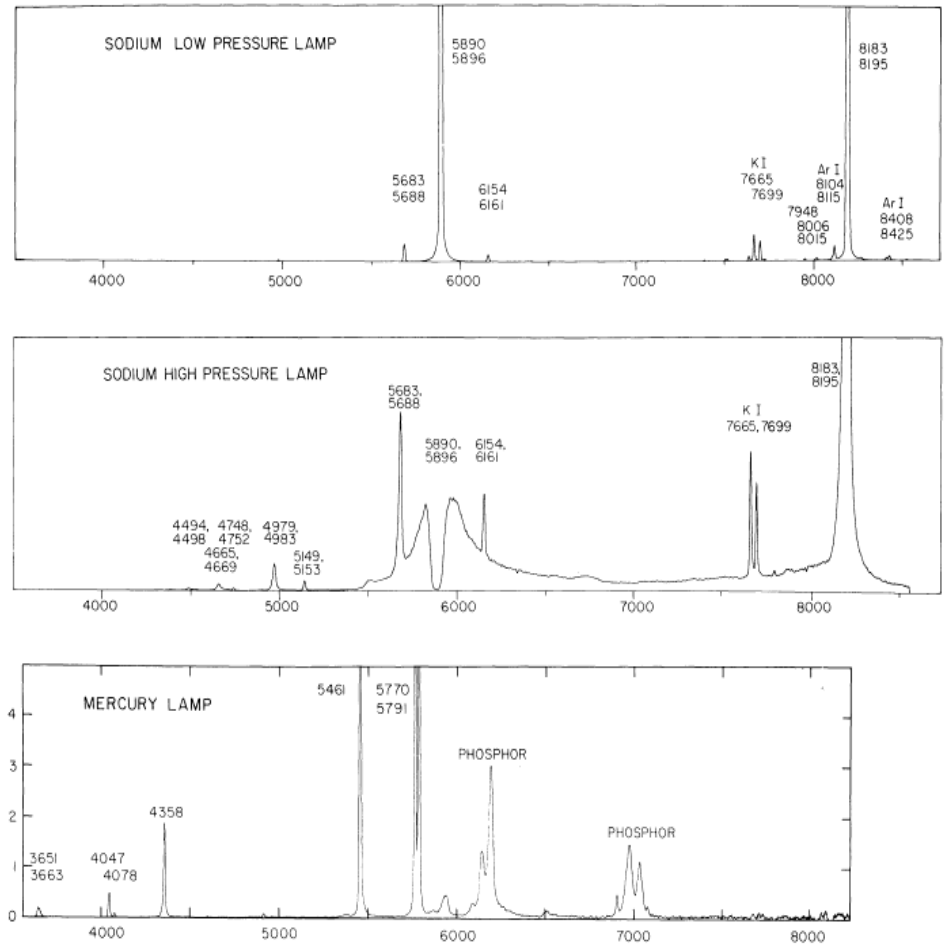


Fig. 1.7 El espectro relacionado con la contaminación lumínica de tres diferentes tipos de lámparas (Osterbrook & Martel 1992)

De esta manera, cada vez más investigadores se enfocaban en el problema –por lo general astrónomos- que, con el deseo de divulgar hacia más personas, publicaban artículos en donde incluían la explicación general del problema y daban propuestas para su mejoramiento. Di Sora (1993) publicó uno en Italia al respecto. Hablaba sobre una ley dedicada a la conservación de la energía y la lucha en contra de la contaminación lumínica.

Sin embargo, a pesar de que muchos investigadores analizaban el problema y lo exponían al público, seguía habiendo grandes dudas y faltas de entendimiento que los investigadores querían evitar. Es por eso que hubo importantes aportaciones enfocadas a la explicación clara del problema, dejando a un lado las expresiones matemáticas y los lenguajes tecnificados. Como un

artículo que presentó Crawford (1994) en una reunión de la asociación internacional del cielo obscuro, buscando explicar el problema de manera general y realizando propuestas sencillas de mejora. Siguió habiendo investigaciones al respecto que aparecían con títulos como "Diseccionando la contaminación lumínica". Artículo publicado en el mes de noviembre del año 1996 en la revista "Backyard Astronomy". Upgren (1996), el científico que realizó la investigación mencionada, habla acerca de los aspectos generales de la contaminación lumínica que pueden afectar las observaciones astronómicas.

Y los análisis del problema continuaban extendiéndose por todo el mundo. En Europa, podemos mencionar la que realizó Hanel (1997) en Alemania. Titulada "La situación de la contaminación lumínica en Alemania", aunque lo que hizo fue enfocarse en un pequeño pueblo de Alemania llamado Osnabruck. Tomó datos estadísticos y, con base en estos, realizó una evolución histórica del problema graficando los resultados y haciendo cotejos entre Alemania y EUA -fig.1.8-.

También Green (1997) realizó una correspondencia a la revista "el observatorio", que fue publicada porque en esta se encuentran muy buenas referencias del problema, y en donde agradece también el artículo que publicó Holmes (1997) quien realiza una caracterización de la iluminación de carreteras y recomendaciones de iluminancias estándar con lo cual se podrían evitar reflejos excesivos.

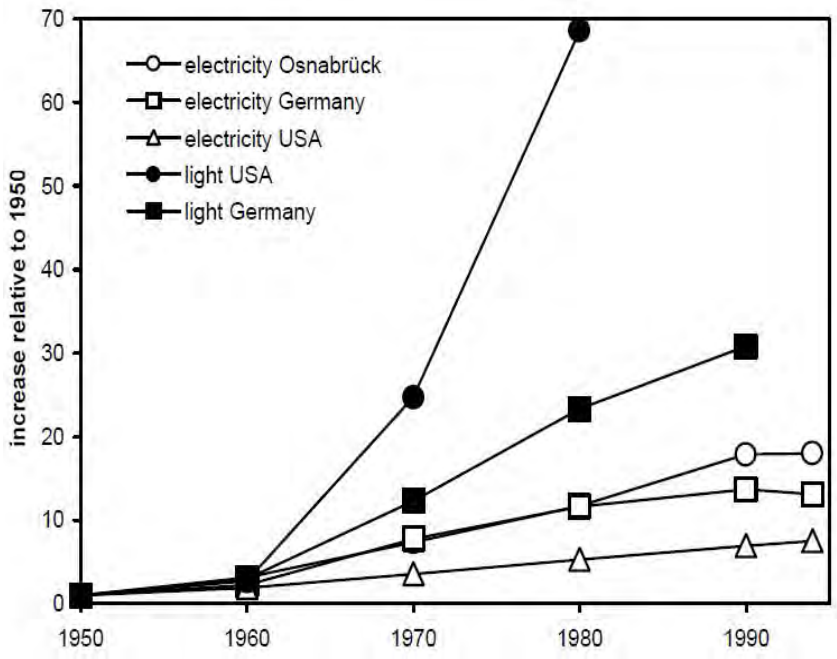


Fig. 1.8 Crecimiento de la electricidad y de la iluminación a través de los años (Hanel 1997)

Algo que ha sido muy usual para determinar el efecto de la contaminación lumínica de determinadas ciudades a los alrededores, ha sido el realizar comparaciones entre la ciudad

totalmente iluminada y la misma ciudad en los periodos de baja de iluminación pública. Iizuka e Isobe (1998) realizaron algo al respecto, utilizando un luminancímetro y fotografía fotométrica, en la ciudad de Kyoto en Japón. Un ejemplo de ello se puede observar en la fig. 1.9, en imágenes tomadas desde el parque Higashiyama Sancho.

Fig. 1.9 fotografías de Kyoto por la noche en periodos de baja y alta iluminación, respectivamente (Iizuka & Isobe 1998)

En 1998 apareció otro artículo en una reunión de la "comisión internacional por un cielo obscuro" publicado por Crawford (1998) –Investigador mencionado anteriormente en este apartado-. Básicamente, la investigación consistía en una explicación general del fenómeno con propuestas de mejora, con bastante similitud al que publicara en 1994, sin embargo en esta ocasión se comentaba acerca de los apartados de la comisión internacional de la iluminación (CIE) relacionados con la contaminación lumínica y se apoyaba de ellos para dar recomendaciones.

Las recomendaciones que proponían eran utilizar una buena iluminación con buenas luminarias, apagar la luz cuando no se necesite, utilizar controles de tiempo, minimizar los brillos excesivos, utilizar la cantidad correcta de luz por tarea y utilizar luces energéticamente eficientes. (Crawford, 1998).

En cuanto a tecnologías de luminarias, se han realizado esfuerzos para desarrollar luminarias que permitan una mejor distribución de la luz y por lo tanto disminuir la contaminación lumínica, de hecho actualmente es un requisito indispensable en los fabricantes de luminarias –recordando el certificado que emite la IDA (2010)-. Kawakami e Isobe (1998) realizaron un estudio fotométrico de diferentes luminarias utilizadas en alumbrado público en Japón, tomando en cuenta la distribución de la intensidad luminosa, basándose en requerimientos de la CIE. Fig. 1.10.

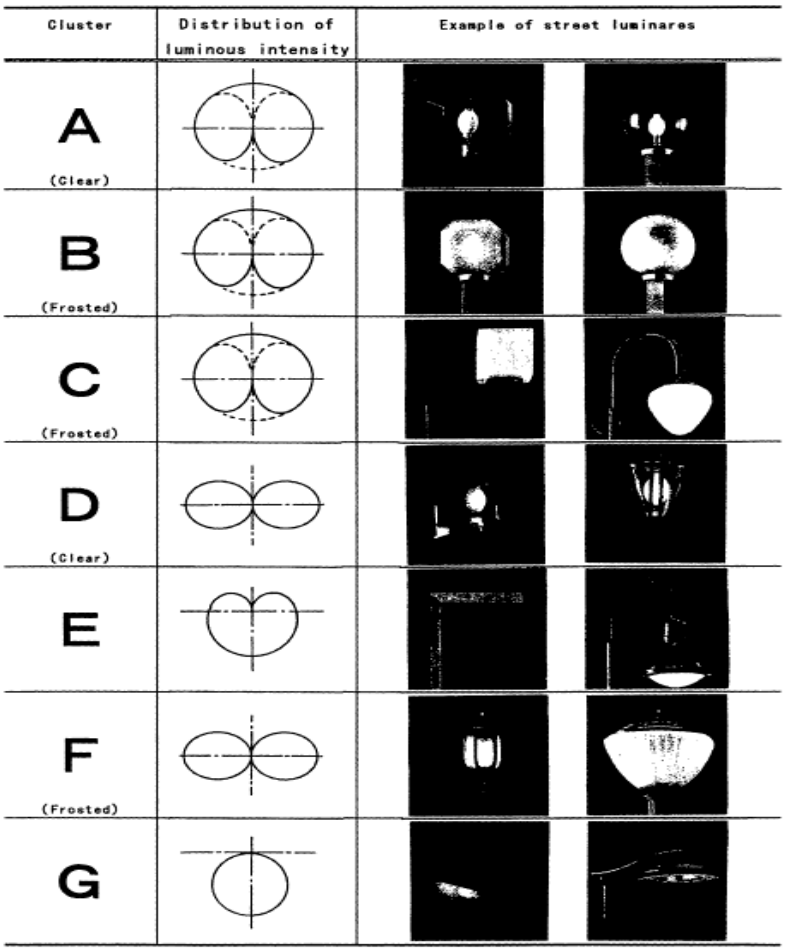


Fig. 1.10 Distribución de la intensidad luminosa de luminarias de alumbrado público utilizadas en Japón en 1998 (Kawakami & isobe 1998)

En España y, particularmente, en la comunidad en donde se realizó la mayor parte de ésta investigación, se puede mencionar la Ley certificada por el Gobierno de la Comunidad Autónoma de Cataluña. En Mayo de 2001 se aprobó una Ley reguladora de los aspectos del Alumbrado que afectan a la Contaminación Lumínica (San Martín, 2001).

Los estudios más aceptados en cuanto a visión de la contaminación lumínica se han llevado a cabo por Cinzano, Falchi y Elvidge (2001). En el año 2001 publicaron “The first world atlas of the artificial night sky brightness”-el primer atlas mundial de la iluminación artificial nocturna del cielo-. Este atlas fue elaborado por medio de mediciones satelitales y en el podemos observar cualquier parte de nuestro planeta y la influencia que la luz ejerce en el. Las intensidades se reconocen por medio de colores.

Y continuando con investigadores astrofísicos, Antaramián (2001) utilizó la fórmula empírica de Merle Walker, conocida como la ley de Walker, para estimar la contaminación por la luz de las ciudades cercanas a Michoacán, México. Esta ley permite estimar el brillo del cielo en un sitio de

observación viendo con un ángulo de 45" del cenit hacia un centro urbano a "r" kilómetros de distancia. Con este trabajo se determinaron las diferentes distancias a las cuales es recomendable instalar telescopios de observación astronómica. Otra investigación similar fue realizada por el "Observatorio y planetario Copernicus" de Brno, en la República Checa, Hollan (2002) realizó un programa Pascal para cuantificar la contaminación lumínica tomando en cuenta los datos fotométricos de las luminarias utilizadas.

En el mismo año, 2002, se realizó un importante congreso sobre contaminación lumínica en la Serena, Chile, cuyo nombre fue "La contaminación lumínica, una visión global" –título original en idioma inglés- El congreso fue llevado a cabo principalmente por astrónomos interesados en preservar las noches de Chile –que posee uno de los mejores espacios de visión astronómica a nivel mundial y en donde se encuentran importantes observatorios de Europa y de Estados Unidos de Norteamérica-, sin embargo se tocaron temas diversos, incluyendo los relacionados con efectos ecológicos de la contaminación lumínica, reglamentos y, por supuesto, los efectos en la visión astronómica.

En España también se habían tomado los primeros pasos en el aspecto de regulación. San Martin (2003); que fue de los primeros investigadores en España que se enfocaron en el estudio del problema, publicó el articulo "Contaminación lumínica en España: Un problema ambiental en la sociedad de desarrollo" en la revista "Energía en acción" de la dirección de conservación de la energía. En el artículo se habla acerca de los principales problemas de la contaminación lumínica: Problemas en los seres humanos, plantas y animales; derroche energético y en la astronomía. También se dan algunos consejos para disminuirla**.**

La preocupación de la comunidad astrónoma aun sigue pie, así se puede ver por investigaciones recientes. En 2004, el instituto de astrofísica de canarias realizó una serie de recomendaciones para la iluminación de instalaciones de exteriores o en recintos abiertos. En ellas se establecen diferentes parámetros a tomar en cuenta para preservar de manera correcta la vida nocturna, se incluyen recomendaciones para flora y fauna, parques, carreteras, luz intrusa, entre otros. (Anon. 2004). En Inglaterra también se ha pensado en establecer un reglamento acorde a las necesidades de los astrónomos. Baddiley (2004), miembro de la asociación astronómica de gran Bretaña; realizó una serie de predicciones en las cuales se podía observar el aumento de la contaminación lumínica a través de los años, en caso de que no se tomaran medidas de regulación.

Aunque las Investigaciones técnicas de la afectación de la contaminación lumínica en la biodiversidad, tienen poco tiempo de estarse realizando. Longcore y Rich (2004) llevaron a cabo una serie de investigaciones en donde ponían de manifiesto la grave alteración de la

contaminación lumínica a la biodiversidad. La recopilación se tituló “Ecological Light Pollution” – Contaminacion lumínica ecológica-, y se enfoca en determinadas especies de mamíferos, aves y plantas. Posterior a estas vendrían más, de similar importancia. De nuevo volviendo al ámbito de visión, no se puede dejar de mencionar a Cinzano, Falchi y Elvidge (2007), Publicaron “The Recent progresses on a second world atlas of the night-sky brightness”, en el informan de mejorar el primer atlas, realizado por ellos mismos en el año 2001 -que se puede observar en la fig. 1.11-, utilizando instrumentos de última tecnología**.**

Fig. 1.11 Atlas nocturno mundial. (Cinzano, Falchi & Elvidge 2001)

Y en cuanto a desarrollo y diseño de tecnología de iluminación artificial basada en la reducción de la contaminación lumínica, se puede mencionar un invento, patentado hace pocos meses, llevado a cabo por XU (2007) del guangzhou energy institute conversión chinese (guan-n) Se inventó una película de cristal para luminaria que reduce la contaminación lumínica. La invención proporciona una cubierta de estructura de cristal que evita los efectos contaminantes; se cubre una capa del cristal con óxido de metal, como película conductora transparente, con el índice de refracción dentro de 1.7 y 2.2 en la longitud de onda de 555 nm y se utiliza una película óptica que evita los antirreflejos con el índice de refracción dentro de 1.2 y de 1.8 en la longitud de onda de 550 nm. Éste artefacto puede reducir la reflectividad lumínica visible hasta el 6% más que un cristal común, es de bajo costo, tiene características anticorrosión y una buena durabilidad.

Herranz (2007) presidente de Cel Fosc -asociación contra la contaminación lumínica-, publica un artículo en donde habla, de manera general, de los aspectos que involucran el fenómeno de la contaminación lumínica. Cabe destacar que el artículo empieza con una parte de la declaración de la reducción de los impactos ambientales adversos a la astronomía de “la asociación por un cielo oscuro”, que ya se mencionó anteriormente en éste apartado.

Actualmente, continúa habiendo astrónomos que realizan sus investigaciones en materia de contaminación lumínica. Tal es el caso del Departamento de física, ingeniería física y astronomía de Queens, que en el 2007 publicó un artículo de nombre “Preservando la noche estrellada”; o el caso de Benn y Ellison (1999), que publicaron su artículo llamado “La palma y el brillo del cielo nocturno”. Irwin y Bridges (2008), del departamento de física, ingeniería física y astronomía de Queens, se enfocan en el observatorio de Queens y realizan un exhaustivo análisis de todos los focos de contaminación que pudieran estarlo afectando Benn y Ellison (1999) concentraron sus esfuerzos en el observatorio de La palma tomando datos históricos de mediciones de la bóveda celeste nocturna realizadas entre 1987 y 1996 con el objetivo de analizar la evolución de la contaminación lumínica.

Asimismo, en el año 2010, el día 27 de marzo, y con motivo de un evento llamado “la hora del planeta”, se apagaron a la misma hora monumentos y edificios que normalmente están adornados con iluminación artificial por la noche. Esto con motivo de generar una concientización de ahorro de energía. Evento que aprovecharon algunos activistas de la contaminación lumínica para tomar fotografías del antes y después, y que evidenciaron la cantidad de contaminación lumínica que aportan dichos edificios -fig. 1.12-. (World Wildlife Fund, 2010).

Fig. 1.12 Algunas imágenes tomadas en “la hora del planeta” (World Wildlife Fund 2010)

Cada vez existen más artículos relacionados a la contaminación lumínica, investigadores que tratan el problema y más personas que conocen su efecto negativo. Un aspecto importante que exponen la mayoría de los investigadores, es que es necesario que más personas conozcan el

problema, las causas negativas y la manera de evitarlo. No es necesario suprimir la totalidad de la iluminación artificial, lo que se requiere es un buena gestión y un buen desarrollo de los sistemas lumínicos artificiales.

1.2. El efecto de la contaminación lumínica en la variación de condiciones nocturnas de espacios naturales

En un principio el ser humano empezó a conocer el problema de la contaminación lumínica cuando se dio cuenta que, por un exceso de luz artificial enviada hacia la bóveda celeste, era difícil realizar las observaciones astronómicas habituales.

Fig. 1.13 Diferencia entre un cielo oscuro y el mismo con contaminación lumínica, en un parque natural. (IDA 2009)

Por lo tanto se puede decir que los astrónomos fueron de los primeros investigadores en percatarse de éste grave problema. Posteriormente, numerosos científicos unieron esfuerzos para determinar el efecto de la contaminación lumínica en la variación de condiciones nocturnas en espacios naturales. Ha habido investigaciones relevantes en materia de contaminación lumínica y su relación en la variación de condiciones nocturnas de espacios naturales, principalmente por biólogos, sin embargo estas comenzaron años después de las investigaciones llevadas a cabos por astrónomos. No se puede dejar de mencionar de nuevo a la asociación internacional por un cielo oscuro realizada en el año 1988, la cual se originó por astrónomos que se vieron afectados en sus observaciones nocturnas. Últimamente también se han levantado otras preocupaciones en la organización. Por ejemplo, los animales nocturnos pueden ser dañados por la contaminación lumínica. La actividad principal de la asociación internacional por un cielo oscuro es animar el

uso correcto de las luces artificiales, es decir, poco o nada de luz hacia arriba, en áreas públicas y animar generalmente a comunidades que adopten regulaciones de iluminación.

Fig. 1.14 Bosque afectado por la contaminación lumínica (Conner, 2001)

En España, en el año 1998, salió publicado un artículo llamado "La problemática de la contaminación lumínica en la conservación de la biodiversidad" por Dolsa y Albarrán (1998), que han sido de los científicos entomólogos que más han estudiado sobre el efecto de la iluminación artificial nocturna en la biodiversidad y principalmente en los insectos –su rama de especialidad-. En él artículo mencionado se explica como la iluminación artificial está afectando a muchos animales terrestres de Cataluña; se mencionan algunos insectos, lepidópteros y aves, y se manifiesta la parte del espectro electromagnético que más les afecta.

En Francia también ha habido una gran preocupación por estudiar la afectación de la contaminación lumínica en la flora y en la fauna nocturna. En Raevel y Lamiot (1998), realizaron un compendio de la afectación de la iluminación artificial nocturna en diferentes especies de Francia. Se enfocaron en describir los efectos sobre anfibios, anguilas, peces y pájaros.

Las aves se ven seriamente afectadas en sus vuelos al toparse con la barrera visual de la contaminación lumínica. Así fue demostrado por Bruderer, Dieter y Steuri (1999); al realizar una investigación con la que analizan el comportamiento de las aves migratorias expuestas a un radar en banda x y a un haz luminoso brillante. Comprobaron que, al toparse con el resplandor de la barrera de luz, las aves sufren variaciones en su trayectoria y en la velocidad de desplazamiento.

La contaminación lumínica no solo afecta a la biodiversidad terrestre, también afecta de manera negativa a muchas especies marinas. Se han realizado estudios interesantes en especies marinas que contemplan una migración vertical diaria –un tipo de migración que realizan algunos organismos que habitan en zonas fóticas del océano-. Gal et al (1999) llevaron a cabo un estudio

de la cantidad de iluminación ambiente que debería tener el crustáceo *Mysis relicta*, para llevar a cabo la migración diaria. Con un exceso de iluminación se causaría un desequilibrio en el proceso de migración (Gal et al 1999).

También ha sido comprobado en otras especies con una investigación realizada por Moore et al. (2000). Con este trabajo se demostró que la contaminación lumínica urbana altera la migración vertical diaria del daphnia –crustáceos de pequeño tamaño conocidos como pulgas de agua-. Probaron que la contaminación lumínica no sólo sirve como la señal próxima que acciona la subida del zooplankton, sino que también reduce la amplitud de migración si los niveles son suficientemente altos en la noche. Por ejemplo, la luz de una luna llena reduce la amplitud del daphnia, es de suponer que luces más intensas provocan desequilibrios en los desarrollos naturales de la especie mencionada. Se demostraron las hipótesis de que la contaminación lumínica asociada a áreas urbanas reduce la amplitud y la magnitud de migración del zooplancton (Moore et al 2000).

Posteriormente vinieron divulgaciones de igual o más importancia. Podemos mencionar los congresos en donde se exponen temas que traten la afectación de la contaminación lumínica en la biodiversidad, aunque también es necesario mencionar que tienen poco tiempo de estarse realizando. El primer simposio se llevo a cabo del 22 de septiembre al 24 de septiembre de 2003, con el nombre de "ECOLOGY OF THE NIGHT", en el Leslie M. Frost Natural Resources Centre de Dorset, Ontario. En éste se trató la importancia de preservar el medio nocturno natural, tomando las medidas necesarias como la buena gestión del alumbrado artificial. También se trataron temas relacionados con el interés que ha despertado, en biólogos de todo el mundo, la afectación de la contaminación lumínica a la biodiversidad. Ya que los investigadores están observando el grave desequilibrio que esto genera. En dicho congreso también se introdujo por primera vez la palabra "Escotobiología" con una campaña para darla a conocer -fig. 1.15-, que ellos mencionaron como "el estudio de la obscuridad como soporte de vida".

Fig. 1.15 Imagen de campaña de introducción de la palabra "escotobiología" por los estudiosos de la influencia de la contaminación lumínica en los seres vivos (Muskoka heritage foundation 2008)

En ese mismo año se mostró otra investigación que involucraba a la biodiversidad y a la contaminación lumínica. Bird, Branch, y Millar (2003) estudiaron los efectos de la iluminación costera en el comportamiento de alimentación de los ratones de playa. Se encontró que los

ratones tenían una gran dificultad para conseguir forraje en condiciones bajo lumínicas adversas. Se enfocaron en el efecto que podían causar las lámparas de vapor de sodio a baja presión debido a que por lo general se usan este tipo para impedir la afectación en tortugas e insectos. Los resultados demostraron que la luz artificial afecta el comportamiento de especies terrestres en áreas costeras y que la polución por luz merece mayor consideración en la planificación de la conservación. Las investigaciones enfocadas a especies específicas se fueron realizando cada vez en mayor medida. En el año Longcore y Rich (2004) publicaron un artículo llamado "Ecological Light Pollution" cuya portada se observa en la fig. 1.16, en este artículo se habla, de manera general, del problema que se tiene al no controlar la iluminación artificial nocturna. Posteriormente sería la introducción de un libro que en el año 2006 publicarían ellos mismos.

Fig. 1.16 La luz artificial y su influencia en la variación de condiciones nocturnas naturales. (Longcore & Rich 2004)

Es por todos conocidos que las ranas son de frecuente comportamiento nocturno, Baker y Richardson (2006) publicaron un artículo relacionado con dichos anfibios. Con éste trabajo presentaban una investigación que realizaron con el objetivo de comprobar el efecto de la luz artificial en el comportamiento masculino de ranas verdes. Los resultados demostraron claramente que el comportamiento de la rana verde masculina es afectado por la presencia de la luz artificial, y que por lo tanto se tiene un alto potencial de reducir las tasas de incorporación a los grupos y de afectar así la dinámica de la población.

Volviendo con Rich y Longcore (2006), quienes por cierto se pueden señalar como los investigadores que más se han preocupado por el efecto de la contaminación lumínica en la biodiversidad, consiguen publicar un libro con una recopilación de investigaciones acerca de las consecuencias ecológicas de la iluminación artificial nocturna. Los artículos divulgados en dicho

libro han representado una gran importancia para los biólogos en investigadores interesados en el problema. Se presenta una investigación sobre los efectos de la luz artificial nocturna en los mamíferos terrestres. Beier (2006) explica como existen innumerables mamíferos de costumbres nocturnas que se ven seriamente afectados por el exceso de luz y trata temas de anatomía, sociología y comportamiento ante este tipo de situaciones.

Del mismo modo, Rydell (2006) realiza un trabajo para demostrar como los murciélagos tienen que modificar sus hábitos para poder encontrar los insectos que le sirven de alimento. Explica como los murciélagos se aprovechan de la atracción que sufren los insectos por la iluminación artificial para posteriormente dirigirse hacia las luminarias y conseguir su alimento. De esta manera se expone el desequilibrio que está generando en las poblaciones de insectos y murciélagos, y el cambio de hábitos que se deben tener para adaptarse a tales circunstancias.

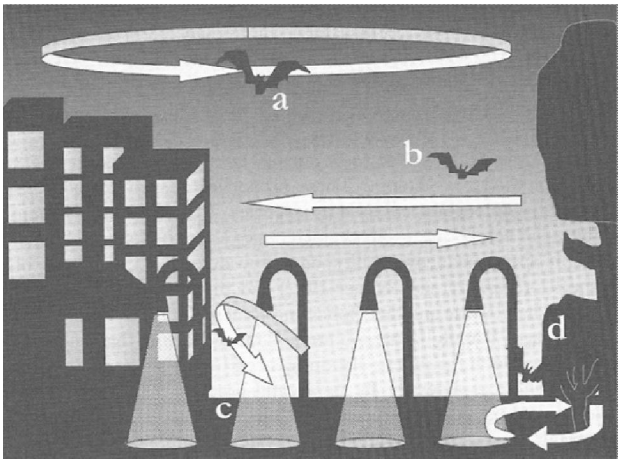


Fig. 1.17 Esquema del efecto de la iluminación artificial nocturna en murciélagos (Rydell 2006)

Ya ha sido expuesto que las aves también se ven afectadas por el problema, Gauthreaux Jr. y Belser (2006) lo corroboran con una investigación sobre los efectos de la luz artificial en la migración de aves. Hablan de los mecanismos que hacen que las aves sean atraídas por la luz artificial, los tipos de fuentes que más las afectan y cómo influyen los hongos luminosos de las fuentes contaminantes en la desorientación que sufren en las migraciones. Montevecchi (2006) también se enfoca en las aves, investiga las influencias de la iluminación artificial en los pájaros marinos. Su trabajo se concentra en las fuentes de luz artificial dentro del medio ambiente marino, como los faros, fig.1.18. De la misma manera, da recomendaciones acerca de cómo se pueden reducir los efectos de la luz artificial en las aves marinas. Otra investigación sobre las aves la realizaron. De Molenaar, Sanders y Jonkers (2006) que trabajaron sobre la iluminación de carreteras y su influencia en las aves. Hablan del efecto de la luz artificial en la fisiología y comportamiento espacial. Y como representa una grave Influencia en los biorritmos de las aves.

Fig. 1.18 Efecto de los faros en la migración nocturna de aves (Montevecchi 2006)

Y dentro del ambiente de animales marinos, también encontramos que son afectados por la iluminación artificial nocturna, Salmon (2006) se enfoca en dar recomendaciones para proteger las tortugas marinas de la luz artificial nocturna en las playas de Florida. Perry y Fisher (2006) trabajaron conjuntamente para explicar los efectos potenciales que se observaron al estudiar la relación entre las luces de noche y los reptiles.

Continuando con anfibios, se exponen algunos problemas que sufren por la iluminación mal gestionada, Buchanan (2006) observó los efectos potenciales de la iluminación artificial nocturna en anfibios como ranas y sapos. Wise y Buchanan (2006) –Buchanan ya había realizado investigaciones de la influencia de la contaminación lumínica en anfibios- muestran un artículo sobre la influencia de la iluminación artificial en el comportamiento nocturno y la fisiología de las salamandras. Explican como la iluminación artificial ha causado un grave desequilibrio en el proceder y los hábitos de estos anfibios. Asimismo Nithingale, Longcore y Simenstad (2006) establecen la relación que existe entre la iluminación artificial nocturna y los peces. Hablan acerca de la fisiología de estos organismos marinos, de los mecanismos que hacen que respondan ante la iluminación y de cómo representa una grave influencia en su medio ambiente natural. Recordando que Longcore fue uno de los recopiladores del libro.

Por su parte Eisenbeis (2006) Investiga la relación que existe entre la iluminación artificial nocturna y los insectos. Se enfoca específicamente en una población rural alemana en donde una gran diversidad de insectos están siendo atraídos por las luminarias de calle. Siguiendo con los insectos Lloyd (2006) se concentra en investigar la influencia de la luz artificial en las luciérnagas. Manifiesta que la iluminación puedes ser un grave problema de desorientación y desequilibrio en su medio ambiente natural.

Las plantas también son fotosensibles, así lo demuestra Briggs (2006), que realiza un interesante trabajo en donde describe la fisiología de las plantas y su respuesta a la iluminación artificial. Habla acerca de los fotoreceptores que reaccionan ante la iluminación y como el hecho de contar con excesiva iluminación artificial nocturna, genera un desequilibrio en sus características naturales. Estos son, en resumen, las investigaciones publicadas en el libro. Consideramos importante mencionar debido a que representa un compendio sumamente importante de la investigación del efecto de la contaminación lumínica en la biodiversidad.

Fig. 1.19 Miles de efemerópteros muertos a causa de una luz de seguridad (Rich y Longcore 2006)

Al mismo tiempo, en otras partes del mundo se seguían divulgando trabajos relacionados. Podemos mencionar a Raine el al (2007), publicaron un artículo que investigaba los efectos de la contaminación lumínica en especies de aves de la isla de Malta. En su artículo no solo exponen las causas y los problemas que origina el exceso de luz artificial nocturna, sino que proponen una serie de soluciones que podrían disminuir y evitar el problema. Las principales soluciones se enfocan en una adecuada gestión de la iluminación artificial de la isla, principalmente en hoteles. Asimismo se seguían publicando investigaciones que concientizaran a más personas sobre el problema de la contaminación lumínica y su efecto en los espacios naturales, debido a que un se tienen dudas al respecto. También en 2007 se realizó una disertación para explicar el problema de la contaminaron lumínica en Puerto Rico, exposición a cargo de Laboy (2007). Se hizo gran hincapié en el problema que representa para la biodiversidad afectada.

Y aun actualmente se realizan esfuerzos para correlacionar lo efectos de la iluminación artificial nocturna y en los espacios naturales. Por ejemplo las investigaciones que exponen los problemas que sufren las aves en sus migraciones. Así lo podemos comprobar con artículos como el que publicaron, en el mes de mayo de, 2008 Larkin y Szafoni (2008). El artículo se tituló “Evidencia de dispersión de aves que emigran juntas por la noche”. La investigación se enfoca en los grupos de aves migratorias, llamadas parvadas que, a pesar de estar dispersas por más de 100 metros,

siguen manteniendo la unidad de la parvada. Sin embargo, Larkin y Szafoni (2008), se encuentran con que en ocasiones existen algunos elementos que logran una dispersión que divide la parvada en varias. Entre esos elementos se encuentran las estructuras luminosas, las ciudades y la iluminación de carreteras.

1.3. El efecto de la contaminación lumínica en la astronomía

Como ya se mencionó anteriormente, se tiene la certeza de que los investigadores de la astronomía fueron los primeros en abordar y analizar el problema de la contaminación lumínica. Después de ver ese molesto brillo generado por la iluminación artificial, posado por encima de las ciudades y alrededores y que impedía la correcta observación de los astros, decidieron unir esfuerzos y proponer opciones de mejora. Uno de las primeras investigaciones fue realizada por Hoag (1972), que hablaba sobre el efecto de las luces de las ciudades en las observaciones astronómicas. Otra similar llevada a cabo por Riegel (1973) en donde exponía un problema que estaba creciendo aceleradamente y donde se proponían los primeros consejos sobre caracterizaciones del problema, como un monitoreo de la contaminación lumínica en función de la onda, el tiempo y el sitio. En los primeros estudios sobre contaminación lumínica, los astrónomos objetaban que no todas las lámparas contaminan igual. Cada tipo de lámpara tiene una disposición espectral especifica, además la longitud de onda es por lo tanto diferente. Así se expuso en una investigación realizada por Fletcher y Crampton (1973), en donde se compararon las lámparas de vapor de sodio con las de mercurio determinándose la intensidad de las distribuciones espectrales y la manera en que estas contaminan. Gráfico en la fig. 1.20.

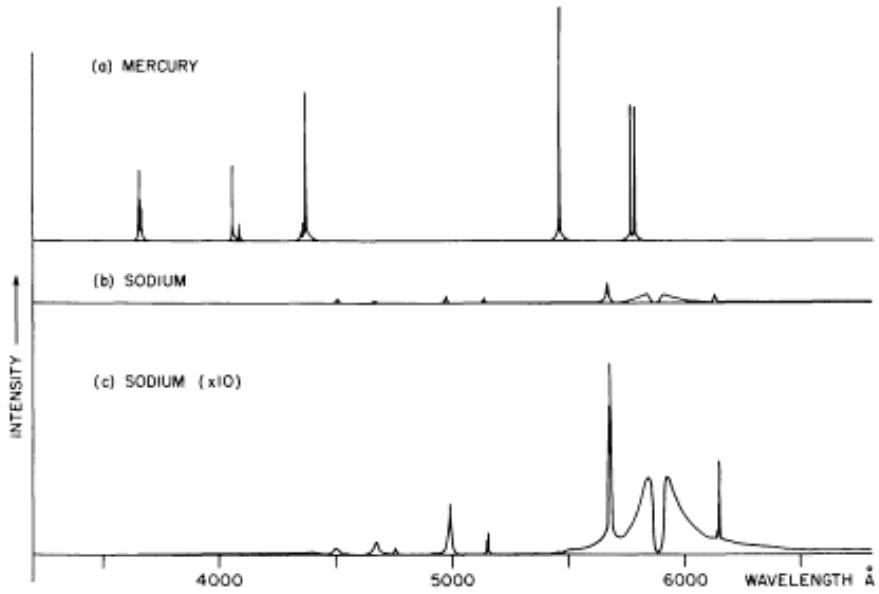


Fig. 1.20 Comparaciones de las intensidades entre la lámpara de mercurio y la lámpara de sodio dependiendo de la longitud de onda (Fletcher & Crampton 1973)

Y subsiguiente a esta investigación, se empezaron a realizar investigaciones enfocadas a crear modelos astrofísicos que se enfocaran en el problema. Walker (1970, 1977b) fue de los primeros astrónomos en realizar estudios de contaminación lumínica al respecto, posteriormente apoyaría la caracterización de la contaminación lumínica de observatorios específicos y en la identificación de sitios potenciales para localización de observatorios (Walker 1976, 1977a, 1984) (Walker y Cayrel 1979). Como el que se realizó en el observatorio del Monte Hamilton (EEUU), en el que se determinó el incremento de la contaminación lumínica por asentamientos de San José y el Valle de Santa clara -urbanizaciones del estado de California, EEUU-. (Osterbrock, Walker y Koski 1976). Anteriormente habían participado otros investigadores como Kalinowski, Roosen, y Brandt (1975) que determinaron la cantidad de brillo nocturno del observatorio de McDonald (EEUU) utilizando mediciones de fotómetros fotoeléctricos. Después de ellos Hoag (1976), realizó un monitoreo, apoyándose en fotografías, de la contaminación lumínica que afectaba al observatorio "Kitt peak" en Tucson, EUA. De la investigación surgió uno de los primeros mapas nocturnos que se conoce, véase fig. 1.21.

Continuando con Walker (1979) con la ayuda de Cayrel (1979), presentó un artículo en donde se identificaban y proponían a protección, observatorios astronómicos existentes y potenciales en Estados Unidos de Norteamérica. El estudio fue motivado tomando en cuenta el efecto negativo que estaba causando la contaminación atmosférica y la radiación electromagnética. Se presentaba una comisión encargada de identificar los sitios y proponer estrategias de preservación, Walker (1979) fungía como presidente y Cayrel (1979) como vicepresidente. La comisión mencionada consistiría en un comité organizado formado por investigadores, por miembros de los observatorios astronómicos del país y por representantes nacionales. Y en ese mismo año, Schneeberger, Worden y Beckers, (1979) presentaron un estudio realizado en el Observatorio Peak de Sacramento (EEUU) en donde determinaban las condiciones de contaminación lumínica que presentaba. Se mostraron los resultados en Arcosegundos.

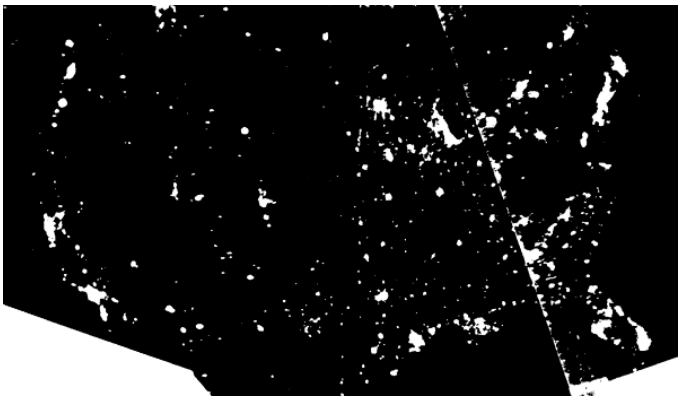


Fig. 1.21 Uno de los primeros atlas nocturnos, en este ejemplo de EUA. Hoag (1976).

En 1982 de nuevo se realiza una identificación y protección de los observatorios astronómicos existentes en el planeta, esta vez a cargo de Smith (1982a, 1982b). Y que tiempo después realizaría Van der Bergh (1987. 1988).

Posteriormente entro a la escena Garstang (1984), que ha sido de los investigadores que mayores aportaciones ha hecho al fenómeno de la contaminación lumínica. Principalmente, sus estudios se enfocan en la medición de la iluminación artificial, producida por las ciudades en la noche, a ciertos puntos de las ciudades. El primer estudio lo realizo en 1984, en donde proponía mejorar las fórmulas de Treanor (1976) y Berry (1976). Garstang continuó con publicaciones que aportaban perspectivas nuevas del problema. En uno de ellos investiga las magnitudes límite de visibilidad de las estrellas con luz de día (Garstang 1985b). En otro de ellos investigó el brillo del cielo nocturno en la ciudad de Denver, en los Estados unidos de Norteamérica, en comparación con la luna llena. (Garstang 1985a). Sin embargo, no fue hasta un año después que publicó la que fuera quizá su más importante aportación al entendimiento del fenómeno de la contaminación lumínica, el modelo para la iluminación artificial de noche -explicado con detalle en el apartado de estado del arte de este trabajo-. (Garstang 1984, 1986).

Hoag (1985,1986) que ya había hecho una labor exhaustiva sobre el problema desde la publicación sobre la investigación de luces de ciudad (Hoag, 1986), realizó algo que ya habían hecho otros investigadores en otros tiempos como Walker (1976); llevó a cabo una identificación de puntos de observatorios potenciales basándose en la afectación que pudiera haber debido a la contaminación lumínica circundante a los puntos. Investigación muy similar a la que realizaron Murdin y Sanchez (1987) enfocándose en el área de observatorios de Canarias.

Asimismo, Louistisserand et al (1988) utilizaron un espectrógrafo para caracterizar el espectro óptico del cielo nocturno en observatorios de grandes altitudes, enfocándose en el observatorio del pic du midi -2850 msnm- en Francia e incluyéndose la luz proveniente de las ciudades cercanas.

Aunque las investigaciones hasta el momento se enfocaban solo en las observaciones astronómicas en el espectro visible, por eso Lindley (1988) realizó un análisis del efecto de la contaminación lumínica en la radioastronomía. Los radio telescopios llevan a cabo los análisis captando ondas de radio, por lo general a través de una antena parabólica o conjunto de ellas, y procesando las ondas para generar esquemas e imágenes. Al respecto Lindley (1988) argumentaba que aunque los esfuerzos en ese campo eran menores, la solución debería ser la misma que para los observatorios astronómicos de espectro visible.

Fig. 1.22 Observatorio nacional de radioastronomía (NRAO 2009)

Garstang (1988) continúo con sus valiosas aportaciones y con investigaciones que le contribuían a mejorar su modelo. En el año 1988 realizó una investigación con la que buscaba un modelo que predijera la contaminación lumínica y sus variaciones estacionales. Lo que hizo fue introducir un nuevo modelo de tratamiento de la atmósfera. El modelo tomaba en cuenta la extinción por aerosoles y por moléculas, incluso polvo y vapor de agua, pero cada uno con su respectiva escala de alturas.

Posteriormente apareció Crawford (1990), que fue un investigador que contribuyó de manera activa al entendimiento del problema de la contaminación lumínica como efecto en las observaciones astronómicas. Crawford se enfocó en describir los problemas a los que se enfrentan los astrónomos por el crecimiento de la contaminación lumínica y en dar recomendaciones examinando las diferentes fuentes de luz. Ese mismo año Massey, Gronwall y Pilachowski (1990) utilizaron espectrofotometría para analizar la noche nocturna en el observatorio de Kitt peak (EEUU), dividiendo la información por contribución de componentes atmosféricos a la visibilidad.

En 1981 se realizó un estudio en monte palomar relacionado con la contaminación lumínica. Monte palomar se localiza en San Diego California. Por sus características de altitud y orografía, se ha utilizado como lugar de observación astronómica desde 1934. El estudio referenciado trata sobre un análisis realizado al crecimiento de la población en el sur de California y su efecto en el medio ambiente del observatorio. También realizan una serie de consejos a tomar en cuenta para evitar que la contaminación lumínica afecte las observaciones, dividiendo los tipos de contaminación lumínica y las fuentes de donde proviene. (Brucato, 1991).

Fig. 1.23 Contaminación lumínica en el monte palomar (Caltech 2009)

Los astrónomos aficionados, que también se veían afectados por la contaminación lumínica, continúan con su preocupación al respecto. Una importante investigación llevada a cabo por astrónomos amateurs fue realizada por el museo nacional del aire y el espacio de Washington, EUA, en 1991. El estudio ponía en conocimiento el hecho que de que muchos astrónomos hayan cambiado sus hábitos de observación debido a la contaminación lumínica. La investigación determinó que el cambio de hábitos se veía reflejado en los instrumentos que los astrónomos amateurs debían usar y en el hecho de que se tenía como pasatiempo la búsqueda de los mejores lugares obscuros propicios para las observaciones. (Chester, J. 1991). En ese mismo año se localizaban tres importantes observatorios astronómicos en México. Al respecto apareció un artículo que hablaba de los tres observatorios y los problemas de contaminación cercanos a los mismos. La investigación estuvo a cargo de Costero (1991), que realizó un desarrollo para cada uno de los observatorios, incluyendo las características de los telescopios e instrumentos que los conformaban, y se determinaron los pueblos cercanos o focos de contaminación que pudieran estarlos afectando.

También en el mismo año en China se realizaban investigaciones similares, Jiang (1991) realizó un compendio de las situaciones medioambientales que rodeaban a los observatorios en el país, incluyendo la contaminación lumínica. Concluyó que la contaminación atmosférica acrecentaba la lumínica en muchos observatorios de China y se recomendaba realizar la caracterización de la meseta Tibetana, que tiene menos población, como opción a futuro para localización de observatorios astronómicos. Y continuando con 1991, año en el que al parecer aparecieron muy buenas aportaciones al entendimiento del problema realizadas por astrónomos. Garstang (1991), que ya fue mencionado anteriormente, realizó un compendio de los modelos que existían hasta la fecha. Incluyendo las aplicaciones prácticas que cada uno de ellos tuvo. Por otra parte, Sperling

(1991), en su disertación “la desaparición de la obscuridad”, realizó recomendaciones para el diseño de una nueva luminaria que permitiera menos desperdicio de luz y menos contaminación lumínica. En el siguiente año Murdin (1992), que ya había colaborado en el estudio de la afectación de la contaminación lumínica a los observatorios de Canarias, desarrolló una investigación en EUA para determinar las ordenanzas y reglamentos que involucraban la protección de observatorios en el país. Destaca la importancia de enfocarse no solo en los observatorios ópticos, sino también los radiotelescopios. Aunque determina que el esfuerzo debe ser mayor es ese aspecto, debido a que las ondas de radios aun no están del todo legisladas (Murdin, 1992).

Dos años después, en el año de 1993, surgió un estudio llevado a cabo por Bruni (1993), un astrónomo amateur. Se determinó que la visibilidad de la nébula orión (M42), estaba siendo afectado seriamente si se comparaban fotografías tomadas en diferentes sectores del país -EUA. También se determinó que algunos filtros pueden bloquear las emisiones de algunas longitudes de onda de lámparas de mercurio y de vapor de sodio. Sin embargo, en el estudio también se contempla que esos filtros son caros y por lo tanto muchos astrónomos amateurs se están viendo afectados. Se concluye que lo mejor es utilizar mejores luminarias y vapor de sodio cerca de los observatorios. En esa época la mayoría de los reglamentos y ordenanzas se enfocaban solamente en los observatorios astronómicos. (Schreuder 1991). Posteriormente Murdin (1994) expondría unas razones más teóricas y filosóficas del porque la astronomía debería protegerse. “La astronomía es un esfuerzo intelectual humano que nos acompaña desde la historia de la civilización. Nos ayuda a entender los orígenes del universo y desafortunadamente está siendo extinguida por la propia civilización.” (Murdin 1994).

Observatory	Date of First OLC	Date of Current OLC	Notes
KPNO, Kitt Peak, Arizona, FLWO, Mt. Hopkins, Arizona	1972	1999	a
USNO, Lowell Observatory, Flagstaff, Arizona	1973	1989	b
Mt. Wilson Observatory, Los Angeles, California	- - -	- - -	c
Palomar Observatory, San Diego, California	1984	1986	
Lick Observatory, San Jose, California	1980	1983	
Mauna Kea, Hawaii	1974	1988	
Siding Spring Observatory, Australia	1988	1988	d
McDonald Observatory, Austin, Texas	1999	1999	
Cerro Tololo Observatory, La Serena, Chile	1999	1999	e
Roque de los Muchachos Observatory, Canary Islands, Spain	1988	1988	f

Fig. 1.24 Observatorios astronómicos que presentaban reglamentos para su preservación en 1991 (Schreuder 1991)

El hecho de que la contaminación lumínica estuviera afectando cada vez más las observaciones astronómicas, seguía provocando que aparecieran cada vez mas acciones en búsqueda de su entendimiento y disminución. Algunos astrónomos llegaron al grado de buscar disminuirla con el apagado de las lámparas de iluminación artificial pública.

Incluso apareció un artículo que trataba un tema al respecto. Cordell (1993) proponía adquirir una especie de laser que afectaba los sensores de las lámparas y, de esta manera, conseguir su apagado. La mayoría de las lámparas tienen un pequeño sensor fotosensible que interactúa con el día y la noche –haciendo que la lámpara este encendida de noche y apagada de día-. El laser mencionado cumplía el efecto de día y por lo tanto lograba que la lámpara se apagara. A pesar de parecer muy simple, el articulo se publico en la prestigiosa I.A.P.P.P. El esquema se puede observar en la fig.1.25.

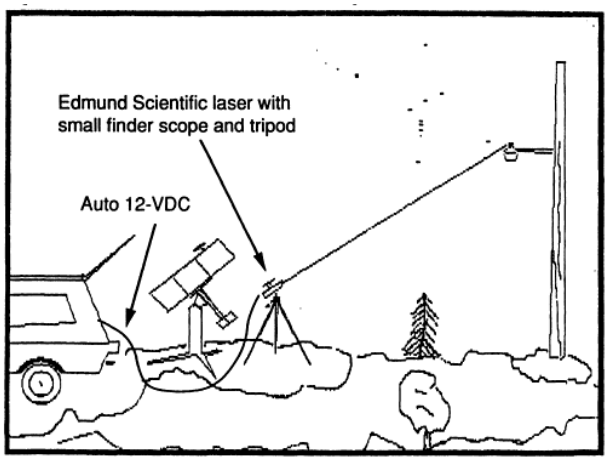


Fig. 1.25 Esquema de la recomendación de Cordell (1993)

En 1994, continuando en materia de contaminación lumínica y su efecto en la astronomía, Blanco (1994) realizó una serie de propuestas para que los gobiernos las tomaran en cuenta. El estudio se fue realizado en Italia. Dichas propuestas se enfocaban en la promoción, dirección, consejo y planeación de los estándares de instalación y uso de plantas de iluminación, públicas y privadas, dentro del territorio nacional. También se proponía tener una estrecha relación entre las comisiones gubernamentales de electricidad y manejo de energía, y las sociedades astronómicas dentro el país. Un estudio similar se realizó dos años más tarde, en Edimburgo, llamado el plan de iluminación de Edimburgo. En éste también se proponía mantener una estrecha relación entre las asociaciones gubernamentales y los astrónomos, con el objetivo de mejorar el problema de la contaminación lumínica y su efecto en la astronomía. (Brennan 1994). Una importante contribución la realizaron Mattila, Väsäinen y Appen-Schnur (1996) que realizaron un conteo del brillo del cielo en el área de la Silla en Chile -Donde se localizan una gran cantidad de observatorios operados por el observatorio Europeo del sur -ESO-.

Años después, en 1998, Carrasco, Carraminana, Sanchez-Sesma, y Lermo (1998) realizaron una investigación al norte de México, en el observatorio Guillermo Haro localizado en el estado de Sonora. En la región se carecen de normas que regulen los sitios astronómicos, Por lo tanto, el estudio recoge una serie de sugerencias para el lugar específico. Cerca del observatorio mencionado, se localiza una mina que afecta al observatorio con emisiones de humo y polvo y que por lo tanto incrementa la contaminación lumínica del lugar. El estudio propone trabajar en conjunto con el Instituto Nacional de Ecología y tratar de mejorar el medio ambiente del observatorio.

Y En ese mismo año, Baruch (1998) publicó un artículo que buscaba aconsejar acerca de cómo preservar las ventanas astronómicas. Las ventanas astronómicas se refiere a las longitudes de onda que pasan por la atmósfera y llegan a la tierra, y que por lo tanto pueden ser analizadas y "observadas" por telescopios y otros instrumentos astronómicos. En la investigación asocian el crecimiento de los estándares de vida y el crecimiento de la población, con la contaminación lumínica. Comentan que el cielo nocturno es patrimonio de la humanidad y que los telescopios robóticos, que están disponibles en distintas páginas de internet, pueden ayudar a que más personas se interesen en las observaciones astronómicas y comprendan la importancia de preservar el patrimonio del cielo nocturno. Percy (1998) también se enfocó en el estudio de las ventanas astronómicas con el objetivo de educar a la sociedad en el entendimiento del efecto de la contaminación lumínica.

Por otra parte Green (1998), realizo una interesante disertación, para la revista "Sky and telescope" de porque la contaminación lumínica afecta a los astrónomos. Hoy en día, su artículo aun se sigue publicando en revistas de interés general, debido a que es una explicación sencilla y clara del efecto en las observaciones astronómicas por parte de la iluminación artificial nocturna. Una investigación parecida la realizaría Kovalevsky (1998), aunque el determinó, de una manera más técnica, los efectos del medio ambiente en las observaciones astronómicas, incluyendo la masa de aire, el componente atmosférico y por supuesto, la contaminación lumínica.

Garstang (2001, 2006) continuaba realizando investigaciones sobre la contaminación lumínica y su medición. Los últimos artículos que ha publicado se enfocan en la determinación del aumento del brillo nocturno causado por las nubes. Toma el modelo que desarrollara en 1986 y lo modifica para determinar la contaminación lumínica en el zenit con el observador en el centro de la ciudad. Para analizar la contribución de las nubes a la contaminación lumínica, se basa en el modelo de Wiscombe asumiendo que la nube representa una capa horizontal uniforme. Desafortunadamente, algunos estudios quedaron inconclusos, debido a que Gasrtang falleció en noviembre de 2009.

1.4. Efectos de la contaminación lumínica en seres humanos

Es obvio que los efectos de la contaminación lumínica, al generarse de iluminación artificial en el ser humano, tengan que ver con la visión y percepción visual. También esta estudiado que la iluminación artificial puede ser percibida con los ojos cerrados y dependiendo de dicha percepción, será la cantidad de melatonina –hormona producida en la glándula pineal y que regula los ciclos circadianos- que el cuerpo genere.

Existen otros efectos, sin embargo entre los principales se encuentra el hecho de que la contaminación lumínica muchas veces genera un problema llamado luz intrusa. La luz intrusa es aquella que se introduce en el hogar, principalmente por las ventanas, y que proviene de la iluminación artificial por lo general pública. Ese molesto brillo que muchas veces no deja dormir adecuadamente y que sea el responsable de tener que bajar la persiana.

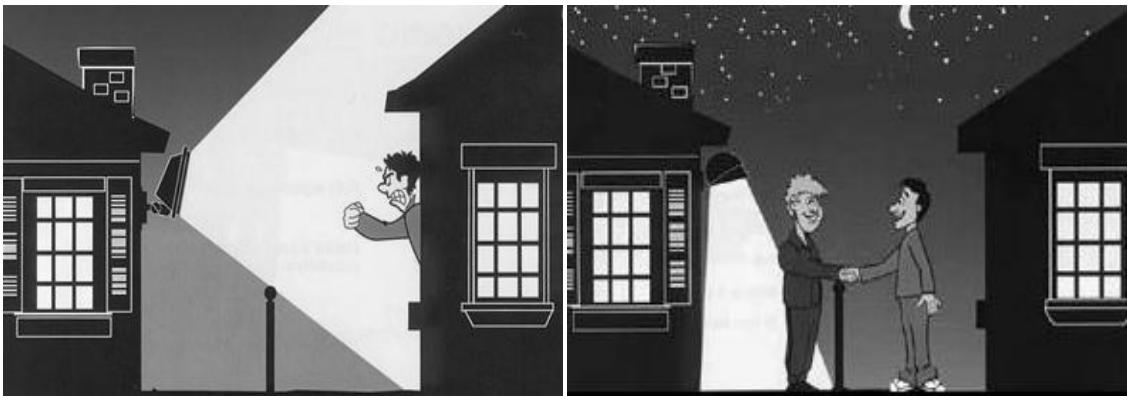


Fig. 1.26 Caricatura de ejemplo de la luz intrusa y su solución. (RASC 2009)

En 1995 se realizo una investigación acerca de las molestias que ocasiona la contaminación lumínica en las personas holandesas, de hecho el estudio se enfoco en varias molestias y una de ellas fue la iluminación artificial. Se tomaron 4000 personas, como representativas de Holanda. Se realizaron cuestionarios a las personas, relacionados con ruido, vibraciones e instalaciones de iluminación artificial como efecto en el buen desarrollo de sus actividades diarias. Solo un 4 % de la población relacionó molestias con la iluminación artificial del momento. (Anon, 1995).

Y posteriormente, el año siguiente, se analizaron los efectos que estaban causando los invernaderos en los habitantes de un pequeño poblado –situado cerca de los invernaderos-. No fueron considerados los efectos fisiológicos, pero si se realizaron encuestas al respecto a los pobladores, y se relacionaron, por medio de datos estadísticos, con la exposición y el nivel de la contaminación lumínica proveniente de los invernaderos. Van Bergem - Jansen y Vos (1996)

realizaron un importante estudio para analizar la manera en que una cancha de tenis molestaba a los habitantes de los alrededores.

Aunque, aun no se sabe a ciencia cierta, los seres humanos también tienen riesgo de enfermedad por la exposición a la contaminación lumínica, así fue manifestado por Davis, Mirick y Stevens (2001). Dichos investigadores realizaron un trabajo para demostrar que la exposición a la luz en la noche se puede asociar al riesgo de desarrollar el cáncer de pecho. Lograron demostrar, después de estudiar a varias personas, que la exposición a la luz en la noche puede aumentar el riesgo del cáncer de pecho suprimiendo la producción nocturna normal de melatonina en la glándula pineal, que, por otra parte, podría aumentar el estrógeno en los ovarios**.**

En el mismo año, Schernhammer et al (2001); realizaron una investigación para demostrar que el trabajo de noche reduce la producción de melatonina. Para el trabajo tomaron como voluntarias enfermeras que laboraban en horario nocturno. Se enfocaron en el cáncer de pecho, demostrando que las mujeres que trabajan en turnos de noche y que rotan por lo menos tres noches por mes, parecen tener un riesgo moderado del cáncer de pecho después de períodos extendidos de trabajar en turnos de noche**.**

Además de luz intrusa o efectos en desarrollos de cáncer o supresión de melatonina, la contaminación lumínica también puede ser responsable del desarrollo de Miopía. Así fue expuesto en una investigación desarrollada en la Universidad de Pensilvania. Relacionaron los estudios de la siguiente manera: Se evaluaron 500 niños de los cuales un porcentaje dormía en completa oscuridad, otro con la lámpara prendida y uno último con todas las luces de la habitación encendidas. Se determinó que más del 50% de los niños que dormían con las luces encendidas padecían miopía. (Anon. 1999).

Pukkala et al (2006) analizaron como afecta la reducción de melatonina en la formación de cáncer en humanos. De hecho, algunos de los resultados establecen que la melatonina actúa como antioxidante y se determinó que las personas ciegas tienen mayor cantidad de melatonina y por lo tanto menos riesgo de padecer cáncer. Evaluaron a varias personas durante varios años y concluyeron que el riesgo de cáncer de mama disminuyo considerablemente –en las mujeres analizadas- aunque no resultó lo mismo con el cáncer de próstata de los varones estudiados.

En el 2009 se realizaron dos importantes contribuciones en España, en la localidad de Murcia, al respecto de la contaminación lumínica y su efecto en los seres humanos. Madrid (2009) y Rol de Lama y Madrid (2009) investigan sobre la cronodisrupción –perdida del orden temporal interno- sufrido por las personas que se exponen a la luz nocturna brillante y que puede traer

consecuencias que van desde trastornos del sueño hasta cáncer en diferentes partes del cuerpo. Incluso completan su trabajo contabilizando diferentes tipos de cáncer en algunos países y relacionando con índice de contaminación lumínica en los mismos.

CAPÍTULO 2. LAS VARIABLES

Dentro de todo proyecto de investigación, las variables representan un concepto fundamental para el entendimiento y el análisis del problema objeto de investigación. Y aunque la contaminación lumínica está relacionada con astronomía, no nos referimos a las estrellas variables. –concepto utilizado en astronomía para designar a estrellas presentan variación en su brillo. Nos referimos a propiedades de la realidad de la contaminación lumínica que presentan variación.

Existen muchos factores que afectan la luminosidad del cielo nocturno, algunos son naturales y otros artificiales. Los naturales provienen del clima, de las estrellas, de la vía láctea, y de las fases lunares. Los artificiales provienen de la iluminación en las ciudades, carreteras, calles y empresas. La luz se dispersa a través de las moléculas que se encuentran en el aire; estas, a su vez, también pueden ser naturales, propias del clima, o artificiales, por contaminación del aire. Al mezclarse estos dos grupos de factores, se origina el fenómeno conocido como contaminación lumínica.

2.1. Coeficiente de transmisión de la atmósfera

Existe un camino, hacia el observador, que recorre la luz emitida por todo objeto. Este camino se denomina camino óptico y es tomado en cuenta para determinar la extinción y la dispersión que sufren los objetos no solo visuales. En astronomía, se denomina extinción atmosférica a la absorción que ejerce la atmósfera sobre la energía electromagnetica emitida por los objetos observados. La extinción será mayor cuanto mayor sea el espesor de atmósfera que atraviesa, tomando también en cuenta la llamada masa de aire. (Strobel 2010).

En total, son tres los factores que se deben utilizar en los cálculos del coeficiente de extinción atmosférico. Absorción molecular principalmente por ozono, el coeficiente de dispersión de Rayleigh y el coeficiente de dispersión por aerosoles. (Hayes y Latham 1975). El coeficiente de extinción atmosférico se puede calcular tomando en cuenta estos 3 factores, utilizando un modelo matemático para cada uno de ellos, y realizando una suma de los datos arrojados por los tres factores. (Green 1992).

La extinción visual de un objeto depende del camino óptico que éste recorre; entre mayor es el espesor de la atmósfera o la masa de aire que el objeto visual atraviesa, mayor será la extinción. La total extinción atmosférica se obtiene al sumar los tres componentes mencionados anteriormente –aerosol, molecular y ozono-, dependiendo de la masa de aire, que va relacionada con el ángulo de observación.

Asimismo la luz y toda radiación electromagnética, se compone de fotones que viajan en ondas y que por supuesto, dependiendo del elemento con el que interactúen, se verán dispersas hacia otras direcciones. La atmósfera está compuesta de una mezcla de partículas moleculares que causan dispersión en la luz. En el caso de la contaminación lumínica, hablamos de dispersión molecular y dispersión por aerosoles. Es decir, al estudiar la contaminación lumínica solo se toman en cuenta las moléculas de aire y los aerosoles, debido a que estas son las responsables de la dispersión de los fotones y por lo tanto del regreso de los mismos hacia el observador. El ozono solo causa absorción, no dispersión, y se encuentra a alturas superiores a los 10 kilómetros. Las moléculas son fácilmente modelables, los aerosoles son de más difícil estudio, ya que varían de región en región. Sin embargo se pueden tener buenas aproximaciones numéricas en el estudio de la contaminación lumínica (Kocifaj, 2007).

Thomas, Modali y Roosen (1973) fueron los primero en investigar el efecto de los aerosoles en la contaminación lumínica, al tratar de realizar un método para atmósferas realísticas. Si se requiere realizar un estudio exacto de la cantidad de aerosoles en cualquier sitio, es necesario analizar el tamaño de partícula de aerosol Joseph, Kaufman, y Mekler (1991), utilizar una serie de instrumentos como espectrofotómetros y contadores de aerosol y realizar un proceso de los datos que en ocasiones requiere el uso de supercomputadoras y espectroscopios (Stalin et al, 2008), (Aubé, 2005). Una muy completa investigación al respecto la realizó Kovalevsky (1998), determinando, de una manera más técnica, los efectos del medio ambiente en las observaciones astronómicas, incluyendo los aerosoles.

Fig. 2.1 Espectroscopio utilizado por Aube como ayuda en
La detección de aerosoles (Aube 2005)

Otro factor, relacionado con el coeficiente de transmisión de la atmósfera, que últimamente ha querido abordarse en su efecto al aumento del brillo nocturno es el clima, conocido como el conjunto de los valores promedio de las condiciones atmosféricas que caracterizan una región. Estos valores promedio se obtienen con la recopilación de la información meteorológica durante

un periodo de tiempo suficientemente largo. Según se refiera al mundo, a una zona o región, o a una localidad concreta se habla de clima global, zonal, regional, clima local o microclima respectivamente. El clima es un sistema complejo por lo que su comportamiento es muy difícil de predecir.

Hoy en día, solamente se puede aventurar una precisión de lo que será el tiempo atmosférico del futuro más próximo. Asimismo, el conocimiento de los climas del pasado es, también, más incierto a medida que se retrocede en el tiempo. Relacionado podemos mencionar como ejemplo que existe la escala internacional de visibilidad del aire. Esta escala surge gracias a la adopción, que la OMM recomendó en 1957, de una medida del estado óptico de la atmósfera, es decir, el alcance óptico meteorológico (AOM), definida del modo siguiente: El alcance óptico meteorológico es la longitud de recorrido en la atmósfera necesario para reducir el flujo luminoso de un haz colimado procedente de una lámpara de incandescencia, a una temperatura de color de 2 700 K, a 0,05 de su valor inicial, evaluándose el flujo luminoso mediante la función de luminosidad fotópica de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE 2009).

Se sabe que el clima representa una influencia en el aumento o disminución de la contaminación lumínica, así se ha comprobado por modelos que fueron elaborados basándose en la influencia de la nubosidad y cantidad de aerosoles en el ambiente. Sin embargo, en materia de contaminación lumínica, lo mejor es medir el clima al mismo tiempo que se está contabilizando los datos lumínicos, de esta manera los datos serán más precisos. Es importante tomar en cuenta el concepto de visibilidad climática y su relación con la contaminación lumínica, debido a que, por obvias razones, entre mayor es la visibilidad climática menor es la contaminación lumínica.

Las publicaciones que relacionaban la contaminación lumínica y el clima empezaron de manera aislada en el año de 1998. Griffin (1998) de la división de pesca y vida salvaje del departamento de planeación de recursos naturales de EUA, publicó un artículo acerca de los esfuerzos que en ese momento se estaban realizando para controlar la contaminación lumínica y su efecto en la biodiversidad. En éste trabajo se muestra la importancia de tomar en cuenta factores climáticos como la lluvia y temperatura del medio ambiente. Aunque anteriormente se realizaban investigaciones relacionadas con el clima, aunque más enfocadas en su efecto en las observaciones astronómicas independientemente de la contaminación lumínica.

Schneeberger, Worden y Beckers, (1979) presentaron un estudio realizado en el Observatorio Peak de Sacramento (EUA) en donde determinaban, además de la contaminación lumínica, porcentajes de humedad relativa en el ambiente en un periodo de un año.

En la comunidad de Cataluña, donde se ha desarrollado la presente investigación, se han generado publicaciones que relacionan las condiciones atmosféricas y el aumento de brillo nocturno, uno de estos trabajos se llevó a cabo en el año 2000, en el departamento de astronomía y meteorología de la Universidad de Barcelona. Torra y Fernández (2000) realizaron un programa piloto para la evaluación y reducción de la contaminación lumínica en Cataluña. Éste plan fue hecho para posteriormente tomarlo como ejemplo al elaborar la ley de ordenación ambiental de la iluminación exterior para la protección del medio nocturno que en ese momento estaba solicitando el parlamento de Cataluña. El programa tomaba en cuenta, entre otros factores, las condiciones climáticas del área de estudio. Ha sido de las investigaciones mas completas, en relación a la contaminación lumínica, desarrolladas en España.

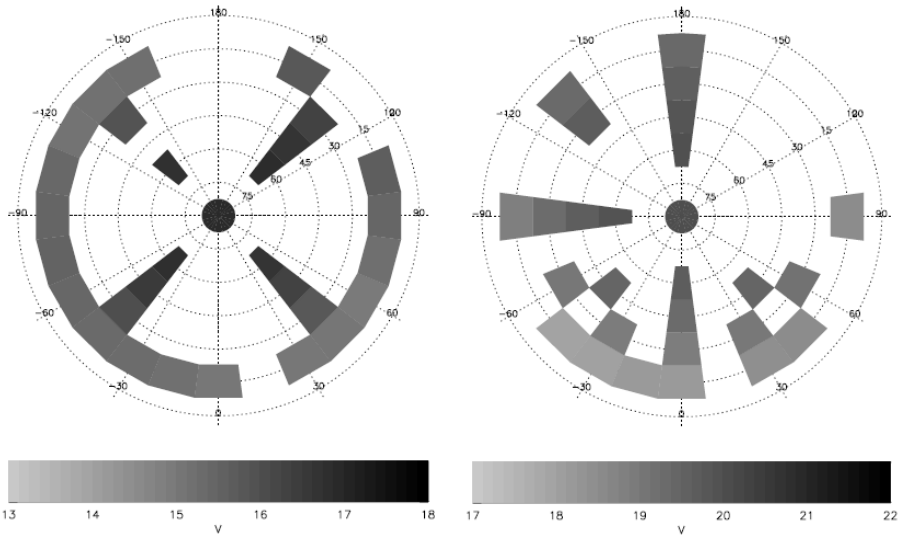


Fig. 2.2 Mapas del fondo del cielo de Barcelona y de Seva, respectivamente, en Mag(arcseg^2 (Torra y Fernández 2000)

Asimismo el clima como dato histórico y las estadísticas climatológicas de los lugares afectados con contaminación lumínica se estudiaron a partir del año 2002. Hänel (2002) llevó a cabo una investigación en la que comparó la contaminación lumínica de Alemania, Estados Unidos de Norteamérica y Osnabrück. Según el autor del trabajo, uno de los aspectos más importantes es el clima, el cual lo tomo obteniendo datos de fuentes históricas. Posteriormente, algunos investigadores supusieron que se podía estudiar mejor la relación entre clima y contaminación lumínica si se realizaban escalas de climatología. Los primeros fueron la Red de Estudiantes de La Serena, que en el año 2002 realizaron una determinación de la contaminación lumínica de los cielos de la Serena y Coquimbo, basándose en una serie de cuestionarios que tomaban en cuenta diferentes variables. Una de las variables utilizadas fue el clima, escalándolo en 4 partes: Despejado, Parcial, Parcial a Nublado y Nublado (Orellana 2002). Tiempo después, Baddiley (2007), científico perteneciente e impulsor de la campaña por cielos oscuros, realizó una presentación en la que demuestra la intrínseca relación que existe entre las condiciones climáticas

y la contaminación lumínica, ya que se produce la contaminación cuando los fotones despedidos hacia el espacio chocan contra las partículas suspendidas en él y se regresan de nuevo (Baddiley 2007).

2.2. La orografía

La orografía representa el relieve de la tierra, de hecho se utiliza para comprenderlo y determinar las formas de la superficie. Es definida como la altura media terrestre, medida en metros geopotenciales, sobre cierto dominio. Generalmente se toma como referencia el nivel del mar y a partir de ahí se definen las alturas de las diferentes manifestaciones orográficas –montañas, montes, relieves, entre otros- Se ha comentado de la importancia de tomar en cuenta la orografía al realizar investigaciones de contaminación lumínica, ya que, dependiendo de la situación del terreno será la cantidad de luz que llega al observador.

La orografía en relación con la contaminación lumínica, empezó a estudiarse a partir del año 2000 en España. En éste año se llevó a cabo un programa piloto para la evaluación y reducción de la contaminación lumínica en Cataluña. Este plan fue elaborado para posteriormente tomarlo como ejemplo al elaborar la ley de ordenación ambiental de la iluminación exterior para la protección del medio nocturno que en ese momento estaba solicitando el parlamento de Cataluña. El programa tomaba en cuenta, entre otros factores, la orografía del área de estudio **(**Fernández 2000**)**. Posteriormente se pensó que los mapas lumínicos, que actualmente se realizan con satélite, no toman en cuenta la orografía del terreno; sino que representan estados de claridad del cielo nocturno en la dirección del cenit local. Esto fue comentado por Herranz (2002) en un artículo sobre el impacto ambiental de la iluminación nocturna artificial. En este trabajo se da una explicación sobre las características y efectos de la contaminación lumínica y se comenta sobre los mapas de Cinzano et al (2001).

Los astrónomos también se preocupan por estudiar de qué manera influye la orografía en la contaminación lumínica. Varela et al (2005), publicaron un articulo, en el congreso nacional de detección, acerca de la afectación que sufren los observatorios de canarias con la calima anticiclónica y los mares de nubes en su relación con la contaminación lumínica. Proponen, en su investigación, tomar en cuenta la influencia que sufre el clima y la contaminación lumínica por el relieve que presenta el terreno circundante. Dos años después Rodil (2007), utilizo astrofotografía para elaborar el mapa lumínico del territorio de México. Hizo gran hincapié en la utilización de software adecuado de fotografía satelital para la identificación de la orografía del terreno de estudio.

2.3. Iluminación natural nocturna

Otro factor que interviene en la búsqueda del grado de contaminación lumínica, es la iluminación natural que hay en ambiente nocturno, proveniente de los astros y de la luna. Indiscutiblemente, las especies que pertenecen a la biodiversidad están adaptadas a éste nivel de iluminación; mismo que ha existido desde hace millones de años y que no ha sufrido variaciones considerables -Salvo excepciones de las fases lunares, luz zodiacal y localización de observación-.

Se le llama iluminación natural nocturna, a la que existe en ausencia de toda luz artificial. Según el manual de contaminación lumínica (Narisada, Schreuder, 2004), el estándar de la iluminación natural nocturna se puede tomar como 21.6 Mag/Arc-seg^2 lo que corresponde a 3.52 x 10 -4 Cd/m^2 anteriormente mencionado por Crawford (1998). Así también, la luz de la luna llena es un factor que influye principalmente a las observaciones astronómicas y que es necesario calcularlo. Krisciunas y Schaefer (1998) idearon un modelo matemático para el cálculo sencillo de la iluminación de la luna llena, tomando en cuenta la extinción y dispersión de la luz de la luna y la masa de aire que atraviesa dependiendo del ángulo en que se encuentre. Los resultados del modelo en comparación con mediciones realizadas, que se pueden observar en la fig. 2.3, fueron muy buenos.

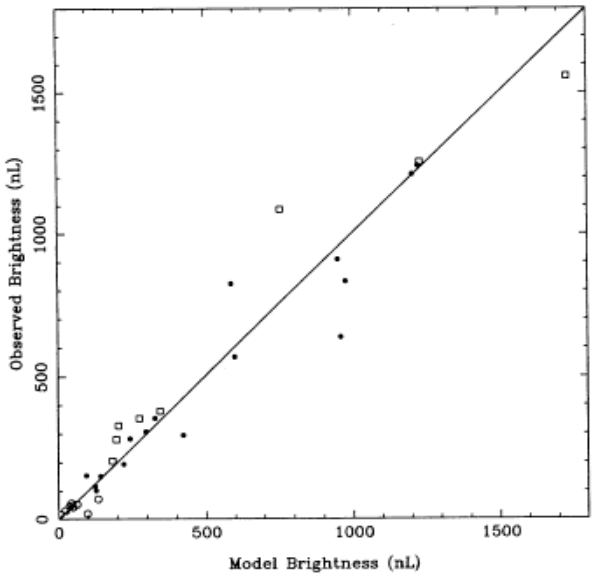


Fig. 2.3 Comparación de resultados del modelo de Krisciunas y Schaefer con datos de mediciones realizadas (Krisciunas & Schaefer 1998)

2.4. Focos contaminantes

Sabemos que la luz artificial está conformada de diferentes tipos de luz. Los distintos tipos de bombillas -fluorescentes, incandescentes, de vapor de mercurio, de vapor de sodio, entre otras- no

emiten el mismo tipo de luz ni presentan el mismo consumo de energía. Incluso algunas de ellas emiten tipos de luz que no son apreciables por el ojo humano o consumen hasta cuatro veces más que otras. Las bombillas de vapor sodio son las preferidas por los investigadores astrónomos que buscan reducir la contaminación lumínica, debido a que son menos contaminantes para las observaciones, por la parte mínima de afectación del espectro, y presentan un menor consumo de energía. Así también, es importante notar que dentro del foco contaminante se localiza la luminaria. Si se tiene un buen diseño de luminaria, se disminuirá la cantidad de contaminación lumínica que emite la respectiva lámpara.

Fig. 2.4 Luminarias ofrecidas a la venta por “Starry night Lights” y aprobadas por la IDA como no contaminantes (SNL 2009)

Se consideran focos contaminantes, aquellos que afectan en cierta medida el área que interesa para ésta investigación, En el caso de contaminación lumínica, se toman en cuenta como focos contaminantes, las calles bien y mal iluminadas, luminarias cercanas, focos puntuales de contaminación (parkings, negocios nocturnos, urbanizaciones), poblaciones. Es decir, toda aquella luz artificial que éste ejerciendo una influencia en la zona de estudio, tanto privada como pública. Asimismo, dependiendo de la zona estudiada será el foco contaminante, añadiendo que existen recomendaciones por la CIE de niveles máximos de iluminación por zonas –los tipos de zonas ya fueron comentadas en el apartado de contaminación lumínica de este trabajo.

PARAMETRO LUMINOTECNICO	CONDICION DE APLICACION		E1	E2	E3	E4
Iluminancia en un plano vertical (E_V) lux	Aplicable a planos verticales de los limites de la propiedad privada a la altura donde pueda haber una potencial afección del edificio (ventanas). Los valores dados corresponden a la componente directa de la iluminación.	De 06:00h a 22:00 h	2	5	10	25
		De 22:00h a 06:00 h	0*	1	2	5
Intensidad luminosa emitida por las luminarias (I) en candelas (cd)	Los limites se aplican a cada luminaria en las direcciones donde puede existir problemas de brillo en el campo de visión de los ciudadanos de manera más o menos constante.	De 06:00h a 22:00 h	2500 cd	7500 cd	10000 cd	25000 cd
		De 22:00h a 06:00 h	0* cd	500 cd	1000 cd	2500 cd

Fig. 2.5 Máximos valores permisibles de luminancia en plano vertical y de intensidad luminosa emitida por luminarias, recomendaciones de la CIE. (IAC2002)

Partiendo de lo anterior, las zonas peatonales requieren de igual forma tener su estandarización, puesto que son focos contaminantes de importancia. Por lo tanto:

	E_H media	E_H min	E_{sc} min
P1	20-25	7.5-10	7.5-10
P2	10-15	4-5	4-5
P3	7.5-8	1.5-2	3
P4	5	1-2	1-2

Fig. 2.6 Recomendaciones realizadas por la CIE para iluminancias en zonas peatonales (IAC2002)

P1	• Calzadas de alto prestigio • Centros municipales o urbanos con tráfico motorizado • Calles comerciales con trafico motorizado
P2	• Uso nocturno intenso por peatones o ciclistas • Centros municipales o urbanos totalmente peatonales • Calles comerciales totalmente peatonales • Centro de pueblos con tráfico motorizado
P3	• Uso nocturno moderado por peatones o ciclistas • Centro de pueblos totalmente peatonales • Zonas residenciales de alta utilización (zona de reunión, parques infantiles, etc.) $E_H min \geq 4$ lux
P4	• Uso nocturno menor por ciclistas o peatones únicamente asociados con propiedades adyacentes • Zonas residenciales de media utilización • Calles residenciales con predominio de uso peatonal • Zonas industriales con predominio del uso peatonal

Fig. 2.7 Descripción de tipos de zonas peatonales (IAC2002)

Concluyendo recordemos que para realizar un efectivo conteo de la contaminación lumínica, es necesario analizar cada foco contaminante por separado y no estandarizarlo -como es realizado en algunos modelos que toman un patrón de lúmenes per cápita-

CAPÍTULO 3. LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

La orientación primordial en la toma de datos, al realizar investigaciones sobre contaminación lumínica, es utilizar medidas de luminancia, por lo tanto se vio en la necesidad de investigar claramente los instrumentos que mejor se podrían adaptar a nuestras necesidades. Necesitábamos que las características de medición fueran especiales, ya que se realizaron mediciones en horarios nocturnos, en donde la iluminación es mucho más baja que de día.

Los instrumentos que actualmente se adaptan a esas características son video fotómetros con tecnología CCD, algunos luminancímetros y el Sky Quality Meter –SQM-. Aunque cabe mencionar que existen instrumentos de otros tipos. Mencionaremos por tanto las características y usos de los instrumentos que se utilizan en la investigación y análisis de la contaminación lumínica.

Nota: El instrumento con tecnología CCD -videofotómetro- no fue utilizado por la dificultad en su adquisición, sin embargo se piensa que sería de gran ayuda en investigaciones de contaminación lumínica, por eso se menciona una investigación, no exhaustiva, de algunas de las investigaciones que han utilizado tecnología CCD.

3.1. Luminancímetro

El luminancímetro es un instrumento utilizado en medidas de luminancia, posee dos sistemas ópticos: uno de dirección y otro de medición. El sistema de dirección es el que permite orientar el instrumento para que se coincida con el punto a medir. El sistema de medición posee una lente por la cual accede la intensidad luminosa y un sensor que reacciona ante esa intensidad. Comúnmente arroja las medidas en $Cd/m^{2.}$ Por lo general los luminancímetros son utilizados en técnicas de escenas fotográficas, diseño de iluminaciones y raramente utilizado por astrónomos en cálculo de la contaminación lumínica. Los fotómetros utilizados por astrónomos se verán más adelante.

Sin embargo si se han utilizados luminancímetros para calcular las luminancias del horizonte de las ciudades. Como Iizuka e Isobe (1998) que realizaron comparaciones entre la ciudad de Kyoto (Japón) totalmente iluminada y la misma ciudad en los periodos de baja de iluminación pública. Utilizando un luminancímetro y fotografía fotométrica. Cinzano (2003) también utiliza un luminancímetro para realizar cálculos de contaminación lumínica, no ha comentado

específicamente que medidas realiza, sin embargo se encuentra entre los elementos de laboratorio de fotometría y radiometría de contaminación lumínica.

Fig. 3.1 Ejemplo de luminancímetros (LMT 2006)

3.2. Sky Quality Meter

El Sky Quality Meter (SQM) de Unihedron es un fotómetro manual que permite que los observadores individuales cuantifiquen el brillo del cielo. Con su diseño compacto y portátil, este equipo permite cuantificar fácilmente la calidad del cielo nocturno. (Unihedron 2007)

El instrumento cuenta con un filtro infrarrojo, por lo tanto, el SQM sólo tiene en cuenta la radiación correspondiente al espectro visible a la hora de hacer las mediciones, proporcionando los resultados en unidades de magnitudes por segundo de arco al cuadrado (mag/arcseg2). Un medidor portable sumamente barato y relativamente fácil de usar que sirve para darnos una idea general del grado de contaminación en el área estudiada.

Para utilizarlo, simplemente se debe sostener el SQM dirigiéndolo hacia el cenit y presionando el botón rojo. Después de algunos segundos la unidad presenta la medición por medio de un número. Básicamente, entre más grande es el número más oscuro es el cielo. Una lectura de 21.00 indicaría un sitio muy oscuro, mientras que una lectura de 16.00 indicaría contaminación lumínica. En pocas palabras, el SQM mide cuánta luz (que viene adentro de un cono de cerca de 80 grados de ancho) llega a un sensor. El aparato entonces convierte esa cantidad de luz en unidades de magnitudes por el cuadrado de arco-segundo, que no son obviamente fáciles de visualizar.

Con el fin de la visión de noche, se creó un nombre más primario para las unidades de SQM, son llamados los "squims." Por ejemplo, si el aparato lee 18.75 magnitudes por el cuadrado de arco-segundo, se describe como "18.75 squims."

Fig. 3.2 El SQM y las instrucciones para su correcto uso (Unihedron 2007)

Los observadores se deben asegurar de que las luces próximas no estén dentro del cono de detección del sensor. De igual forma, la luz de la luna no debe influenciar la oscuridad del cielo, que es indicada por la línea de la oscuridad de un reloj claro del cielo. Así también, las lecturas de SQM se deben tomar después del crepúsculo astronómico, cuando el sol no contribuye a ningún aumento de la luz del cielo de noche. (Unihedron, 2007).

3.3. Instrumentos videofotómetros con tecnología CCD

El CCD no es más que un sensor que contiene diminutas células fotoeléctricas que registran la imagen. La capacidad de resolución que tenga el CCD depende del número de células fotoeléctricas que contenga. Éste número se expresa en píxeles. El término CCD se deriva del inglés “Charged Coupled Device” que significa “dispositivo de cargas interconectadas”. Es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados. Existen instrumentos luminotécnicos que trabajan con dispositivos CCD refrigerados y del orden del mega pixel. Funcionan en medidas de luminancia y tienen la ventaja de que con una sola medición podemos tener mucha más información. Todo gracias a que, por su circuito CCD integrado, es como si se tuvieran miles de luminancímetros en un solo aparato.

La visión artificial puede presentar características indeseadas. Sin embargo, se realizan cada vez mas trabajos para hacerla más efectiva. Los instrumentos con tecnología CCD son de gran apoyo en las investigaciones relacionadas con investigación artificial. Snyder et al (1995), realizaron una investigación que consistía en encontrar la manera de reducir el ruido de las imágenes captadas por medio de las cámaras CCD. Lo hicieron concentrándose en la característica que presentan los píxeles captados por los sensores, una estadística Poisson-Gausiana Así también, Wu y Anderson (1996) llevaron a cabo una investigación para generar algoritmos que pudieran eliminar el manchado de las imágenes tomadas por medio de CCD en astronomía. Aspectos que en

astronomía han sido de gran ayuda, para tener imágenes más nítidas y representar menos la extinción atmosférica en las imágenes. Posteriormente, los investigadores de visión artificial con tecnología CCD se enfocaron en la exactitud que poseen éste tipo de sensores. Gai et al (2001), consumaron un trabajo para encontrar las limitaciones en la exactitud que presentaban las cámaras con sensores de tipo CCD, la investigación presentó un enfoque más apegado a las ciencias astronómicas.

Los sensores CCD también tienen características adecuadas para el estudio de los colores. Así lo demostró Martínez (2001) quien diseñó un colorímetro triestímulo a partir de una cámara CCD-RGB. Así también, este tipo de sensores demuestran características que los hacen bastante superiores a otros tipos de sensores. Couso (2002) realizó un proyecto de fin de carrera con el cual se analizaba la viabilidad, en cuanto a características técnicas y precios, de diferentes tipos de instrumentos de medición de la iluminación. En el análisis se incluían también dispositivos con tecnología CCD

Los instrumentos que presentan tecnología de sensores CCD, tienen poco tiempo de haber sido creados. De hecho es posible utilizarlos en aplicaciones lumínicas. Sierra (2002) realizó una investigación para representar las aplicaciones luminotécnicas que tienen las cámaras con tecnología CCD. Con ésta investigación se realizaron análisis fotométricos de diferentes tipos de lámparas, concluyéndose que la tecnología CCD es bastante eficiente para conocer las características fotométricas de un aparato de alumbrado y además representa un bajo coste**.**

Posteriormente, al haberse demostrado la capacidad de los sensores CCD, se llevaron a cabo mas investigaciones que relacionaban los sensores CCD y la luminotecnia. En el Chiara (2003), de la Universidad Federico II de Nápoles, realizó una investigación de puestos de trabajo con combinación de iluminación artificial y natural, para lo cual utilizó cámaras con dispositivos CCD**.** La investigación de Software enfocada a los sensores CCD llegó tiempo después. Los astrónomos que estudian el problema de la contaminación lumínica utilizan el programa Paint Shop Pro para mejorar las imágenes que toman, este programa descompone la imagen en sus componentes CMYK para posteriormente pasarla a blanco y negro con una mejor resolución. Otro programa informático es el mecanismo Cristal Engine, que permite reconocer y procesar de manera altamente precisa los colores RGB gracias a la incorporación de filtros independientes para cada color primario, a través del sistema de 3 CCD, uno para cada color primario -Rojo, Azul y Verde- de manera independiente. Tomando en cuenta el Software existente y la tecnología de sensores CCD, Hoyos, D. et al (2005), realizaron un estudio de medición indirecta de radiación por procesamiento digital de imágenes de luminancia. Para ello utilizaron cámaras con dispositivos CCD.

La tecnología de sensores CCD, tiene bastante relación con la visión humana y por lo tanto es posible utilizarla en investigacines de contaminación lumínica. Así fue demostrado por Wienold y Christoffersen (2006) que llevaron a cabo una investigación, del deslumbramiento de los ambientes de trabajo con luz natural, utilizando cámaras con dispositivo CCD. Posteriormente, todos estos instrumentos que hasta hace poco eran solo prototipos, comenzaron a comercializarse. La empresa Opte-e-ma (2006) realizó el goniofotómetro RIGO 801 utilizado para medir objetos fotométricos, lámparas y luminarias. Las mediciones pueden ser tratadas por medio de un software**.** La empresa Technoteam (2007) maneja diferentes videofotómetros con tecnología CCD, en la rama LMK, utilizados en la medición de la distribución de luminancias, iluminación de interiores, iluminación de exteriores, colorímetros y medición de lámparas y luminarias. Una de las cámaras, la LMK 2000 Mobile, es bastante ligera se puede llevar con tranquilidad a donde se desee ya que no cuenta con aditamentos pesados o molestos. Así también maneja un software para el tratamiento de los datos obtenidos por medio de las cámaras. Y la empresa Photo research (2006) maneja videofotómetros con tecnología CCD y un software utilizado en la medición de luminancias, iluminancias y desarrollo de diagramas cromáticos, su nombre es Spectrawin y actualmente ésta en el mercado.

3.4. Cámaras digitales

Las fotografías dentro de la contaminación lumínica son utilizadas generalmente como exposición grafica del problema y en ocasiones, si se tiene el programa adecuado, para determinar luminancias en puntos de la imagen. Las imágenes utilizadas son captadas por medio de lentes especiales, ojos de pez, aquellos cuyo ángulo de visión es extremadamente grande, de 180 grados o más. En la fig. 3.3 se muestra un ejemplo de dichas imágenes, se puede observar el efecto de la contaminación lumínica en las orillas del círculo.

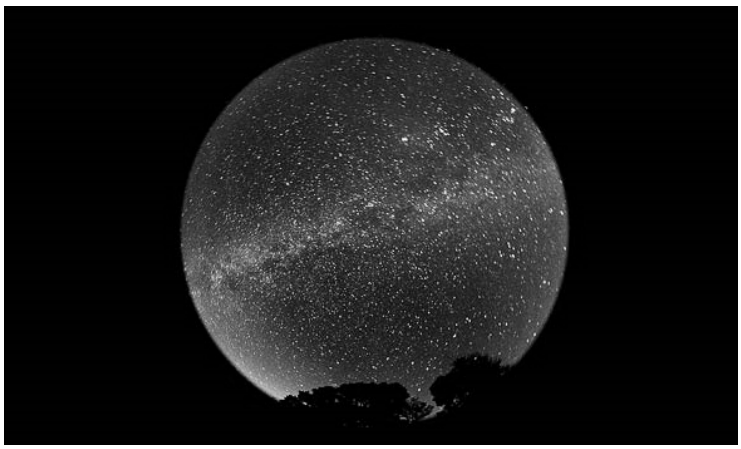


Fig. 3.3 Fotografía astronómica tomada con objetivo “ojo de pez”

Hablando de fotografía como exposición del problema, Robinson (1991) realizó un catalogo fotográfico del alumbrado público de la ciudad de Tucson (EUA). Buscaba minimizar el problema de la contaminación pública con ejemplos fotográficos de buena y mala iluminación.

3.5. Imagen satelital

El primer investigador que realizó una imagen satelital de la tierra por la noche fue Sullivan (1991). Tomó fotografías a lo largo de 10 años, apoyándose en el satélite de defensa meteorológica de Estados unidos de Norteamérica, a lo largo de 10 años, entre 1974 y 1984. Se eligieron solo las fotografías libres de nubes.

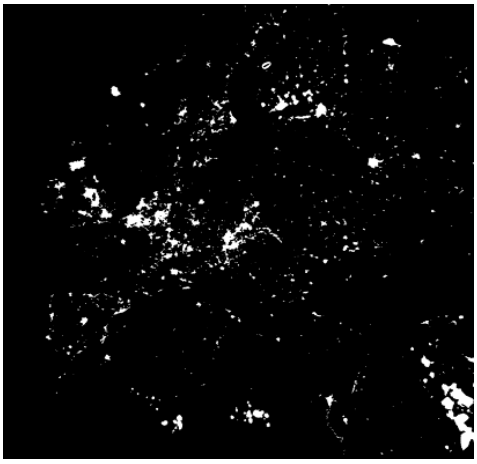


Fig. 3.4 Europa y sus puntos luminosos, en un Extracto del primer mapa satelital de la noche (Sullivan 1991)

Quercy y Quercy (1998) se apoyaron en imágenes de satélites meteorológicos para identificar los mejores puntos del planeta para observaciones astronómicas. Con las imágenes identificaron la cantidad de polvo, humedad y nubes y transmitieron los daros a un mapamundi. Encontraron los mejores sitios en lugares de África y Asia.

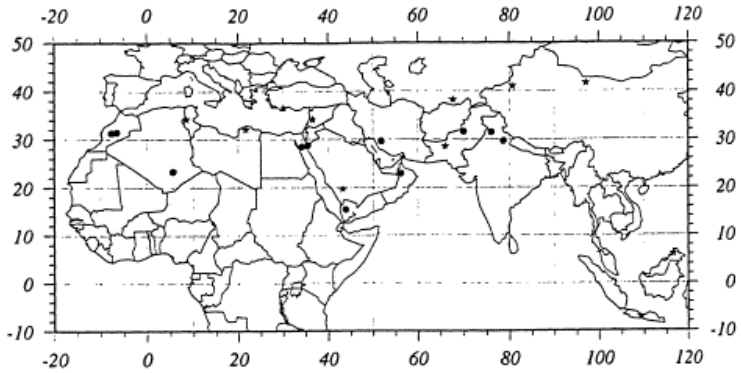


Fig. 3.5 Mapa de los mejores lugares para observaciones astronómicas en África y Asia, identificados por medio de satélite meteorológico (Querci & Querci 1998)

Posteriormente fueron utilizadas ampliamente las imágenes satelitales por Cinzano, Falchi y Elvidge (2002, 2007).

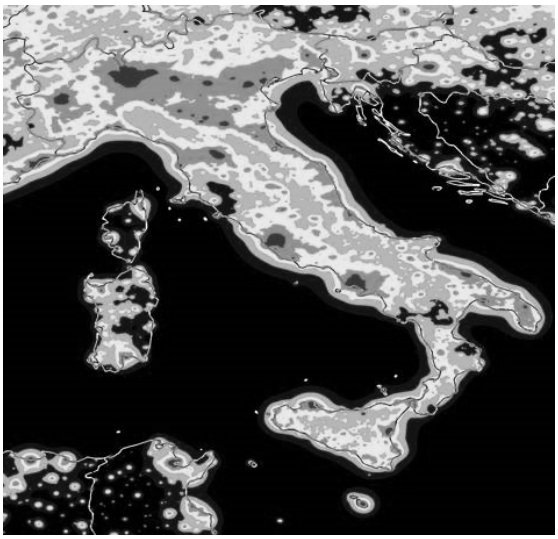


Fig. 3.6 Brillo artificial del cielo nocturno a nivel del mar en Italia
(Cinzano, Falchi & Elvidge, 2002)

3.6. Fotómetro astronómico

Se puede describir al fotómetro como cualquier instrumento que mida la intensidad de la luz, es decir, los mencionados anteriormente se consideran como fotómetros –derivado del griego foto, luz y metro, medida-

Sin embargo, en astronomía se utilizan dos tipos de fotómetros: el fotómetro fotoeléctrico y el fotómetro con tecnología CCD. El primero aun se sigue utilizando, aunque cada vez menos debido a las ventajas que ofrece el fotómetro CCD: mayor calidad, mayor cantidad de datos por toma, mayor precisión. El CCD ha sido ampliamente recomendado por Tritton (1997) debido a las ventajas mencionadas anteriormente.

Los fotómetros en astronomía se utilizan para determinar la magnitud de los astros observados, sin embargo en ocasiones se ha utilizado para el cálculo de la contaminación lumínica, con muy buenos resultados. De hecho Treanor (1972) propuso un fotómetro portable de fabricación propia muy parecido al SQM, explicado anteriormente en este apartado, pero mucho más pesado y grande. Una aportación similar la realizó Upgren (1992), cuando investigo la contaminación lumínica que afectaba el observatorio Van Vleck del campus universitario metodista utilizando fotómetros portátiles.

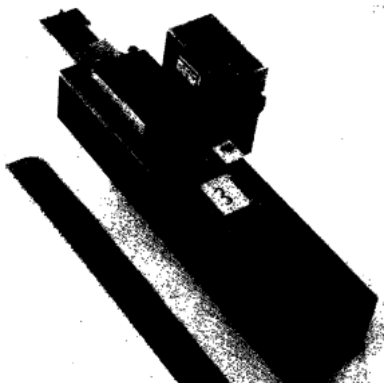


Fig. 3.7 Fotómetro portable recomendado por Upgren (1992)

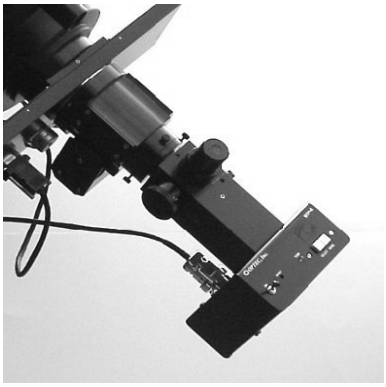


Fig. 3.8 Fotómetro astronómico

Nawar et al (1998) utilizaron un fotómetro fotoeléctrico con el fin de caracterizar y medir la contaminación lumínica en el observatorio de Kottamia (Egipto). Determinaron que la ciudad de El Cairo, situada a 56 Km, era la responsable de casi la totalidad de contaminación lumínica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA PRIMERA PARTE

1. ANON. (1993) Declaration on the reduction of adverse environmental impacts on Astronomy. IN IAU (Ed.) *IAU/COSPAR/ICSU/UNESCO Meeting, Adverse environmental impacts on Astronomy: an esposition.* Paris.

2. ANON. (1995) *Urban Ecology, Living and working in harmony with the environment,* Bonn, Bundesministerium fur raumordnung, Bauwesen und stadtebau.

3. ANON. (1999) Night lights affect visual performance. Intermediair

4. ANON. (2004) Recomendaciones para la iluminación de instalaciones de exteriores o en recintos abiertos. . San Cristobal de la Laguna., Instituto de Astrofísica de Canarias.

5. ANTARAMIÁN, E. (2002) Contaminación de luz en Michoacan (Campaña para cielos oscuros). *Investigaciones geográficas UNAM,* 45**,** 77-85.

6. AUBÉ, M., FRANCHOMME-FOSSÉ, L., ROBERT-STAEHLER, P. & HOULE, V. (2005) Light Pollution Modelling and detection in a heterogeneous environment: Toward a night time aerosol optical depth retrieval. IN SPIE (Ed.) *SPIE2005.*

7. BADDILEY (2002) Skyglowmodelling. London, BAA.

8. BADDILEY, C. J. (2004) Light pollution in UK. . *British Astronomical Association, Campaign for Dark Skies.*

9. BADDILEY (2007) A model to show the differences in skyglow from types of luminaire designs, with a view to recovering rural dark skies. IN MARÍN, C. & JAFARI, J. (Eds.) *Starlight – A common heritage.International Conference in Defence of the Quality of the Night Sky and the Right to Observe the Stars.* Las Palmas de Gran Canaria, España.

10. BAKER, B. J. & RICHARDSON, J. M. L. (2006) The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, Rana clamitans melanota. *Canadian Journal of Zoology,* 84**,** 1528-1532.

11. BARUCH, J. E. F. (1998) Public Education to Preserve Dark Skies and Astronomical Windows with Eavesdropping and Robotic Telescopes. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

12. BENN, C., R. & ELLISON, S. L. (1999) LA Palma Night-Sky Brightness. *New Astronomy Reviews,* 42**,** 503-507.

13. BERRY, R. L. (1976) Light pollution in Southern Ontario. *The journal of the royal astronomical society of Canada,* 70**,** 3.

14. BIRD, B. L., BRANCH, C. L. & MILLER, D. L. (2003) Effects of coastal lighting on foraging behavior of beach mice. *Conservation Biology,* 18**,** 1435–1439.

15. BLANCO, C. (1994) Bill on Outdoor Lighting Pollution Introduced by the Italian Astronomical Society to the National Government. IN MCNALLY., D. (Ed.) *The vanishing universe: adverse environmental impacts on astronomy, Unesco.* Paris, France.

16. BRENNAN, D. (1994) The Edinburgh lighting vision (summary). IN SCHREUDER, D. A. (Ed.) *Urban sky glow, a worry for astronomy. CIE.* Viena, Austria.

17. BRUCATO, R. (1991) Sky preservation at Palomar Observatory. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 20.

18. BRUDERER, B., PETER, D. & STEURI, T. (1999) Behaviour of migrating birds exposed to x-band radar and a bright light beam. *Journal of Experimental Biology,* 202**,** 1015-1022.

19. BRUNI, D. (1993) City light pollution: its effect on astronomy. *I.A.P.P.P. Communications,* 53**,** 1-8.

20. CALTECH (2009) *Caltech astronomy* [citado: 4 de enero de 2009]; Disponible en: www.astro.caltech.edu.

21. CARRASCO, B. E., CARRAMINANA, A., SANCHEZ-SESMA, F. J. & LERMO, F. J. (1998) Protection of the Observatorio Astrofisico Guillermo Haro. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

22. CHIARA, A. (2003) Sistemi di illuminazione naturale e artificiale e loro integrazione ai fini del comfort visivo e del risparmio energetico. *Università degli Studi di Napoli "Federico II".*

23. CHESTER, J. (1991) The impact of light pollution on amateur astronomy and public awareness of the night sky. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 109.

24. CINZANO, P. (1993) References on Light Pollution and Related Fields. Padova, Department of Astronomy, University of Padova

25. CINZANO, P., FALCHI, F. & ELVIDGE, C. D. (2001) The first world atlas of the artificial night sky brightness. Padova, Department of Astronomy, University of Padova.

26. CINZANO, P. (2003) A laboratory for the photometry and radiometry of light pollution. *Memorie della Società Astronomica Italiana,* 3**,** 312-315.

27. CINZANO, P., FALCHI, F. & ELVIDGE, C. D. (2007) Recent progresses on a second world atlas of the night-sky brightness. Padova, Dipartimento di astronomia, Universita` di Padova.

28. CONNER, D. (2001) Light pollution. *Leicester Mercury.* Leicester, Daily Mail.

29. CORDELL, F. M. (1993) Fun with lasers or street lamps I have known and hated. *I.A.P.P.P. Communications,* 51**,** 20-24.

30. COSTERO, R. (1991) Light Pollution at the Astronomical Observatories in Mexico. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 45.

31. CRAWFORD, D. L. & HUNTER, T. B. (1990) The battle against Light Pollution. *Sky and Telescope,* 1**,** 23-29.

32. CRAWFORD, D. L. (1991) Light Pollution-A problem for Us All *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 7-10.

33. CRAWFORD, D. L. (1994) Light Pollution: Theft of the night. IN IAU (Ed.) *IAU/COSPAR/ICSU/UNESCO Meeting, Adverse environmental impacts on Astronomy: an esposition.* Paris.

34. CRAWFORD, D. L. (1998) Light Pollution: The Problem, the Solutions. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

35. DI SORA, M. (1993) Light Pollution, problems and propositions (from Italy a resolutive participation). *Memorie della Società Astronomica Italiana,* 64**,** 173-177.

36. DOLSA, A. G. & ALBARRÁN, M. T. (1998) La problemática de la contaminación lumínica en la conservación de la biodiversidad. Barcelona, Departament de medi ambient, Generalitat de Catalunya.

37. ELVEY, C. T. & ROACH, F. E. (1937) A photoelectric study of the light from the night sky. *The Astrophysical Journal* 85**,** 213-241.

38. FERNÁNDEZ, D. (2000) Pilot program on the evaluation and reduction of light pollution in Catalonia. Barcelona, Universitat de Barcelona.

39. FLETCHER, J. M. & CRAMPTON, D. (1973) An astronomical view of high-pressure sodium lamps. *Publications of the ASP,* 85**,** 1-3.

40. GAI, M., CAROLLO, D., DELBÒ, M., LATTANZI, M. G., MASSONE, G., BERTINETTO, F., MANA, G. & CESARE, S. (2001) Location accuracy limitations for CCD cameras. *Astronomy & Astrophysics* 367**,** 362-370.

41. GAL, G., LOEW, E. R., RUDSTAM, L. G. & MOHAMMADIAN, A. M. (1999) Light and diel vertical migration: spectral sensitivity and light avoidance by Mysis relicta. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,* 56**,** 311-322.

42. GARSTANG, R. H. (1984) Improved scattering formula for calculations of artificial night-sky illumination. *The Observatory,* 104**,** 196-197.

43. GARSTANG, R. H. (1984) Model for Artificial Night-Sky Illumination. *Bulletin of the American Astronomical Society,* 16**,** 904.

44. GARSTANG, R. H. (1985a) Brightness of the Denver night sky glow by comparison with moonlight. *Announcer, American Association of Physics Teachers,* 15**,** 54.

45. GARSTANG, R. H. (1985b) Visibility of stars in daylight. *Journal of the British Astronomical Association,* 95**,** 133.

46. GARSTANG, R. H. (1986) Model for artificial night-sky illumination. *Publications of the ASP,* 98**,** 364-375.

47. GARSTANG, R. H. (1988) Predictions of seasonal variations in night sky brightnesses. *The Observatory,* 108**,** 159-161.

48. GARSTANG, R. H. (1991) Light Pollution Modeling. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 56-69.

49. GARSTANG, R. H. (1992) Further light pollution calculations. *Bulletin of the American Astronomical Society,* 24**,** 740.

50. GARSTANG, R. H. (1993) Light pollution and lighting technology. *Bulletin of the American Astronomical Society,* 25**,** 1306.

51. GARSTANG, R. H. (2001) Night-time Brightness of Clouds over a City. *Bulletin of the American Astronomical Society,* 33**,** 786.

52. GARSTANG, R. H. (2006) Brightness of Clouds at Night over a City *Bulletin of the American Astronomical Society,* 38.

53. GREEN, D. W. E. (1992) Magnitude corrections for atmospheric extinction. *International Comet Quarterly,* 14**,** 55-59.

54. GREEN, D. W. E. (1997) Some additional Thoughts on light pollution. *The Observatory,* 117**,** 229-231.

55. GREEN, D. W. E. (1998) Astronomers and light pollution. *Sky and Telescope,* 95**,** 10-11.

56. GRIFFIN, D. M. (1998) Light pollution: Efforts to bring back the night sky. Islas Virgenes, EUA, Department of planning and natural resources. Division of fish and wildlife light pollution.

57. HÄNEL, A. (2002) The situation of light pollution in Germany. Alemania, Museum am Schölerberg, natur und umwelt planetarium.

58. HAYES, D. S. & LATHAM, D. W. (1975) A rediscussion of the atmospheric extinction and the absolute spectral-energy distribution of VEGA. *Astrophysical Journal,* 197**,** 593-601.

59. HENDRY, A. (1984) Light Pollution: a status report. *Sky and Telescope,* 67**,** 504-507.

60. HERRANZ, C. (2007) Por una nueva cultura de la luz. *Revista profesiones,* 110**,** 54-55.

61. HERRANZ, C. (2002) El impacto ambiental de la iluminación nocturna artificial. *Gorosti,* 17**,** 27-44.

62. HOAG, A. A. (1972) Observatories and City Lights - One city Fights light Pollution. *Mercury,* 1**,** 2-3.

63. HOAG, A. A. (1976) City sky-glow monitoring at Kitt Peak.II. *Publications of the ASP,* 88**,** 207-208.

64. HOAG, A. A. (1985) Identification and protection of existing and potential observatory sites. International astronomical union.

65. HOAG, A. A. (1986) Identification and protection of existing and potential observatory sites. *XIX General Assembly of the International Astronomical Union.* New Delhi, India.

66. HOLLAN, J. (2002) Light pollution quantification. Brno, N. Copernicus Observatory and Planetarium in Brno.

67. HOLMES, R. W. (1997) The purpose of road lighting. *The Observatory,* 117**,** 25-30.

68. HUNTER, T. & CRAWFORD, D. (1991) The economics of light pollution. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 89-96.

69. IAC (2002) Resumen de recomendaciones para la iluminación de instalaciones de exteriores o en recintos abiertos. San cristóbal de la laguna.

70. IDA. (2007) *The International Dark-Sky Association*. [citado: 12 de abril de 2007]; Disponible en: www.darksky.org.

71. IIZUKA, T. & ISOBE, S. (1998) A comparison of night sky brightness under ordinary urban lighting and during light-down periods in Kyoto City. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

72. IRWIN, J. & BRIDGES, T. (2007) Preserving the Starry Sky. Ontario, Canada, Deptartment of Physics, Engineering Physics, & Astronomy, Queen's University.

73. JIANG, S. Y. (1991) Environmental Conditions of Chinese Astronomical Observatories: past, present and future. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 33.

74. JOSEPH, J. H., KAUFMAN, Y. J. & MEKLER, Y. (1991) Urban light pollution: the effect of atmospheric aerosols on astronomical observations at night. *Applied optics,* 30**,** 3047-3058.

75. KALINOWSKI, J. K., ROOSEN, R. G. & BRANDT, J. C. (1995) The night sky brightness at McDonald Observatory. *Publications of the ASP,* 87**,** 869-876.

76. KAWAKAMI, K. & ISOBE, S. (1998) A Study of Luminous Intensity Distributions of Lighting Lamps. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving the Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

77. KOCIFAJ, M. (2007) Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Applied optics,* 15**,** 3013-3022.

78. KOVALEVSKY, J. (1998) Environmental Disturbances of Astronomical Observations. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

79. KRISCIUNAS, K. & SCHAEFER, B. E. (1991) A model of the brightness of moonlight. *Publications of the ASP,* 103**,** 1033-1039.

80. LABOY, V. M. (2007) El problema de la contaminación lumínica. Quebradillas, Puerto Rico, Escuela superior Juan de Arizmendi.

81. LARKIN, R. P. & SZAFONI, R. E. (2008) Evidence for widely dispersed birds migrating together at night. *Integrative and Comparative Biology,* 48**,** 40-49.

82. LENOBLE, J. (1985) *Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures*, A. Deepak Publishing.

83. LEWIS, R. A. (1991) Light Pollution: "light" at the end of the tunnel? *Astronomy Now,* 4**,** 175.

84. LINDLEY, D. (1998) Keeping astronomers in the dark. *Nature,* 331**,** 205.

85. LMT. (2009) *LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin.* [citado : 6 de noviembre de 2006]; Available Disponible en: www.lmt-berlin.de.

86. LONGCORE, T. & RICH, C. (2004) Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environmen,* 2**,** 191-198.

87. LOUISTISSERAND, S., BÜCHER, A., KOUTCHMY, S. & LAMY, P. (1987) Night sky optical spectrum from a high altitude observatory. *Astronomy & Astrophysics Supplement Series,* 68**,** 539-543.

88. MADRID, J. A. (2009) Contaminación lumínica y salud humana, luz y cronodisrupción. *1ra jornada sobre contaminación lumínica en la región de Murcia.* Murcia, España.

89. MARTÍNEZ, M. (2001) Diseño de un colorímetro triestímulo a partir de una cámara CCD-RGB. *Departamento de óptica y optometría.* Barcelona, Universitat Politècnica de Cataluña.

90. MASSEY, P., GRONWALL, C. & PILACHOWSKI, C. A. (1990) The spectrum of the Kitt Peak Night Sky. *Publications of the ASP,* 102**,** 1046-1051.

91. MATTILA, K., VÄSÄINEN, P. & APPEN-SCHNUR, G. F. O. V. (1996) Sky brightness at the ESO La Silla Observatory 1978 to 1988, . *astronomy & Astrophysics Supplement Series,* 119**,** 153-170.

92. MOORE, M. V., PIERCE, S. M., WALSH, H. M., KVALVIK, S. K. & LIM, J. D. (2000) Urban light pollution alters the diel vertical migration of Daphnia. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie,* 27**,** 1-4.

93. MURDIN, P. & SANCHEZ, F. (1987) Protection of the observatories of the Canary Islands. *Identification, optimization, and protection of optical telescope sites***,** 203-206.

94. MURDIN, P. (1992) Protection of observatories: the legal avenues. *The protection of astronomical and geophysical sites***,** 159-207.

95. MURDIN, P. (1994) The Aims of Astronomy in Science and the Humanities: Why Astronomy Must Be Protected. IN IAU (Ed.) *IAU/COSPAR/ICSU/UNESCO Meeting, Adverse environmental impacts on Astronomy: an esposition.* Paris.

96. MUSKOKA HERITAGE FOUNDATION. (2008) *Ecology of the night.* [citado: 3 de julio de 2008]; Disponible en: www.muskokaheritage.org/ecology-night/.

97. NARISADA, K. & SCHREUDER, D. (2004) *Light pollution hand book*, Springer.

98. NAWAR, S., MORCOS, A. B., METWALLY, Z. & OSMAN, A. I. I. (1998) Light Pollution and Night Sky Brightness over the Entire Sky at Kottamia Observatory Site. IN SYUZO, I. & H., T. (Eds.) *Preserving the Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

99. NRAO (2009) *National Radio Astronomy Observatory*. [citado: 7 de ocrubre de 2008]; Disponible en: www.nrao.edu/.

100. OPTE-E-MA. (2006) *OPTE-E-MA Engineering GmbH.* [citado: 8 de octubre de 2006 a 12 de abril de 2007]; Disponible en: www.opteema.de.

101. ORELLANA, D. (2006) Determinación de la contaminación lumínica de los cielos de la Serena y Coquimbo. La Serena, Chile, Red de estudiantes de la serena.

102. OSTERBROCK, D. E., WALKER, M. F. & KOSKI, A. T. (1976) The spectrum of light pollution at Mount Hamilton. *Publications of the ASP,* 88**,** 349-352.

103. OSTERBROCK, D. E. & MARTEL, A. (1992) Sky spectra at a light-polluted site and the use of atomic and OH sky emission lines for wavelength calibration. *The Astronomical Society of the Pacific, Publications* 104**,** 76-82.

104. PERCY, J. R. (1998) Preserving the Astronomical Windows by/for Education and Culture. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving the Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

105. PHOTO RESEARCH (2006) *Photo Research, Inc*. [citado: 7 de agosto de 2006 a 18 de abril de 2007]; Disponible en: www.photoresearch.com.

106. PUKKALA, E., OJAMO, M., RUDANKO, S. L., STEVENS, R. G. & VERKASALO, P. K. (2006) Does Incidence of Breast Cancer and Prostate Cancer Decrease with Increasing Degree of Visual Impairment. *Cancer Causes Control,* 17**,** 573–576.

107. QUERCI, F. R. & QUERCI, M. (1998) A Method for Searching Potential Observing Sites. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving the Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

108. RAEVEL, P. & LAMIOT, F. (1998) Incidences de l'éclairage artificiel des infrastructures routières sur les milieux naturels Nord-Pas-de-Calais, Francia, Direction environnement, énergie et déchets.

109. RAINE, H., BORG, J. J., RAINE, A., BAIRNER, S. & CARDONA, M. B. (2007) Light pollution and its effect on Yelkouan Shearwaters in Malta; causes and solutions. Malta, Bird Life Malta.

110. RASC (2009) *RASC Kingston Centre - Responsible Lighting*. [citado: 10 de septiembre de 2009]; Disponible en: http://kingston.rasc.ca/Committees/lighting.php.

111. RICH, C. & LONGCORE, T. (2006) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting,* Washington, EUA, Island Press.

112. RIEGEL, K. W. (1973) Light Pollution: Outdoor lighting is a growing threat to astronomy. *Science,* 179**,** 1285 - 1291.

113. ROBINSON, W. T. (1991) Outdoor lighting in Tucson: A photo record *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 18.

114. RODIL, F. (2007) Mapa lumínico del territorio de México. México, UNAM.

115. ROL DE LAMA, A. & MADRID, J. A. (2009) Contaminación lumínica y salud: el lado oscuro de la luz. *1ra jornada sobre contaminación lumínica en Murcia.* Murcia, España.

116. SAN MARTÍN, R. (2003) Contaminación lumínica en España. *Revista de la Dirección Conservación de la Energía,* 1**,** 12-14.

117. SCHERNHAMMER, E. S., LADEN, F., SPEIZER, F. E., WILLETT, W. C., HUNTER, D. J., KAWACHI, I. & COLDITZ, G. A. (2001) Rotating night shifts and risk of breast cancer in women participating in the nurses' health study. *Journal of the national cancer institute,* 93**,** 1563-1568.

118. SCHNEEBERGER, T. J., WORDEN, S. P. & BECKERS, J. M. (1979) The night sky conditions at the Sacramento Peak Observatory. I - Sky brightness. *Publications of the ASP,* 91**,** 530-532.

119. SCHREUDER, D. (1991) Lighting near astronomical observatories. Viena, Austria, CIE, Technical Committee.

120. SIERRA, C. (2002) Aplicaciones luminotécnicas de cámaras digitales. *Departamento de Proyectos de Ingeniería.* Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

121. SMITH, F. G. (1982a) Identification and protection of existing and potential observatory sites. *Transactions of the International Astronomical Union,* 18**,** 667.

122. SMITH, F. G. (1982b) Identification and protection of existing and potential observatory sites. IN WEST, R. M. (Ed.) *XVIII General Assembly of the International Astronomical Union* Patras, Grecia.

123. SNL. *Starry Night Lights.* 2009 [citado: 2 de octubre de 2009]; Disponible en: www.starrynightlights.com.

124. SNYDER, D. L., HELSTROM, C. W., LANTERMAN, A. D., FAISAL, M. & WHITE, R. L. (1995) Compensation for readout noise in CCD images. *Journal of the Optical Society of America* 12**,** 272-283.

125. SPERLING, N. (1991) The disappearance of darkness. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 101-108.

126. STALIN, C. S., ANUPAMA, G. C., SAHU, D. K., PRABHU, T. P., BHATT, B. C., PARIHAR, P. S. & HEGDE, M. (2008) Night sky at the Indian Astronomical Observatory during 2000-2008. *Bulletin of the Astronomical Society of India,* 36**,** 111-127.

127. STROBEL, N. (2010) *Astronomy Notes.* [citado: 5 de diciembre de 2009]; Disponible en: www.astronomynotes.com.

128. SULLIVAN, W. T. (1991) Earth at Night: An image of the Nighttime Earth Based on Cloud-free Satellite Photographs. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 11-17.

129. TANNER, A. (1991) Light Trespass. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 85-88.

130. TECHNOTEAM. (2007) *TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH*. [citado: 5 de septiembre de 2006 a 19 de abril de 2007]; Disponible en: www.technoteam.de.

131. THOMAS, R. W. L., MODALI, S. B. & ROOSEN, R. G. (1973) Estimates of the light pollution effect for realistic atmospheres. *Bulletin of the American Astronomical Society,* 5**,** 391.

132. TREANOR, P. J. & SALPETER, E. (1972) A Portable Night-Sky Photometer. *The Observatory,* 92**,** 96-99.

133. TREANOR, P. J. (1973) A simple propagation law for artificial night-sky illumination. *The Observatory,* 93**,** 117-120.

134. TRITTON, K. P. (1997) Astronomical Requirements for limiting lighting pollution. *The Observatory,* 117**,** 10.

135. UNIHEDRON. (2007) *Unihedron.* [citado: 22 de mayo de 2007]; Disponible en: www.unihedron.com.

136. UPGREN, A. R. (1992) Night sky brightness from visual observations II. A visual photometer. *The Journal of the American Association of Variable Star Observers,* 20**,** 244-247.

137. UPGREN, A. R. (1996) Dissecting light pollution. *Sky and Telescope,* 92**,** 44-46.

138. VAN BERGEM-JANSEN, P. M., VOS, J. & ALFERDINCK, J. W. A. M. (1996) Nuisance from tennis-court Lighting experienced by surrounding residents. Amsterdam, Holanda, Nr TM.

139. VAN DER BERGH, S. (1987) Identification and protection of existing and potential observatory sites, International astronomical union.

140. VAN DER BERGH, S. (1988) Identification and protection of existing and potential observatory sites. IN MCNALLY, D. (Ed.) *XX General Assembly of the International Astronomical Union.* Baltimore, EUA.

141. VARELA, A. M., MUÑOZ-TUÑÓN, C., FUENSALIDA, J. J., GARCÍA-LORENZO, B. & EFF-DARWICH, A. (2005) Calima anticiclónica y mar de nubes: implicaciones en los observatorios de canarias. *XI Congreso nacional de teledetección.* Tenerife, España.

142. WALKER, C. et al (2003) Determinación de la Contaminación Lumínica en el cielo de Tucsón, Arizona. Tucson, EUA, Departamento de ciencias de la preparatoria Tucson high, La secundaria vail y el programa de educación de NOAO.

143. WALKER, M. F. (1970) Light pollution model. *Publications of the ASP,* 82**,** 672.

144. WALKER, M. F. (1973) Light pollution in California and Arizona *Publications of the ASP,* 85**,** 508-519.

145. WALKER, M. F. (1976) Identification and protection of existing and potential observatory sites. International astronomical union.

146. WALKER, M. F. (1977a) Identification and protection of existing and potential observatory sites. IN MULLER, E. A. & JAPPEL, A. (Eds.) *XVI General Assembly of the International Astronomical Union.* Grenoble, Francia.

147. WALKER, M. F. (1977b) The effects of urban lighting on the brightness of the night sky. *Publications of the ASP,* 89**,** 405-409.

148. WALKER, M. F. & CAYREL, R. (1979) Identification and protection of existing and potential observatory sites. International astronomical union.

149. WALKER, M. F. (1984) High quality astronomical sites around the world. IN ARDEBERG, A. & WOLTIER, L. (Eds.) *Site Testing for Future Large Telescopes.* La silla, Chile.

150. WIENOLD, J. & CHRISTOFFERSEN, J. (2006) Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings* 38**,** 743-757

151. World Wildlife Fund (2010). *My earth hour.* [citado: 2 de abril de 2010]; Disponible en: www.myearthhour.org.

152. WU, C.-H. & ANDERSON, J. M. M. (1997) Novel deblurring algorithms for images captured with CCD cameras. *Journal of the Optical Society of America,* 14**,** 1421-1430.

153. XU, G. (2007) Double-layer film structure filming glass without light pollution. Guangzhou, China, Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences.

Segunda Parte

Caracterización de la la contaminación lumínica

En este apartado se analizan las metodologías que hasta el momento se han realizado con el objetivo de la medición de la contaminación lumínica.

INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de este trabajo fue el de desarrollar un modelo matemático que nos ayude predecir la contaminación lumínica a diferentes puntos del foco contaminante. Por lo tanto, se consideró necesario realizar un análisis de los modelos y metodologías que actualmente existen para determinar los aspectos y características que los conformaban. Este análisis sirvió como soporte de la investigación de laboratorio y para determinar las aportaciones que se logran con el modelo propuesto.

Ya se comentó anteriormente como la medición de la contaminación lumínica tuvo sus orígenes a principios del siglo 20. Si bien es cierto que el fenómeno empezó a estudiarse con mayor interés a partir de los años setenta, anteriormente se tiene conocimiento de investigadores que se interesaban por esa aurora que se veía por encima de las ciudades. Elvey y Roach (1937) realizaron una investigación con el objetivo de analizar las variaciones de luminancia que se experimentaban en el cielo nocturno. Se utilizó un fotómetro fotoeléctrico y se obtuvieron mediciones de diferentes horas de la noche y en diferentes temporadas.

Las divisiones de este apartado, estructurado a manera de estado de arte, se muestra a continuación:

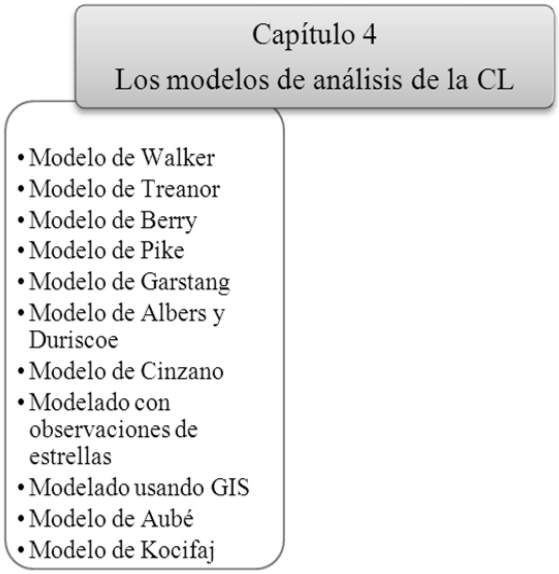


Fig.4.0 Esquema divisional del estado del arte

CAPÍTULO 4. LOS MODELOS DE ANÁLISIS DE LA CL

4.1. Modelo de Walker

Sin embargo, los modelos matemáticos desarrollados con el objetivo del análisis de la contaminación lumínica surgieron después que el modelo de Elvey y Roach (1937), mencionado anteriormente. El primero que lo hizo fue Walker (1970) que presentó un modelo que toma en cuenta la cantidad de población de las ciudades y su relación con la contaminación lumínica y lo aplicó posteriormente en investigaciones prácticas (Walker, 1977). El modelo también se basa en la distancia que existe entre la ciudad y el observador.

Las investigaciones de Walker se enfocaron en localizar los observatorios futuros, espacios con iluminación natural nocturna, y en reglas para localizar actualmente los cielos no contaminados. Se buscaba desarrollar una fórmula empírica con la cual fuera posible encontrar los lugares más adecuados para las observaciones astronómicas. (Walker, 1970).

Básicamente se basa en identificar las ciudades por su número de habitantes y asignar un promedio de flujo lumínico por persona en base a la experiencia del autor, por lo tanto se puede argumentar que el modelo es empírico. Aunque esta relación fue demostrada en algunas ocasiones con modelos de correlación paramétrica, fig. 4.1. Para determinar el efecto de la distancia en la afectación de los focos contaminantes -es decir ciudades-, se basa en la fórmula de la ley de la inversa de los cuadrados de la distancia. Aunque es importante notar que el exponente de la distancia que utiliza Walker (1970) es 2,5 y no el 2 de la ley de la inversa de los cuadrados de la distancia. Se podría asumir que la absorción de la luz por la atmósfera desempeña un papel en este caso. (Narisada & Schreuder, 2006).

La fórmula se presenta a continuación:

$$\boldsymbol{I = CPd^{-2.5}} \qquad (1)$$

Donde:

$\boldsymbol{I}$ =Índice de contaminación lumínica
$\boldsymbol{C}$=Constante (Estimación del flujo lumínico que presenta cada habitante de una población)
$\boldsymbol{P}$=Población (Número de habitantes)
$\boldsymbol{d}$ =Distancia (Dependiendo del punto que se quiera calcular)

Fue aplicado posteriormente con buenos resultados en ciudades de California (EUA).

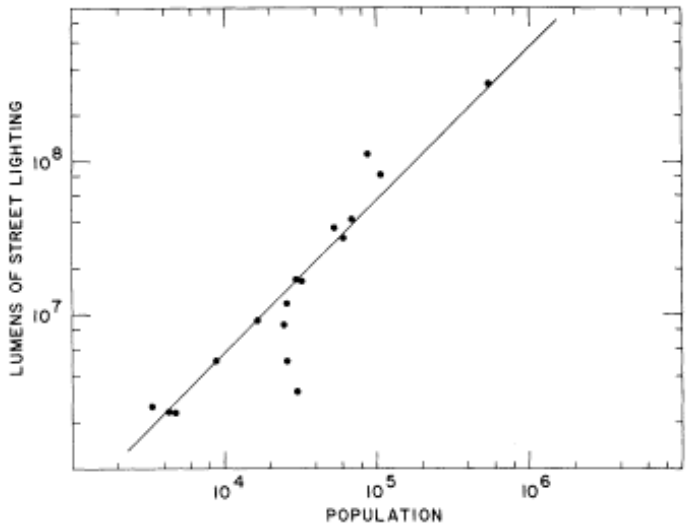


Fig. 4.1 Relación entre población y lúmenes de iluminación de calles de ciudades de California –EUA- con el modelo de Walker. (Walker, 1977)

Entre las ventajas que encontramos es que es relativamente fácil de usar, representa una buena aproximación y tiene solidas bases empíricas (Shirkey, 2006). -Al ser una buena aproximación al efecto del fenómeno, se utilizó en este trabajo en la localización de focos contaminantes; esto se verá más adelante en el apartado de desarrollo de la investigación-. Sin embargo, por otra parte es sabido que no todas las ciudades poseen el mismo flujo emitido hacia el cielo -como lo afirma el modelo de Walker- y como una desventaja principal encontramos que no toma en cuenta la dispersión y la extinción de las partículas en suspensión.

4.2. Modelo de Treanor

Poco tiempo más tarde, Treanor (1973) se basó en la fórmula de Walker y la mejoró introduciendo factores que correspondían a la dispersión que sufre la luz por las moléculas en suspensión (Shirkey, 2006). Todo modelo lumínico debe considerar la dispersión por aerosoles a través de una atmósfera homogénea. (Treanor, 1973).

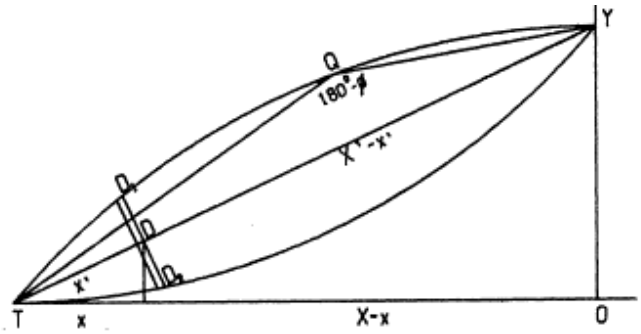


Fig. 4.2 Esquema de la propagación de la iluminación de la ciudad con el modelo de Treanor (1973)

La fórmula se presenta a continuación.

$$\boldsymbol{P = \frac{L(r)}{L(N)} = \left(\frac{A}{r} + B/r^2\right) exp(-k/r)} \quad (2)$$

Donde:

$\boldsymbol{p}$ =Población

$\boldsymbol{r}$ = Distancia del observador

$\boldsymbol{A = 1,8\ x\ 10 - 5\ .\ p}$

$\boldsymbol{B = 13,6\ x\ 10 - 5.\ p}$

$\boldsymbol{k = 0.026}$ Coeficiente de extinción de los aerosoles

El modelo de Treanor (1973) se utilizó posteriormente para calcular la contaminación lumínica en regiones de Italia. (Treanor, 1974).

Como ventajas principales en este modelo encontramos que toma en cuenta una aproximación para la extinción atmosférica, es relativamente fácil de usar, mejora en algunos aspectos la fórmula de Walker y considera a las ciudades como una fuente puntual de luz. (Shirkey, 2006). Sin embargo podemos observar que continúa proponiendo un flujo lumínico por población, no toma en cuenta otras partículas en suspensión y solo se basa en ciudades italianas para establecer constantes.

4.3. Modelo de Berry

Años más tarde, Berry (1976) tomó la fórmula de Treanor (1973) y le agregó cambios para determinar la contaminación producida por el brillo del Zénit de la luz proveniente de pequeñas ciudades, aplicándolo en diferentes regiones de Canadá. Se obtuvieron, derivados de datos visuales y fotoeléctricos, el brillo del cielo (relacionado al número de pobladores de las ciudades), y una función de distancia para el promedio de condiciones atmosféricas. Estas funciones fueron usadas en un modelo matemático simple, para calcular los niveles de contaminación lumínica en Ontario.

El modelo puede observarse a continuación.

$$\boldsymbol{I = a\sqrt{P}\left(bD^{-2} + cD^{-1}\right)e^{-kD} \quad D = \sqrt{D^2 + h^2}} \quad (3)$$

Donde:

I = Brillo del cielo

P = Población

D = Distancia

h = Altura de la capa de dispersión

a = Constante relacionada al número de población de los focos contaminantes

b y c = Constantes

k = Coeficiente de extinción por aerosoles

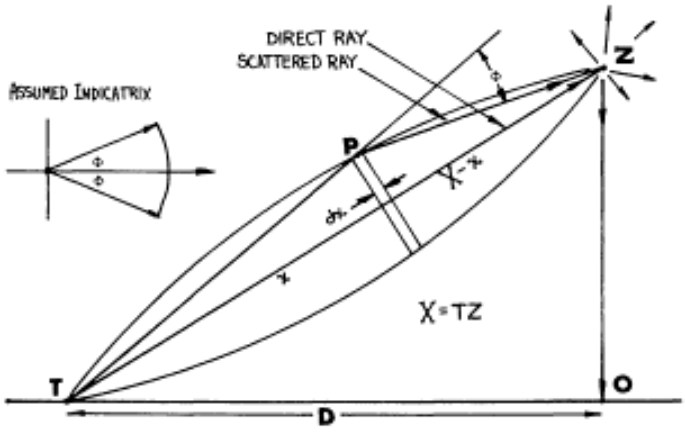


Fig. 4.3 Esquema del modelo de Berry. (Berry 1976)

De nuevo encontramos como ventajas en este modelo, el hecho de tomar en cuenta la extinción atmosférica de la luz y el hecho de que considera a las ciudades como una fuente puntual de luz (Shirkey, 2006). Sin embargo sigue tomando en cuenta un promedio de flujo lumínico por población sin formular otras partículas en suspensión y solo se basa en Ontario para proponer constantes. En realidad solo es una nueva utilización del modelo de Treanor, (1974).

4.4. Modelo de Pike

En ese mismo año, en el mes de Junio, Pike (1976), desarrolló un segundo modelo de la propagación y de la dispersión de la luz en la atmósfera. Éste modelo se utilizó para calcular las contribuciones de la contaminación lumínica de cada ciudad en Ontario meridional y su vecindad**.** En realidad fue el mismo modelo que propuso Berry (1976), sin embargo Pike computó los resultados.

Para el tratamiento experimental de los datos utilizó un programa básico computacional. El programa realizaba gráficos de acuerdo a los datos que arrojaba y de esta manera se realizaban los mapas lumínicos. El objetivo principal de la realización del modelo mencionado, fue el de realizar una proyección a futuro del crecimiento de la contaminación lumínica en Ontario.

El modelo se muestra a continuación.

$$B = a\sqrt{p}\left(\frac{u}{D^2 + h^2} + \frac{v}{\sqrt{D^2 + h^2}}\right)\exp\left(-k\sqrt{D^2 + h^2}\right) \quad (4)$$

Donde:

B = Brillo del cielo

p = Población de la ciudad

h = Altura efectiva de dispersión

D = Distancia entre el observador y la ciudad

k = Coeficiente de absorción de la atmósfera

u y v = Parámetros empíricos

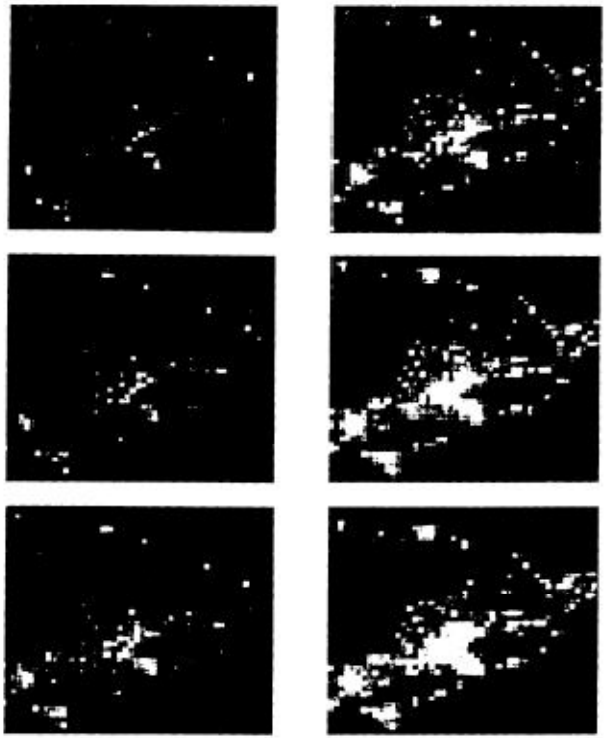


Fig. 4.4 El crecimiento de la contaminación lumínica en Ontario, en intervalos de 5 años, según el modelo de Pike (1976)

Las ventajas que encontramos, además de las mencionadas en el modelo de Berry, es la utilización de programa computacional para el tratamiento de los datos y el hecho de que en este también se toma en cuenta la extinción atmosférica. Y como desventajas encontramos de nuevo que el flujo lumínico se obtiene en base a la población, basándose solo en ciudades de Ontario para el cálculo del flujo lumínico como constante.

4.5. Modelo de Garstang

Garstang (1984), presentó un modelo para la medición de la contaminación lumínica, que representaba el brillo del cielo de noche, basándose en la luminancia del cielo nocturno. Garstang se apoyó en el modelo de Walker (1970) para comprobar sus resultados. El modelo de Garstang también fue realizado con el objetivo de localización de observatorios astronómicos.

La comprobación y el modelo mejorado se dieron a conocer por Garstang (1986) posteriormente, este modelo contaba con algunas características que lo hacían más atractivo que sus antecesores, aunque se continuaba con la estandarización del flujo lumínico por habitante basándose en estimaciones empíricas.

Garstang generaliza a la ciudad como un disco uniforme parecido a una fuente puntual, utiliza una escala de atmósferas tomando en cuenta los aerosoles y moléculas, agrega un parámetro que representa el número de aerosoles, permite un modelado angular de la distribución de luz y toma en cuenta una distribución lambertiana para los reflejos y el flujo lumínico que parte de los focos contaminantes.

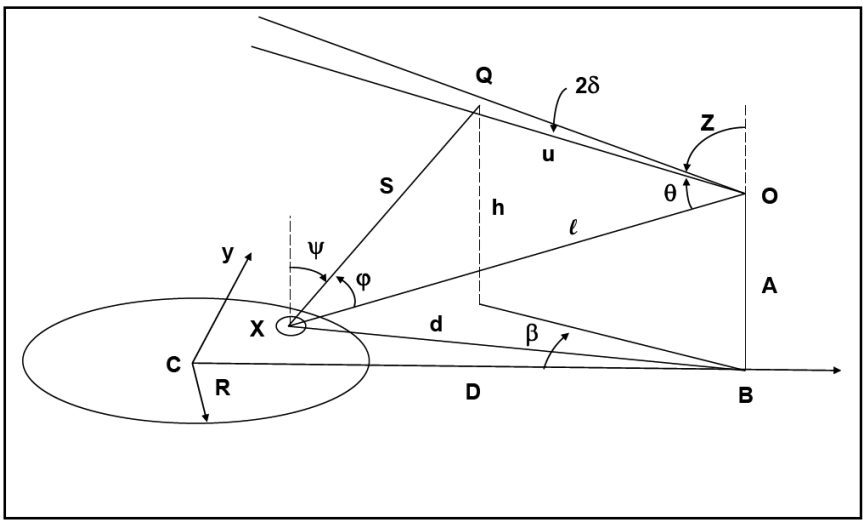


Fig. 4.5 Esquema del modelo de Garstang (1986)

La fórmula del modelo de Garstang se muestra a continuación:

$$\boldsymbol{I = aPUD^{-2}(DS)(EF)} \quad (5)$$

Donde:

$\boldsymbol{DS}$ = Es la dispersión por aerosoles entre la ciudad y la atmósfera
$\boldsymbol{EF}$ = Factor de extinción
$\boldsymbol{a}$ = Constante relacionada con la población
$\boldsymbol{P}$ = Número de habitantes
$\boldsymbol{D}$ = Distancia al observador
$\boldsymbol{U}$ = Constante

Como ventajas encontramos que toma en cuenta los aerosoles y otras partículas en suspensión. Como desventajas podemos mencionar que sigue relacionando flujo lumínico con la población y no incluye los efectos de las nubes. (Shirkey, 2006).

4.6. Modelo de Albers y Duriscoe

Pasaron varios años para que volviera a surgir una nueva propuesta para la caracterización de la contaminación lumínica. Albers y Duriscoe (2001) manifestaron que el clima y los aerosoles suspendidos en el ambiente, también tienen una cegada relación con el modelado de la contaminación lumínica. Estos investigadores se basaron el modelo de Walker (1970) para realizar uno nuevo que también tomara en cuenta el número de personas por ciudad en relación al flujo lumínico. La diferencia es que ellos se apoyaron en la curvatura de la tierra y lo incluyeron dentro de la fórmula. Con esta ecuación realizaron mapas lumínicos alrededor de todo el país (EUA). El modelo de Albers y Duriscoe (2001) se muestra a continuación.

$$\boldsymbol{I = 11300000\, pr^{-2{,}5}} \quad (6)$$

Donde:

$\boldsymbol{I}$ = Brillo del cielo en Nanolamberts
$\boldsymbol{p}$ = Población de la ciudad
$\boldsymbol{r}$ = Distancia del observador a la ciudad en metros

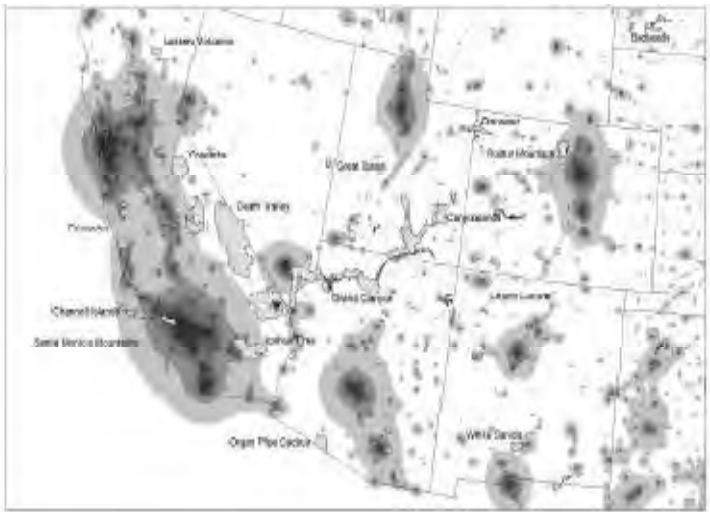


Fig. 4.6 Mapa lumínico obtenido con el modelo de Albers y Duriscoe (2001)

Encontramos como ventaja el hecho de incluir la curvatura de la tierra que afecta a grandes distancias. Como desventajas vemos que, al igual que el modelo de Wallker (1970), estandariza las ciudades y se le da un trato empírico a la atmósfera.

4.7. Modelo de Cinzano

Cinzano, Falchi y Elvidge (2001) presentaron el primer atlas de brillo artificial nocturno. De acuerdo con datos basados en los satélites de alta resolución de DMSP y en un modelado exacto de la propagación de luz en la atmósfera; mostrando de ésta manera visual, la forma en que el ser humano se está envolviendo en esa niebla luminosa conocida como contaminación lumínica. Se fundamentaron en modelos de visión e imágenes proporcionadas por satélites artificiales de diferentes países.

Fig. 4.7 Extracto del atlas de brillo artificial nocturno.
(Cinzano, Falchi & Elvidge 2001)

Un año después, también Cinzano (2002), en el tema de modelado, realzó investigaciones enfocadas en la luminancia artificial producida por la iluminación directa de partículas y de moléculas atmosféricas en la línea de mira y por la luz dispersada. Al respecto presentó una forma de modelado de la contaminación lumínica proveniente de la iluminación de carreteras. Lo llevo a cabo analizado, con un modelo simple, la dispersión de la luminancia artificial del cielo producida por la contaminación lumínica proveniente de ese tipo de iluminación.

En los últimos años Cinzano, Falchi y Elvidge (2007) están preparando lo que será el segundo atlas de la contaminación lumínica, también basándose en imágenes satelitales proporcionadas por agencias meteorológicas y por la NASA. Los modelos de Cinzano, Falchi y Elvidge (2001, 2007) representan una gran ventaja desde el punto de vista visual, debido a que se está observando el efecto de los puntos de luz alrededor.

Como desventaja encontramos que no presenta evolución de la contaminación lumínica en el tiempo, solo aproximaciones, y que para realizarlo se requirió contar con imágenes satelitales nocturnas, algo que no está al alcance de muchos investigadores.

4.8. Modelado con observaciones de estrellas

Los Astrónomos se percataron de la contaminación lumínica cuando dejaron de ver las estrellas, por lo tanto es pensable que entre mayor es la contaminación lumínica son menores las estrellas que se pueden observar. Pues así fue manifestado en el año 2003 cuando estudiantes de ciencias de la preparatoria Tucson High, la secundaria Vail y el programa de educación de NOAO, Tucsón, realizaron un proyecto para poder modelar la contaminación lumínica utilizando conteos de estrellas. Lo que se hizo fue enfocarse en constelaciones que se pudieran observar fácilmente, ayudándose de plantillas diseñadas con ese propósito, y analizarlas en diferentes circunstancias y noches, encontrándose una relación entre la contaminación lumínica y la visibilidad de las constelaciones (Walker et al, 2003).

Un trabajo más profesional se realizó años antes, en Tokio, Japón. Isobe y Kosai (1998), realizando observaciones fotográficas, desarrollaron un método empírico que se muestra a continuación.

$$m2 = \frac{1}{0.4}\log\left(\frac{10^{\frac{D1}{a}}}{10^{\frac{D2}{a}} - 1}\right) + m1 + 16.3 \tag{7}$$

Donde:

$\boldsymbol{m2}$ = Brillo del cielo nocturno en MagArcseg

$\boldsymbol{m1}$ = Magnitud de la estrella de referencia

$\boldsymbol{D1\ y\ D2}$ = Medidas de densidad

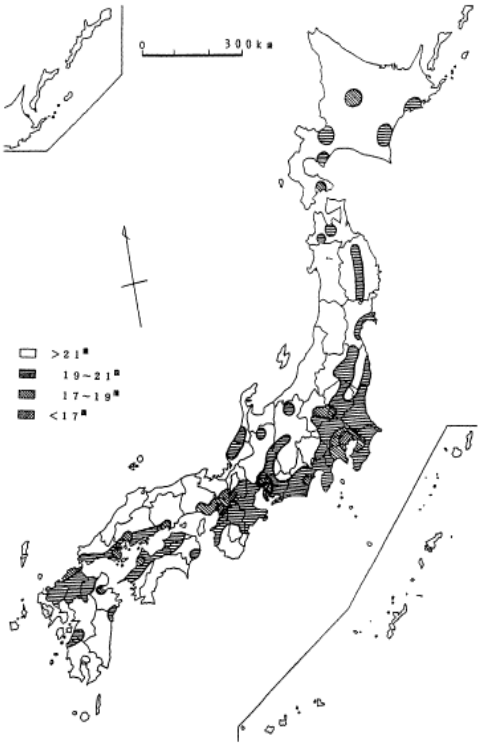


Fig. 4.8 Mapa del brillo del cielo nocturno en Japón según el método de observaciones de estrellas de Isobe & Kosai (1998)

El método de observaciones de estrellas nos da una buena aproximación del problema de la contaminación lumínica y es de fácil uso. Sin embargo, el realizar conteos de estrellas es bastante empírico y pueden varias las interpretaciones de persona en persona y en el caso de realizar observaciones, es necesario conocer las magnitudes de referencia.

4.9. Modelado usando GIS

Posteriormente, Chalkias y Kalogirou (2007) realizaron un modelo que tomaba en cuenta los datos geográficos del área e imágenes tomadas por satélites de noche utilizando la tecnología GIS –Sistemas de información geográfica-. Se enfocaron a estudiar ciudades suburbanas de Atenas.

Tavoosi et al (2009) son otros investigadores que también usan la tecnología de los sistemas GIS para el modelado de la contaminación lumínica. En este caso, ellos se enfocaron en la ciudad ce

Terán y los alrededores. Los resultados de sus investigaciones fueron una serie de mapas en donde se mostraban el crecimiento de la contaminación lumínica en un periodo de 11 años y un mapa de la situación de la contaminación lumínica en Terán.

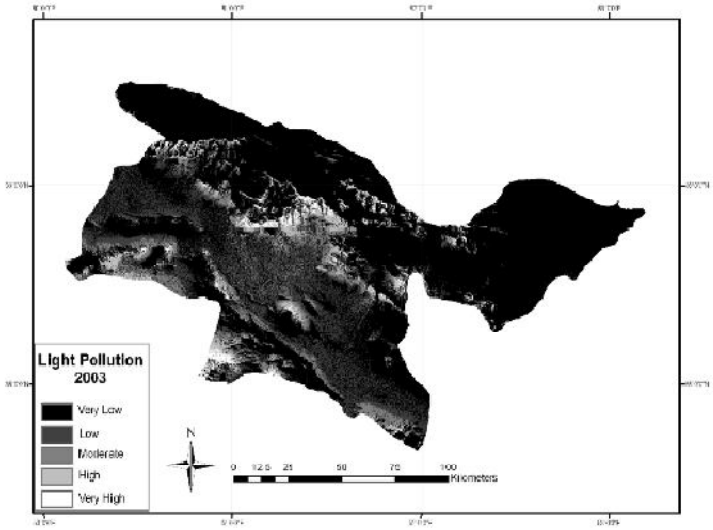


Fig. 4.9 Mapa de la contaminación lumínica en Terán (Tavoosi et al 2009)

El método por GIS nos da la ventaja de tomar en cuenta las características topográficas actuales del lugar estudiado y nos permite tener un mapa de observación. Como desventaja tenemos que también posee solo aproximaciones sobre el crecimiento de la contaminación lumínica, requiriéndose un análisis muy exhaustivo para obtener los mapas y necesitando obtener imágenes satelitales.

4.10. Modelo de Aubé

Otro factor, que aun no se había tomado en cuenta y que presenta una gran importancia, es la orografía o características topográficas del terreno. Aubé (2005) desarrolló un modelo llamado ILLUMINA que toma en cuenta no solo los factores que funcionan para el modelo de Garstang (1986), también utiliza variables como variaciones en la topografía y la reflectancia que presenta la luz.

La primera generación de modelos tiene algunas características que hace que los datos no sean totalmente fiables. Por ejemplo, la mayoría de ellos representa a una ciudad como un círculo perfecto de constante luminosidad y reflectancia. Es decir, no toman en cuenta la orografía del terreno (Aubé 2006). Sin embargo, el modelo que se desarrolló involucra el tener que realizar mediciones in situ tanto de la contaminación lumínica, como de los aerosoles en suspensión en el momento de la medición. (Shirkey 2006).

La fórmula que utiliza Aubé se muestra a continuación.

(8)

Donde:

= Brillo del cielo

= Es la intensidad simple de contaminación lumínica dispersada.

= Es la primera intensidad dispersada después de reflejarse en la bóveda.

= Es la intensidad dispersada de segundo orden.

= Es la intensidad dispersada de segundo orden después de reflejarse en la bóveda.

El modelo de Aubé (2005) presenta una aproximación bastante buena, es quizá el modelo más exacto que existe actualmente, contabilizándose los aerosoles y la contaminación lumínica en tiempo y espacio. Sin embargo, entre las desventajas que presenta se encuentra que no solo utiliza una fórmula o modelo matemático, también se necesita un espectrofotómetro de precio elevado para hacer comparaciones con los datos arrojados y determinar la cantidad exacta de aerosoles. Así también, se necesitan conocimientos especializados para utilizar los instrumentos requeridos y las computaciones pueden tomar días en un ordenador normal según palabras del propio Aubé (2005).

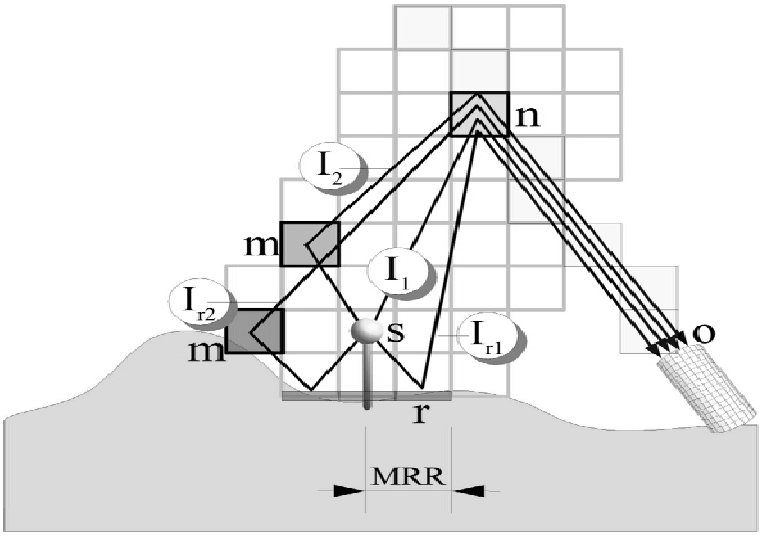


Fig. 4.10 Esquema del modelo Illumina (Aubé 2005)

4.11. Modelo de Kocifaj

Kocifaj (2007) toma en cuenta otro factor de notable importancia: el clima al momento de la medición. Kocifaj publicó un artículo en donde explica acerca de un nuevo modelo, para la

medición de la contaminación lumínica, que acababa de realizar. Éste modelo se enfoca en las fuentes de luz terrestres y su relación con las nubes o condiciones de cielo cubierto. El modelo es utilizable no solo con nubes, también es posible obtener una aproximación de la contaminación lumínica en condiciones de atmósfera despejada. Kocifaj (2007) también utiliza una aproximación para la identificación de las moléculas y aerosoles en suspensión en el ambiente estudiado, y la extinción y dispersión que sufre la luz desde la ciudad hasta el observador. Asimismo realiza tratamientos geométricos para integrar definidamente en altura, tomando en cuenta coordenadas polares para la ciudad.

La ecuación utilizada se muestra a continuación:

$$\boldsymbol{I = ITxRNxTxD + \int_0^H (IGxTxDxh^{-2})\, dh} \tag{9}$$

Donde:

$\boldsymbol{IT}$ = Flujo lumínico de la ciudad

$\boldsymbol{RN}$ = Reflexión de la ciudad

$\boldsymbol{T}$ = Transmisión

$\boldsymbol{D}$ = Dispersión

$\boldsymbol{IG}$= Comportamiento del flujo lumínico tomando en cuenta el modelo de Garstang

$\boldsymbol{h}$ = Altura de la nube o de la capa efectiva de la atmósfera.

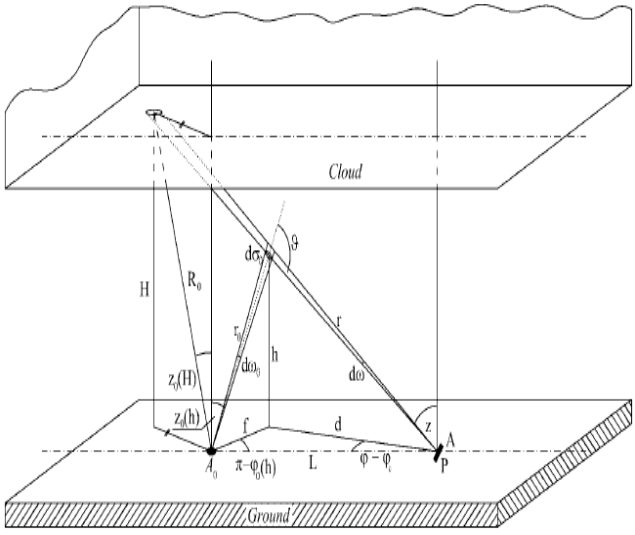


Fig. 4.11 Modelo para la medición de la contaminación lumínica en cielos con nubes (Kocifaj 2007)

Como principal ventaja encontramos que el modelo de Kocifaj (2007) involucra un apartado que toma en cuenta condiciones de nubosidad, involucrando también los aerosoles y moléculas en el ambiente, por lo tanto es de los modelos matemáticos más completos. Aunque también hay que señalar que no se toman en cuenta otras condiciones climatológicas adversas y es un modelo teórico que no ha sido probado prácticamente, solo con simulaciones.

4.12. Conclusiones

Las investigaciones que anteriormente se observaron, corresponden a los modelos que existen actualmente para la caracterización de la contaminación lumínica; estos que han sido probados, acogidos y aprobados por los desarrolladores en diversas investigaciones. Resaltando el modelo de Walker (1970), que a pesar o debido a que es el más antiguo ha sido el más usado. También esto se debe a que es sumamente sencillo de utilizar y representa una aproximación promedio del problema. Por esta razón, en el presente trabajo se ha utilizado como una de las herramientas para la caracterización primaria de los focos contaminantes en el desarrollo de investigación, antes de la recogida de datos. Sin embargo no se recomienda si es necesario modelizar el foco contaminante de una manera precisa, algo que en la propuesta surgida de esta investigación se menciona en varias ocasiones, y posteriormente se analizara la forma más correcta de modelizar el foco. En base a los análisis de los modelos podemos concluir que:

- Ninguno de los modelos analizados realiza una modelización eficiente del foco. Como se mencionó individualmente, algunos solo tienen un estándar por población que hace que los resultados no sean del todo fiables; -no se analizan fotometría de luminarias y lámparas, tampoco características de reflexión en piso y paredes, y no se toman en cuenta las características de la luz perteneciente al foco; aspectos importantes en la contaminación lumínica-.
- Se encontró, especialmente en el modelo de Aube (2005), una precisión que lo hacen quizá el modelo mejor desarrollado de los que se analizaron; sin embargo, como fue comentado de manera individual, el citado modelo conlleva una gran complejidad en su uso llegándose a necesitar un espectroscopio para contabilizar aerosoles y una supercomputadora para generar los resultados.
- Se tiene como una gran ventaja el modelo de Kocifaj (2007) que permite realizar una contabilización de la contaminación lumínica, aunque sin previas pruebas, en ambientes con nubes. Posteriormente se tomaran en cuenta estos aspectos para introducir una propia ecuación en la presente propuesta.

- Ninguno de los modelos fue realizado con el objetivo de estudiar la influencia de la contaminación lumínica en espacios naturales.
- Asimismo, como se examinó individualmente, muchos de los modelos no toman en cuenta las características atmosféricas del lugar analizado.
- Por último, algunos de los modelos son empíricos basándose solo en la experiencia del investigador y no han sido probados cotejando los datos con mediciones reales.

Todos estos factores de peso son algunos de los que motivaron realizar la propuesta de la presente investigación y, como se verá más adelante, se trató de tomar en cuenta dicha evidencia empírica para considerar las desventajas encontradas y que sirvieran de potencial en la realización del modelo planteado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA SEGUNDA PARTE

1. ALBERS, S. & DURISCOE, D. (2001) Modelling light pollution from population data and implications for national park service lands. *George Wright Forum,* 18**,** 56-68.

2. AUBÉ, M., FRANCHOMME-FOSSÉ, L., ROBERT-STAEHLER, P. & HOULE, V. (2005) Light Pollution Modelling and detection in a heterogeneous environment: Toward a night time aerosol optical depth retrieval. IN SPIE (Ed.) *SPIE2005.*

3. BERRY, R. L. (1976) Light pollution in Southern Ontario. *The journal of the royal astronomical society of Canada,* 70**,** 3.

4. CHALKIAS, C., PETRAKIS, M., PSILOGLOU, B. & LIANOU, M. (2006) Modeling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS. *Journal of Environmental Management,* 79**,** 57-63.

5. CINZANO, P., FALCHI, F. & ELVIDGE, C. D. (2001) The first world atlas of the artificial night sky brightness. Padova, Department of Astronomy, University of Padova.

6. CINZANO, P. (2002) Light pollution by luminaires in roadway lighting, . Padova, Department of Astronomy, University of Padova.

7. CINZANO, P., FALCHI, F. & ELVIDGE, C. D. (2007) Recent progresses on a second world atlas of the night-sky brightness. Padova, Dipartimento di astronomia, Universita` di Padova.

8. ELVEY, C. T. & ROACH, F. E. (1937) A photoelectric study of the light from the night sky. *The Astrophysical Journal* 85**,** 213-241.

9. GARSTANG, R. H. (1984) Improved scattering fórmula for calculations of artificial night-sky illumination. *The Observatory,* 104**,** 196-197.

10. GARSTANG, R. H. (1986) Model for artificial night-sky illumination. *Publications of the ASP,* 98**,** 364-375.

11. ISOBE, S. & KOSAI, H. (1998) Star Watching Observations to measure Night Sky Brightness. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

12. KOCIFAJ, M. (2007) Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Applied optics,* 15**,** 3013-3022.

13. NARISADA, K. & SCHREUDER, D. (2004) *Light pollution hand book*, Springer.

14. PIKE, R. (1976) A Simple Computer Model for the Growth of Light Pollution. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 70**,** 116-126.

15. 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.

16. TAVOOSI, H., DARVISHZADEH, R., SHAKIBA, A. & MIRBAGHERI, B. (2009) modelling light pollution in suburbs using remote sensing and gis *The seventh International Conference on Urban Climate.* Yokohama, Japan.

17. TREANOR, P. J. (1973) A simple propagation law for artificial night-sky illumination. *The Observatory*, 93**,** 117-120.

18. TREANOR, P. J. (1974) Artificial night sky brightness in Italy. Padova, OAN.

19. WALKER, M. F. (1970) Light pollution model. *Publications of the ASP*, 82**,** 672.

20. WALKER, M. F. (1977b) The effects of urban lighting on the brightness of the night sky. *Publications of the ASP*, 89**,** 405-409.

Tercera Parte

Desarrollo de la investigación

En éste apartado exploraremos la metodología que se llevó a cabo para el desarrollo de la investigación. Se explicaran los instrumentos utilizados para el levantamiento y análisis de los datos. Se explicarán las cuatro recogidas experimentales de datos y los resultados preliminares de cada una de ellas. Por último, se lleva a cabo un análisis de los resultados de la recogida experimental de datos.

INTRODUCCIÓN

Esta segmento, planteado a manera de desarrollo de la investigación, constituye la parte central de este trabajo, y contiene la representación de las búsquedas sistemáticas que se realizaron con el objetivo de resolver el problema planteado; después de haber fundamentado bibliográficamente el problema y en los que se apoyaron las propuestas y conclusiones posteriores.

En el primer capítulo de este apartado se presenta la metodología utilizada en base a los procedimientos que fueron necesarios para alcanzar los objetivos propuestos. Incluyendo los pasos que se siguieron y las herramientas e instrumentos que se requirieron para la toma y análisis de datos.

El capítulo de recogida experimental de datos incluye el trabajo de campo en donde se obtuvieron las pautas de desarrollo de la investigación y se levantaron los datos necesarios y acordes al problema de estudio.

A su vez, el capítulo de análisis lumínico representa la observación realizada a los datos con la finalidad de estudiar su composición y comportamiento en materia lumínica y, por último, el capitulo de análisis estadístico incluye las correlaciones que fueron necesarias aplicar a los datos para encontrar tendencias y analizar pautas de actuación.

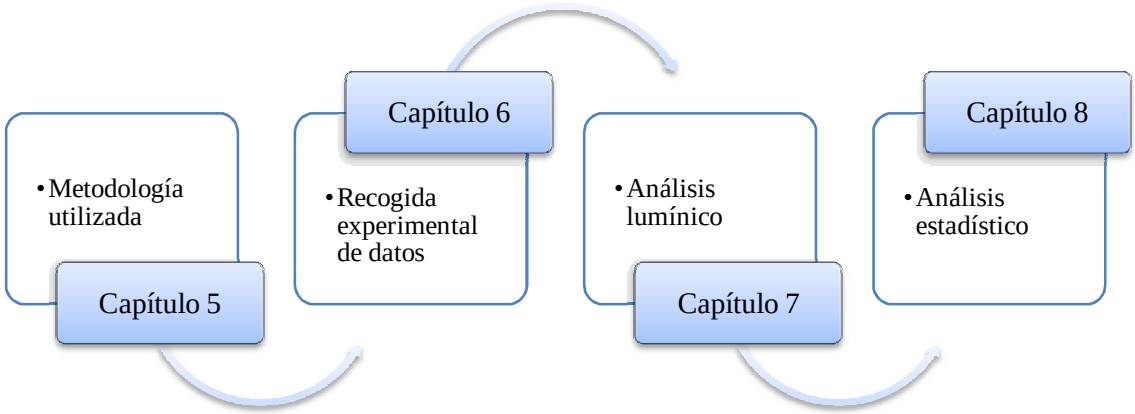


Fig.5.0 Esquema divisional del desarrollo de la investigación

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA UTILIZADA

Un resumen esquematizado de la metodología se muestra en la siguiente figura, posteriormente se da una explicación de cada unos de los puntos de la metodología que se utilizó en el progreso de esta investigación, incluyendo todas las herramientas de software y hardware que fueron necesarias para el buen desarrollo de la misma.

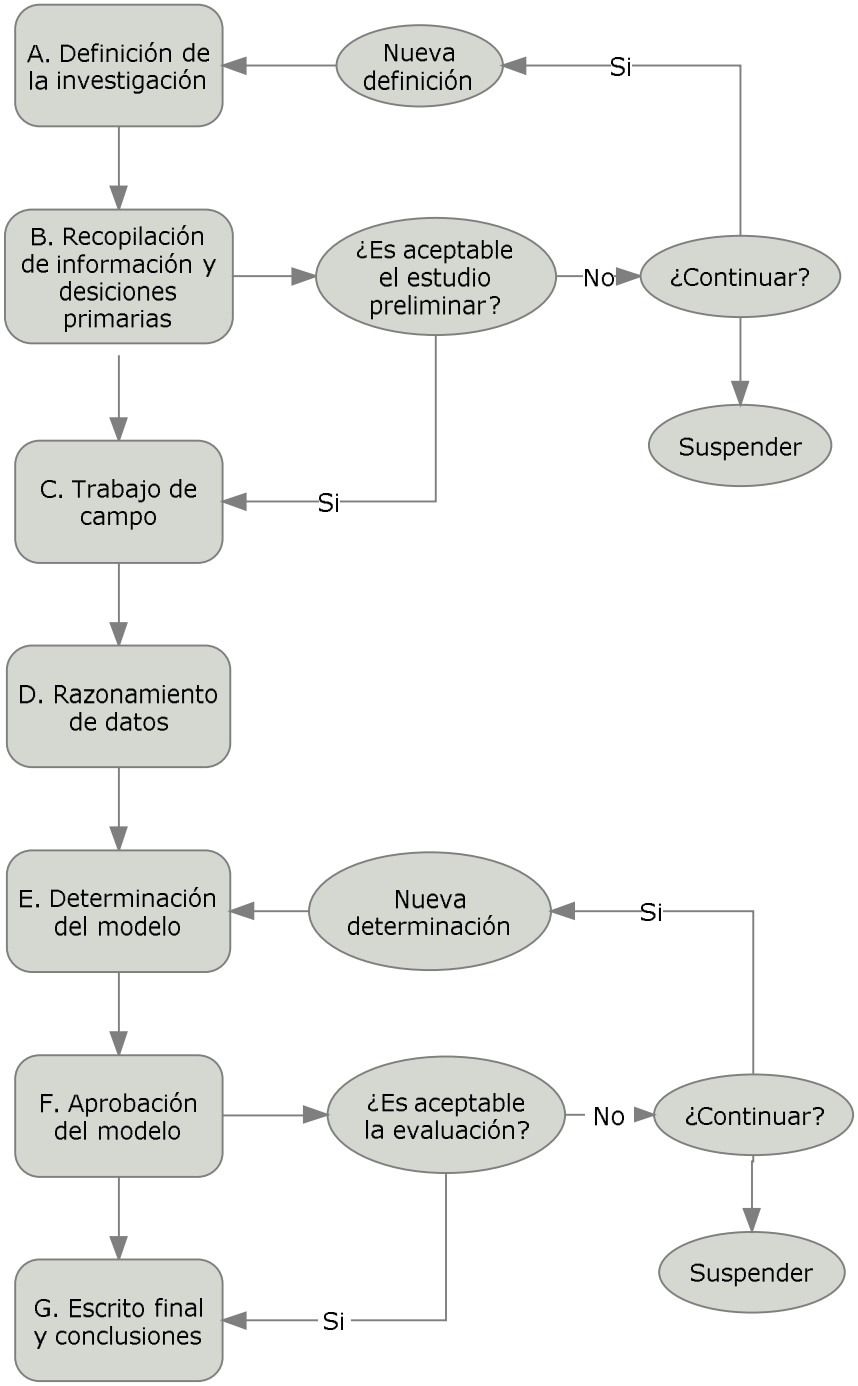


Fig. 5.1 Metodología utilizada

5.1. Definición de la investigación

La definición de la investigación se requirió para establecer los fundamentos que nos permitirán el seguimiento del trabajo.

En resumen la presente investigación se propuso con los objetivos principales de realizar investigaciones en diferentes lugares, bajo diferentes características, para elaborar descripciones de las condiciones de iluminación artificial nocturna y relacionarla con la contaminación lumínica. Así también, la elaboración de un modelo matemático que nos caracterizara la contaminación lumínica y su efecto en los alrededores, incluyendo una herramienta informatizada para conocer la variación de condiciones nocturnas de luminosidad en espacios afectados por la Contaminación Lumínica.

La propuesta involucró tomar en cuenta las metodologías utilizadas en la medición de la contaminación lumínica que actualmente se hayan realizado a manera de fundamento bibliográfico y referencial. Se planteó efectuar medidas de luminancia en distintos puntos del área estudiada y así poder establecer cuál es la media de afectación que está sufriendo la zona evaluada. Se tomaron en cuenta los factores que se sabe alteran el grado de contaminación lumínica. Se llevaron a cabo recogida de datos en diferentes lugares y bajo diferentes circunstancias para poder lograr homogenizar la propuesta que se realizó. Se propuso efectuar recorridos piloto y pruebas, utilizando la ecuación realizada, como sistema de validación.

5.2. Recopilación de información y decisiones primarias

El problema fue atacado por medios bibliográficos y de reconocimiento de campo de trabajo acordes a los requerimientos de la investigación. Se realizó la recopilación conforme el problema principal, es decir, la contaminación lumínica. Posteriormente se llevaron a cabo reconocimientos de campo en relación al lugar señalado. En el apartado de recogida experimental de datos, se explica detalladamente, como fue para cada fase del estudio. De manera general, la recopilación de información y decisiones primarias involucró:

A. Estudio del estado del arte

En donde se analizaron las investigaciones que hasta el momento se han realizado en materia de contaminación lumínica. Asimismo se investigaron las diferentes metodologías que existen y los elementos que los componen. Se consideraron los modelos similares que se han realizado hasta el momento para determinar los factores que los autores tomaron en cuenta en su elaboración.

B. Determinación de las variables con influencia directa a analizar

Fue necesario identificar las variables que se deberían examinar en nuestra recogida experimental de datos para su posterior análisis. Cabe señalar que estás fueron afinándose mediante fue avanzando el trabajo de investigación. Las variables estudiadas fueron:

1) Clima

Respecto a clima, se llevaron a cabo mediciones en diferentes condiciones atmosféricas y bajo diferentes circunstancias que permitieran parametrizar el modelo. Por estas razones, en la recogida de datos de este trabajo no solo se tomaros datos lumínicos, también se tomaron climatológicos, basándonos en las estaciones meteorológicas del lugar.

2) Iluminación nocturna natural

Éste nivel de iluminación está normalizado. Según el manual de contaminación lumínica (Narisada, Schreuder, 2004) la iluminación natural nocturna es igual a 21.6 Mag/arc-seg^2 lo que corresponde a 3.52 x 10^{-4} Cd/m^2 (Crawford 1998). Agregando que este nivel varía por muchas condiciones y que por lo tanto es solo un estándar.

3) Focos contaminantes

Los tipos de luz que se tengan en los focos contaminantes cercanos a la zona de estudio, fue otro factor que se tomó en cuenta. Analizados por el método RAMAL-UPC, que posteriormente consideraremos y cuya metodología se puede observar en el ANEXO XII del presente trabajo.

4) Orografía

También fue necesario analizar la orografía del terreno examinado. Así pues, se realizaron estudios orográficos de infraestructuras lineales, hidráulicas y de cualquier índole, que se tuvieran en el área de estudio y se relacionaron con la contaminación lumínica resultante.

5) Dispersión

Los factores que causan dispersión fueron tomados en cuenta en el desarrollo de la investigación. Existe una probabilidad de que un fotón se disperse desde un punto en una dirección y posteriormente se dirija a otra dirección. La probabilidad es diferente tanto para moléculas como para aerosoles.

6) Extinción

En relación extinción atmosférica, es necesario tomar en cuenta tres factores de extinción: Dispersión molecular, dispersión por aerosoles y absorción por ozono. Aunque el ozono se encentra a alturas superiores de 10 kilómetros, por eso es extraño que se tome como factor al realizar estudios sobre contaminación lumínica. Y en el presente trabajo no se utilizará.

C. Investigación sobre instrumentos de medición

Fue necesario utilizar instrumentos de medición para poder llevar a cabo los mapas lumínicos y la recogida de datos que se requieren para materializar la investigación. Se requirió tomar en cuenta

el grado de sensibilidad que se necesita para las mediciones nocturnas. También se debió tomar en cuenta la amplitud de espectro que otorga cada instrumento.

D. Elección de los instrumentos a utilizar

En base a la investigación que se realizó, para determinar el o los instrumentos más adecuados, se escogió el que mejor se adaptaba a la investigación y los que podían obtenerse. Cabe señalar que no todos los instrumentos se utilizaron en las 3 fases de recogida experimental de datos. Sin embargo, en cada fase se mencionan los instrumentos utilizados. A continuación se refieren, las características detalladas de los instrumentos y software utilizados se pueden observar en el ANEXO XVI y ANEXO XVII respectivamente.

1) Luminancímetro

Se utilizó un Luminancímetro L1009, Nº 059406 de la empresa LICHTMESSTECHNIK.

2) Medidor de la calidad del cielo

Instrumento, desarrollado por la empresa unihedron, que se utilizó con el objetivo de dar una idea general del grado de contaminación lumínica en el área.

3) Luxómetro

Se utilizó un luxómetro MAVOLUX 5032C/B, que mide iluminancia en luxes.

4) Cámara de video o de imágenes

Se utilizó una cámara de imágenes y videos, Nikon coolpix 990, 2048x1536 (3, 145,728 pixeles efectivos).

4) Sistema de posicionamiento global

Para la orientación en el terreno de estudio se utilizó el GPS –sistema de posicionamiento global-, incluido en el móvil Nokia N95.

5) Portátil

Para el tratamiento de los datos, desarrollo de propuestas y escrito del documento; se utilizo un portátil Toshiba A-110-160. Con procesador Intel core 2, dúo de 1,66 GHz, memoria R.A.M. de 1 MB y disco duro de 120 GB.

6) Software

Se utilizaron los programas incluidos en el Microsoft Office 2007 (Microsoft 2007) para el desarrollo del trabajo. Para el tratamiento estadístico de los datos se utilizó el software Minitab 15 (Minitab inc 2007). Para el tratamiento matemático de los datos se utilizó el software Wolfram Mathematica 7.0 (Wolfram, 2009). Para la elaboración de gráficos se utilizó el software Smartdraw 2009 (Smartdraw 2009). Para el análisis geográfico, orográfico y la localización de puntos de medición se utilizó el software Google Earth 2009 (Keyhole inc 2006). Para la edición de las referencias se utilizó el software Endnote X3 (Thomson reuters 2009).

E. Determinación de las variables por fase

Ya se tenían identificadas las variables que se cree intervienen en el nivel de contaminación lumínica con un análisis que se realizó enfocándonos en los modelos existentes y se afinó mediante se avanzó la investigación. Sin embargo también fue necesario determinar los lugares que se relacionaban con los factores que se buscaba examinar por cada lugar elegido, puesto que no todas las variables se analizaron en cada fase.

F. Determinación del número de áreas a analizar

Las áreas que se analizaron estuvieron compuestas por espacios que presentaban variación en sus condiciones nocturnas debido a la contaminación lumínica. Posteriormente, cuando se vea la explicación de cada área analizada, se comentará como fue la elección de puntos en cada una de ellas. Para poder determinar el número de zonas a evaluar y el número de puntos por zonas, se pretendió en un principio utilizar una herramienta estadística que permitiera encontrar los puntos adecuados y representativos de la población afectada. Sin embargo, después se determinó que esto era inviable y en el apartado de recogida de cada área se explicará la razón.

G. Determinación del número de estudios por área

Se debió elegir el número de puntos que fueron representativos de cada área. El número de puntos se determinó tomando en cuenta el tamaño del área de análisis y el tamaño del área contaminante.

H. Identificación de circunstancias de acuerdo a factores

Fue necesario tomar en cuenta las variaciones que se tuvieran de acuerdo a los factores propuestos a estudiar, para encontrar tendencias, por lo que se vio en la necesidad de realizar diferentes mediciones de acuerdo a las diferentes condiciones naturales y climáticas.

I. Localización e identificación de puntos

Posteriormente, después de tener el número de puntos a evaluar, se determinaron las localizaciones en un mapa satelital y se filtraron a un sistema de posicionamiento global para así poder orientarlos de manera fácil y efectiva. Después de localizar cada punto se tomó fotografía de cada uno para que quedara constancia de la zona evaluada y en seguida llevar a cabo las mediciones por medio del aparato de medición.

5.3. Trabajo de campo

Para el levantamiento de los datos nos trasladamos a cada área de estudio para recoger información por medio de los instrumentos elegidos. La medición se llevo a cabo tomando en cuenta todas las direcciones por las que se afecta el área estudiada. Se realizaron recorridos

nocturnos de medición de acuerdo a la identificación realizada. Se llevaron a cabo las mediciones en forma de cúpula hipotética que rodea el área a estudiar y de esta manera sacar un promedio de afectación. Mediciones zénit en Mag/arcseg^2 y cd/m^2, mediciones suelo en cd/m^2, mediciones ambiente en luxes y mediciones horizonte en Mag/arcseg^2 y cd/m^2. Se realizaron mediciones de factores ambientales de acuerdo al día medido, se tomaron datos de humedad relativa en porcentaje y temperatura en grados centígrados. Posteriormente fue necesario llevar a cabo diferentes tomas de datos en espacio, tiempos y condiciones determinadas, que sirvieron para la elaboración de los mapas de iluminación y para auxiliarnos a concretar el modelo buscado.

El foco contaminante se analizó por medio del método RAMAL- UPC (San Martín., García, & Solano 2009; García, & Solano 2010) que es un modelo de caracterización del grado de contaminación lumínica emitido por una ciudad o foco contaminante. Se basa en la contabilización del flujo emitido por el alumbrado después de llevar a cabo el inventario del tipo de lámparas y luminarias de las que se compone. Asimismo toma en cuenta las características geométricas del lugar analizado, las características fotométricas de las luminarias, las reflexiones del flujo en pavimentos -De diferentes cementos y bajo diferentes circunstancias- y las reflexiones en paredes laterales. Detalles importantes a tomar en cuenta, es que no solo se incluyen los alumbrados públicos, pueden incluirse en la modelización los alumbrados privados y así considerarlos como emisores difusos –Ventanas, escaparates, rótulos publicitarios, entre otros.

Para el tratamiento de los datos se utilizan programas informáticos de iluminación estándar, necesariamente de interior para poder calcular los porcentajes de reflexión en el medio. El cálculo final se valora en un coeficiente llamado EFS –emisión de flujo superior-. Al cálculo de EFS se le añade una consideración que va respecto a la composición de la luz existente, determinándola por su grado de difusión. Al resultado de esta operación ya no se le considera flujo –lumen- sino incidencia en la luminosidad, y que se le llama GRE –Grado relativo de emisión-.

El modelo también valora la intrusión de luz, sin embargo, a efectos de este trabajo, tomaremos en cuenta el EFS del modelo. Para llevar a cabo el estudio, primero se realiza un estudio preliminar de las características del alumbrado artificial con que cuenta el foco contaminante. Para esto se realiza una encuesta a los municipios y núcleos de población sobre el tipo y el estado de sus instalaciones de alumbrado artificial. Esto es completado con visitas de campo para estudiar las características urbanísticas y estados de las instalaciones del lugar, son el objetivo de comprobar la instalación, tanto en componentes de alumbrado, posibles edificaciones y determinación de superficies reflectantes. Se puede ver un ejemplo de la encuesta que se realiza a los municipios en los ANEXOS I, II, III, IV de este trabajo.

Una vez que se tienen los datos mencionados anteriormente, se realiza una informatización a fin de estudiar el comportamiento de las instalaciones que sean muy diferentes al estándar del foco contaminante. La informatización se realiza con cualquier software de iluminación de interiores que soporte las luminarias y lámparas encontradas en el lugar del estudio.

Posteriormente, se realiza el tratamiento de los datos obtenidos determinando lo siguiente:

- ❖ Tipos y cantidad de lámparas: Se debe llevar a cabo el inventario de las lámparas en orden de cantidad y Lúmenes por watt de cada tipo.
- ❖ Tipos y cantidad de luminarias: Es necesario también contar con el inventario de las luminarias en orden de porcentaje de FHS –flujo hemisférico superior-.
- ❖ La potencia Total instalada en Wats, del foco contaminante: Se determina la potencia del foco contaminante tomando en cuenta los tipos de lámparas y el total de lámpara de cada tipo –Tomando en cuenta los lúmenes por watt de cada lámpara.
- ❖ El FTI se calcula tomando en cuenta la potencia total instalada y el porcentaje de tipo y cantidad de lámparas –en orden de lúmenes por Watt-. Por lo tanto, el FTI se valora en lúmenes y corresponde al flujo total instalado del foco contaminante.
- ❖ Se obtiene el FHS medio –flujo hemisférico superior medio- y el FHI medio –flujo hemisférico superior medio-, derivado del tipo y la cantidad de luminarias.
- ❖ Se obtiene el FHS Total –flujo hemisférico superior total-, al multiplicar el FHS medio por el FTI.
- ❖ Se obtiene el EFS -emisión de flujo superior-, sumando el FHS total -lo que se va hacia arriba de la horizontal-, más el FHI medio que ya ha sido caracterizado de acuerdo al porcentaje de reflexión de pavimentos y paredes del área analizada; tomando en cuenta los factores que involucran a las lámparas, áreas geométricas del lugar y los focos contaminantes con características especiales -escaparates, rótulos publicitarios, entre otros-.

Para efectos de este trabajo, y acorde con el método que se propone, se tomó en cuenta el EFS. La metodología del método RAMAL-UPC se puede observar en el ANEXO XII de este trabajo.

5.4. Razonamiento de datos

Recopilación de datos, caracterización, elaboración de mapas lumínicos. Los datos que se obtuvieron de las mediciones realizadas, se trasladaron al ordenador para su adecuado análisis. El análisis estadístico, para encontrar tendencias entre las variables, se llevó a cabo obteniendo el coeficiente de correlación de Pearson, el coeficiente de correlación de Spearman y el coeficiente de correlación de Kendall, que consideran las correlaciones entre dos variables cuantitativas. Los

índices de correlación, para los tres coeficientes, se localizaron entre -1 y 1; teniéndose una mejor relación mientras el coeficiente se aleja de cero. Se utilizaron los tres coeficientes de correlación paramétrica para tener una mejor validación de la prueba estadística. Los mapas lumínicos fueron elaborados por medio de un software GIS.

5.5. Determinación del modelo

Por medio de los análisis de datos y la elaboración de los mapas lumínicos se tuvieron las herramientas necesarias para llevar a cabo la ecuación propuesta. Esto fue reforzado por el análisis del estado del arte, es decir los modelos que actualmente existen, y la aplicación de algunas de sus características en el modelo propuesto.

5.6. Aprobación del modelo

Basándonos en la realidad de que es necesario llevar a cabo una validación de cada método que se utilice en todo trabajo de investigación, se probó la ecuación propuesta en diferentes áreas y bajo diferentes circunstancias. Se utilizaron recorridos estadísticos para determinar si la ecuación es adecuada a la investigación. En el caso especifico de ésta investigación, se optó por la validación por medio de recorridos piloto, publicaciones y estadística de análisis de resultados arrojados. El método estadístico fue el mismo utilizado en el razonamiento de datos. Asimismo, las publicaciones realizadas a lo largo de este trabajo de tesis doctoral jugaron un papel muy importante en este aspecto.

5.7. Escrito final y conclusiones

Esta fase fue necesaria para redactar y concretar el trabajo. Las conclusiones fueron elaboradas de acuerdo a los resultados que se obtuvieron con la investigación.

CAPÍTULO 6. RECOGIDA EXPERIMENTAL DE DATOS

Se llevó a cabo una recogida experimental de datos con el objetivo de estudiar las variables que influyen en el comportamiento de la contaminación lumínica. En total fueron 3 fases –cada una de las cuales requirió realizar diferentes recogidas de datos-, involucrando distintos lugares distintos tiempos.

A continuación se muestra una tabla explicativa, incluyendo las variables analizadas, de cada una de las fases de recogida que se realizaron.

Variables		Fase 1		Fase 2	Fase 3
		Fase 1a	Fase 1b		
Mediciones lumínicas	Luminancia del fondo del cielo				
	Iluminancia del suelo				
	Luminancias horizonte				
Foco contaminante					
Climatología					
Orografía					

Tabla 6.1 Tabla explicativa de la recogida experimental de datos

La recogida experimental de datos también estuvo condicionada a cada fase, involucró desarrollar el estudio previo del lugar seleccionado y analizar las variables de cada zona, por lo que se requirió utilizar una metodología diferente para cada fase –aunque condicionada a la metodología general explicada anteriormente-..

6.1. Fase 1: Estudio en el Parque Natural del Delta del Ebro

La primera fase de recogida de datos se realizó en el parque natural del Delta del Ebro. El principal objetivo que se buscaba con este estudio era el de identificar y considerar los factores primarios que involucran a la contaminación lumínica para posteriormente analizarlos.

Además de la importancia e interés de la investigación, pesaron también en la decisión de la elección de ese lugar las oportunas circunstancias de:

- ❖ Disponer, cerca del emplazamiento de la Universidad, de un Parque Natural de especial relevancia biológica y de interés en la preservación ambiental del mismo.
- ❖ Contar con la buena disposición y colaboración de los biólogos integrados en el equipo de Parque Natural.
- ❖ Contar con una orografía prácticamente plana y por lo tanto un lugar con una muy buena accesibilidad.

Así mismo, ésta fase se propuso tres etapas principales:

- Medir y cualificar las condiciones lumínicas del Parque.
- Estudiar las influencias que pueden determinar variaciones en las mismas.
- Relacionar estos datos con las posibles afectaciones a la población biológica de la zona.

6.1.1. Descripción del Ámbito de estudio

El rio Ebro es uno de los más importantes de España y el más caudaloso de la península ibérica. Su salida al mar la realiza en el mediterráneo, en la comunidad de Cataluña. En su salida da lugar a una plana aluvial de 320km2 que se introduce en el mar configurando una forma triangular de 25Km. Este lugar se conoce con el nombre del Delta del Ebro.

El parque natural del Delta del Ebro se encuentra en la desembocadura de dicho río, en la provincia de Tarragona. En el año 1980, dentro de este Delta, se creó un Parque Natural con una extensión total de 7.736 hectáreas.

El delta del Ebro es la región húmeda con mayor extensión de Cataluña y la segunda en España tras el Parque Nacional de Doñana. Es una de las más importantes de Europa occidental después del parque regional de la Camarga en Francia. Las condiciones climáticas son las típicas del Mediterráneo, con una temperatura media de 17º c y bastante humedad. Entre noviembre y marzo se pueden encontrar días de fuerte viento procedente del noroeste, conocido en el Delta como "vent de dalt", los días de viento. Dentro del parque se cuenta con 4 estaciones meteorológicas que evalúan el clima del lugar en tiempo real -en la fase 3 de éste trabajo se hizo uso de esos datos para contrastarlos con la realidad lumínica-.

El Delta del Ebro está constituido por 320 km^2 de superficie. 20% de ésta superficie son áreas naturales, 75% es espacio cultivable y el 5 % restante comprende las urbanizaciones. Viven en él unas 50.000 personas, por lo tanto las poblaciones cercanas al parque son fácilmente reconocibles.

La población biológica es muy diversa, comprendiendo plantas (Cuyo dominio está a cargo de los carrizales y los cañaverales), peces y aves. Este último es especialmente relevante ya que es territorio nidificante de 95 especies distintas, y también zona de invernada y reposo de aves migratorias. De las 600 aves existentes en Europa, 325 especies han sido localizadas en el Delta.

En cuanto a orografía, en el delta del Ebro se tienen un gran número de contextos deltaicos entre los que se encuentran playas comunes, barras arenosas, penínsulas arenosas, campos de dunas,

bahías, lagunas dulces, saladas y salobres, amplias llanuras intermareales, marjales convertidos en turba, márgenes fluviales, cuya orografía es prácticamente plana. La ausencia de obstáculos orográficos permite evitar interferencias en el estudio de las influencias y condiciones lumínicas. Se tiene una altitud promedio de 6 metros SNM -sobre el nivel del mar-.

6.1.2. Programación inicial y fases de trabajo

Este trabajo se realizó en un periodo de dos años. Se considero conveniente dividirlo en etapas que se cubrirían en dos períodos de investigación –fase 1a y fase1b-. Las dos fases contendrían un análisis de datos independiente.

Los supuestos de partida, tomando en cuenta que se buscaba identificar las características relacionadas con la contaminación lumínica, fueron los siguientes:

Los factores lumínicos que pueden definir las condiciones nocturnas del Delta del Ebro son:

- Luminancia del fondo de cielo.
- Iluminancia en el terreno.
- luminancia en planos verticales.
- Existencia de luminancias puntuales o sectoriales muy elevadas en el horizonte.

Dichos factores pueden afectar a:

- Relación presas - predadores
- Localización de alimentos.
- Comportamiento reproductivo.
- Desorientación.
- Efecto barrera.

Las condiciones lumínicas dependerán de:

- Condiciones de iluminación en el entorno.
- Contaminación atmosférica.
- Meteorología.
- Orografía.

Como se comentó anteriormente, a objeto de avanzar en éste trabajo, se propusieron unas Etapas cuya definición estuvo siempre pendiente del resultado de las Etapas anteriores, o del proceso de corrección detectado en Etapas posteriores.

Se puede observar que el esquema propuesto, presentado a continuación y que representa a la fase 1, contiene dos fases de recopilación de datos, estas dos fases se trataron por separado y tiene sus propios análisis. Es decir, la investigación en el delta del Ebro se dividió en dos períodos que se realizaron en dos épocas diferentes –1a y 1b-. Por lo tanto cada fase tiene sus propias conclusiones. En el esquema mostrado en la fig.6.1se dividen los apartados tratados en cada fase.

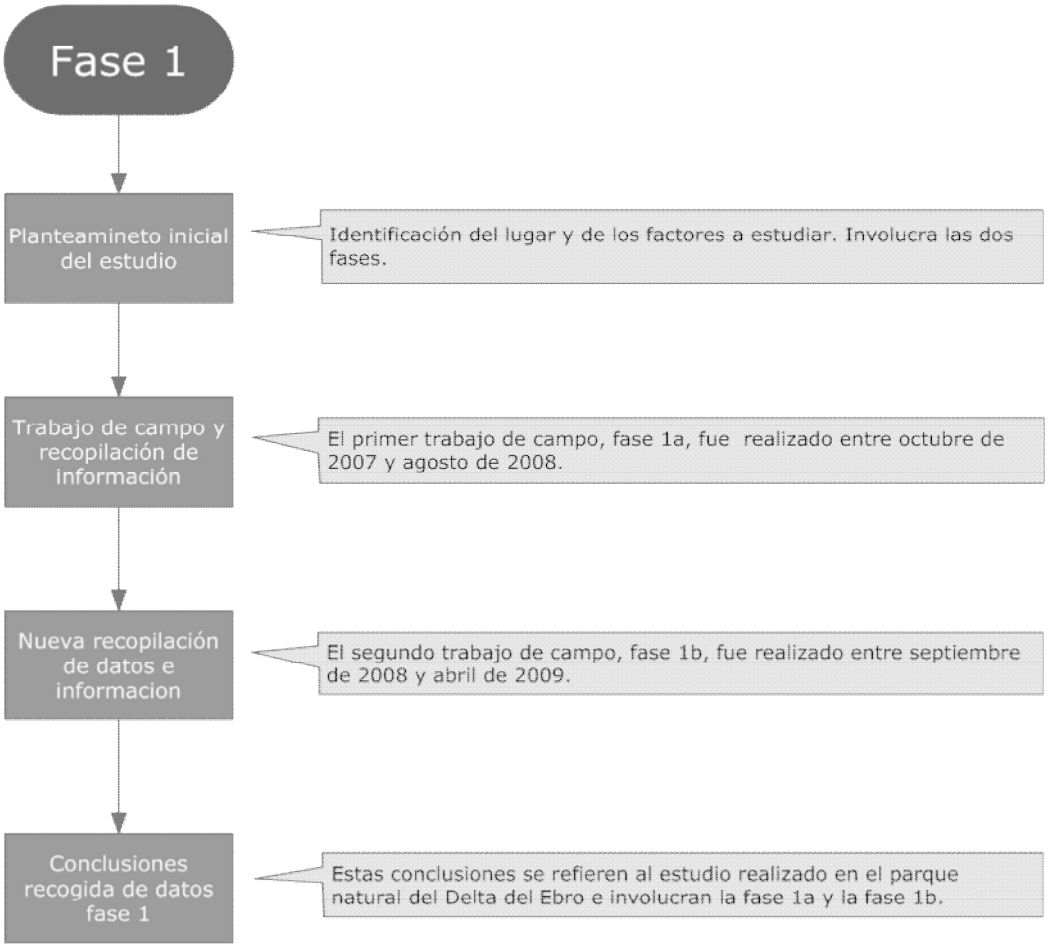


Fig. 6.1 Seguimiento de las Etapas de la investigación

6.1.3. Planteamiento inicial del estudio

Tras un estudio teórico y bibliográfico de la problemática y del lugar de estudio, se establecieron los siguientes planteamientos:

A. Espacio de medición

El espacio de medición se compuso en una cúpula cerrada. Constituido por un volumen en forma de domo donde el cerramiento curvo es la bóveda celeste y la base el suelo del área. Las mediciones harán referencia a:

1) *Luminancia de la bóveda celeste medida al zenit*
2) *Iluminancia del suelo*
3) *Luminancias zonales y puntuales del horizonte*

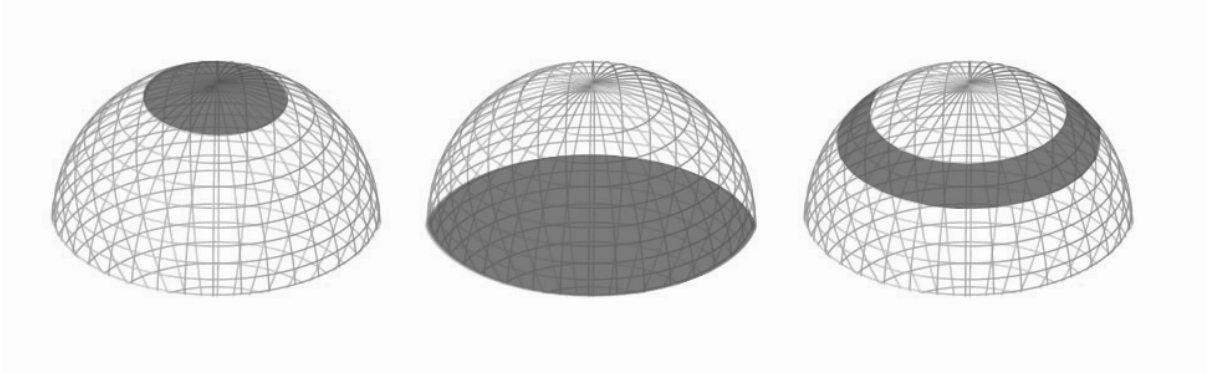


Fig. 6.2 Tipos de mediciones realizadas en la fase 1.

B. Instrumentos utilizados

Los instrumentos básicos que se utilizaron en esta fase fueron:

1) *Medidor de luminancia del fondo de cielo*
2) *Luminancímetro*
3) *Luxómetro*
4) *Estaciones meteorológicas*

Y los instrumentos complementarios:

1) *Cámara fotográfica digital*
2) *Brújula*
3) *Termómetro*
4) *GPS*

Las características y los modelos se explicaron anteriormente, en el apartado de metodología de este trabajo.

C. Determinación de los puntos de estudio

La determinación inicial de los puntos de estudio se efectuó sobre mapa, trazando una cuadricula regular de dimensiones 500*500 metros que, al estimarse poco precisa, se transformó provisionalmente en 200*200 metros, pendiente de revisión según los resultados de las primeras mediciones. En la fig. 6.4 se muestra dicho esquema inicial.

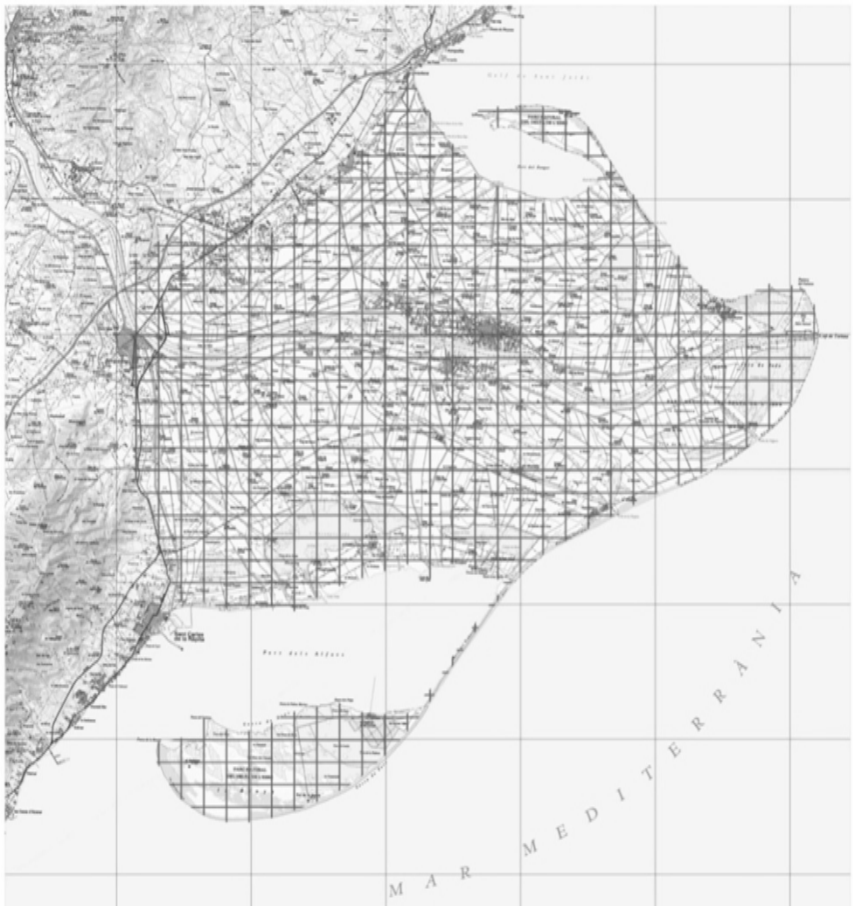


Fig. 6.3 Primeras cuadrículas sobre mapa (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008)

Como se observará más adelante, el esquema inicial presentado en la figura 6.3 ha debido cambiarse.

D. Identificación de focos contaminantes

Los puntos de iluminación artificial nocturna que afectaban de manera significativa al parque se localizaron de la siguiente forma:

1) *Previa localización en mapa con imagen satelital.*
2) *Localización mediante observación sobre el terreno.*
3) *Comprobación del grado de influencia aplicando el modelo de Walker (1970).*
4) *Selección de los valores significativos.*

El estudio de núcleos contaminantes, se condiciona a un estudio preliminar mediante el modelo de Walker (1970) – que fue analizado en el apartado de caracterización de la contaminación lumínica de este trabajo-, de la teórica afectación de éstos, teniendo en cuenta su población, y su distancia al punto de análisis. Y como se comentó en el apartado de modelos, para el presente trabajo se utilizó el modelo de Walker (1970) solo como una aproximación para la elección de los focos

contaminantes a estudiar. Para posteriormente realizar un análisis exhaustivo tomando en cuenta la presente propuesta. Se utilizó la fórmula que arroja los datos en nano lamberts:

$$I = 0,01 \, x \, P \, x \, D^{-2.5} \qquad (1)$$

Donde:

I = Índice Walker

P = Población

D = Distancia

Los datos obtenidos son mostrados en la tabla siguiente, seleccionando las poblaciones con influencia alta.

Municipio	Población	Distancia Km.	Índice Walker	Afectación
Alcanar	9311	14,1	0,124723573	BAJA
Aldover	833	15	0,009559097	BAJA
Alfara de Carles	360	17	0,003021205	BAJA
Ametlla de Mar	6438	11,2	0,153357816	BAJA
Ampolla	2518	1	25,18	ALTA
Amposta	14359	1	203,59	ALTA
Barcelona	5000000	135	0,236121527	BAJA
Benifallet	810	23	0,003192754	BAJA
Camarles	3279	1	32,79	ALTA
Camping Aube	180	1	1,8	ALTA
Deltebre	10943	1	109,43	ALTA
Els muntells	499	1	4,99	ALTA
Freginals	406	6,9	0,032464095	BAJA
Godall	749	8,5	0,035557769	BAJA
La Galera	818	9,4	0,030194905	BAJA
La Sènia	5969	24,8	0,019488229	BAJA
L'aldea	3693	1	36,93	ALTA
Mas de Barberans	683	21,4	0,003223935	BAJA
Masdenverge	1052	3,6	0,427818428	BAJA
Pauls	609	26	0,001766786	BAJA
Perellò	2355	10	0,074471639	BAJA
Poble Nou del Delta	250	1	2,5	ALTA
Puerto Riumar	120	1	1,2	ALTA
Reus	104000	52	0,053336557	BAJA
Riumar	340	1	3,4	ALTA
Roquetes	7232	13,5	0,10800006	BAJA
San Carles de la Ràpita	13181	1	131,81	ALTA
San Juan d'Enveja	3355	1	33,55	ALTA
Santa Barbara	3613	6,3	0,362674138	BAJA
Tarragona	134000	63,1	0,04236736	BAJA
Tivenys	912	21,6	0,004205915	BAJA
Tortorsa	33705	11	0,839871064	BAJA
Ulldecona	6325	12,2	0,121663681	BAJA
Urb. ElsEucaliptus	450	1	4,5	ALTA
Xerta	1275	23	0,005025631	BAJA

Tabla 6.2 Datos de las poblaciones cercanas según el modelo de Walker (1970)

(Solano., San Martín, García & Ferrero 2008)

Y su representación gráfica:

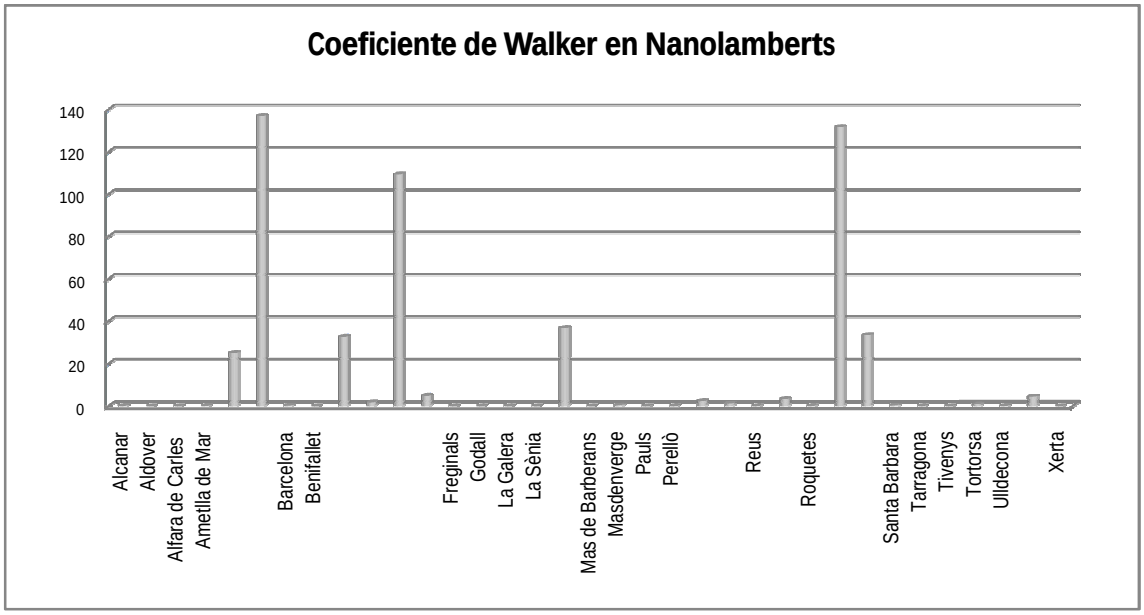


Fig. 6.4 Grafico de las poblaciones cercanas al parque según el modelo de Walker (1970) (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008)

Debido a la orografía que presentó el terreno de estudio fuera del parque, -la cordillera litoral hace de pantalla natural, como la serra del Cardó, Serra de les Comes, Serra de Montsia, entre otras-, la lejanía de poblaciones realmente importantes, la superposición de focos más importantes por su proximidad y los datos arrojados por el modelo de Walker (1970) –presentados en la tabla 6.2-, se han tenido en cuenta el estudio de los siguientes núcleos de población y algunas instalaciones inmersas dentro del Delta:

Ampolla, Amposta, Camarles, Camping Aube, Deltebre, Els muntells, Els Eucaliptus, L'aldea, Poble Nou del Delta, Puerto Riumar, Riumar, San Carles de la Ràpita, San Juan d'Enveja y dos industrias aisladas que presentan iluminación por la noche - Les Salines de la Trinidad y La Fustera

Los núcleos de población se consideraron en la fase 1b de este trabajo realizando una encuesta a los municipios y núcleos de población analizados. En total se realizaron 15 encuestas, la mayoría llenadas por los técnicos del ayuntamiento de las poblaciones, algunas fue necesario llenarlas con datos de análisis in situ de las poblaciones –como las dos industrias aisladas-. Como ejemplo se puede observar una de ellas en el ANEXO I Y ANEXO II.

De forma provisional, y como orden de magnitud, se pueden observar, representados en mapa, los centros de contaminación estudiados, y proporcionalmente a su teórica afectación –en relación a la población de cada foco contaminante-:

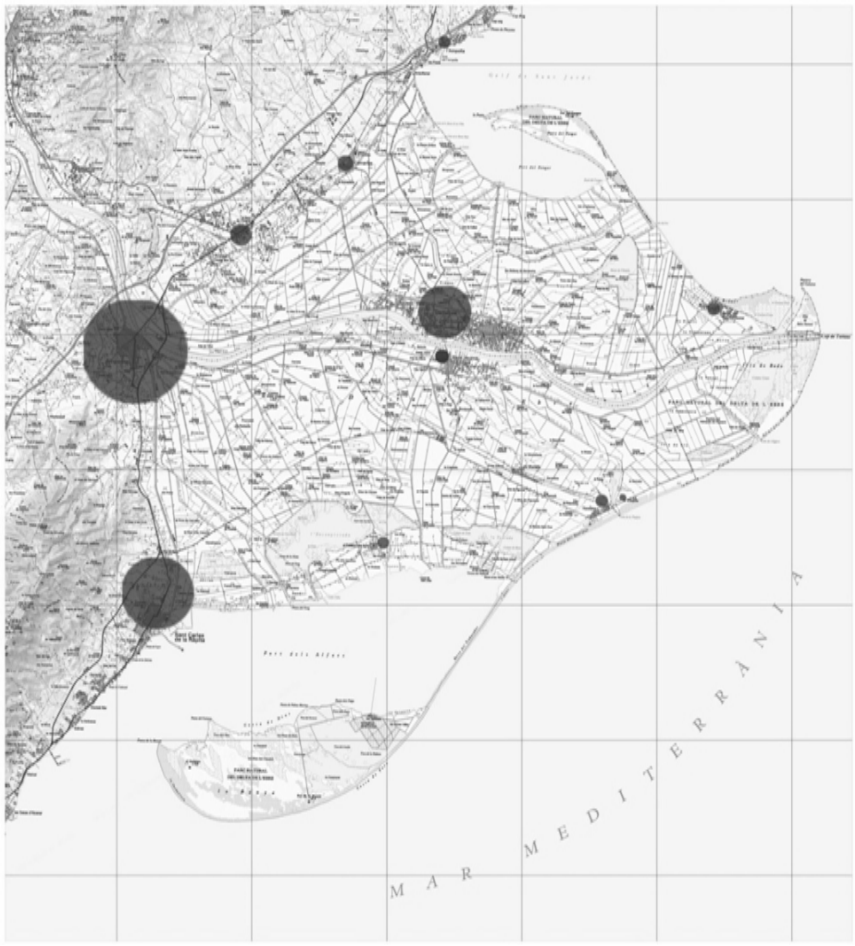


Fig. 6.5 Representación de las poblaciones de interés de estudio. (Solano., San Martín & García 2009a)

6.1.4. Trabajo de campo y recopilación de información, fase 1a

Antes de iniciar el trabajo de recogida de datos se realizó un informe que fue presentado en la alcaldía de Deltebre -la población que gestiona el parque natural del Delta del Ebro y donde se encuentra la estación biológica que realiza investigación-. El alcalde aprobó la investigación, tras lo cual se mantuvieron reuniones con los Biólogos Responsables del parque natural que han demostrado posteriormente su interés y apoyo al trabajo. La carta oficial de aceptación del estudio se puede ver en el ANEXO V del presente trabajo.

Una vez localizados los puntos de influencia se llevaron a cabo las mediciones. Fue necesario trasladarse al parque con los instrumentos y por la noche realizar recorridos nocturnos de reconocimiento y medición. En estos recorridos, en puntos identificables por medición GPS –sistema de posicionamiento global- se efectuaron toda la serie de mediciones de luminancia e iluminancia, fondo de cielo, así como del círculo completo de horizonte del cual se realiza también una fotografía panorámica.

Se procuró realizar en primer lugar una serie completa de mediciones en condiciones de luna nueva y atmósfera despejada, para poder comparar en medidas sucesivas la influencia de condiciones atmosféricas y lunares distintas.

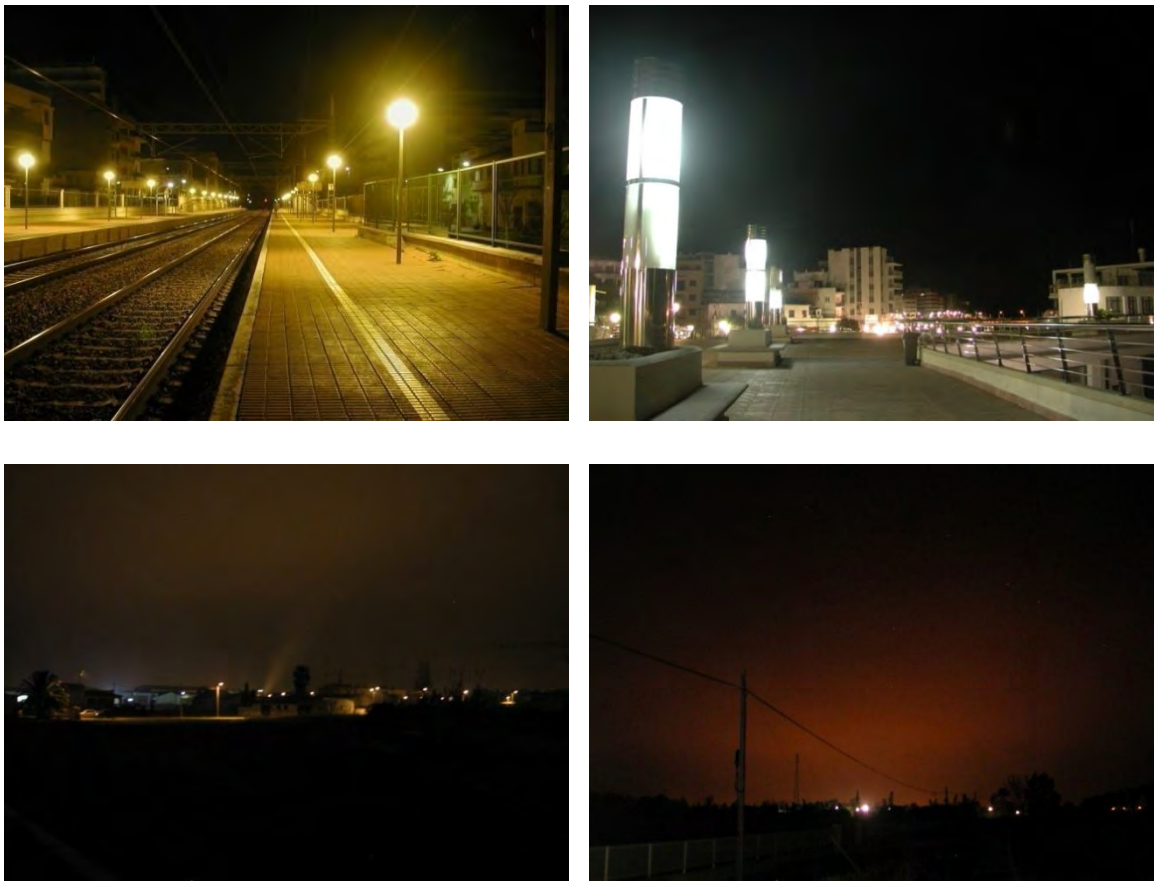


Fig. 6.6 Imágenes del lugar (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008)

Como es lógico, al enfrentarse con la realidad del terreno de estudio, los planteamientos iníciales han debido ajustarse a ciertas limitaciones. La principal de ellas ha obligado a variar el esquema de puntos de medición, ya que muchos de ellos resultaban inaccesibles por canales o zonas inundadas.

El esquema final se ha basado en unos caminos rectilíneos paralelos a una distancia de 500 metros entre sí, y sobre los que se efectúan mediciones cada 200 metros. Partiendo de estos ejes se trazan unas “espinas” perpendiculares, allí donde existen senderos, bastante frecuente, o zonas secas. El trayecto fue recorrido, las veces que fueron necesarias, utilizando un vehículo –bicicleta todo terreno- adecuado al terreno del lugar con iluminación; puesto que las mediciones se realizaron por la noche-

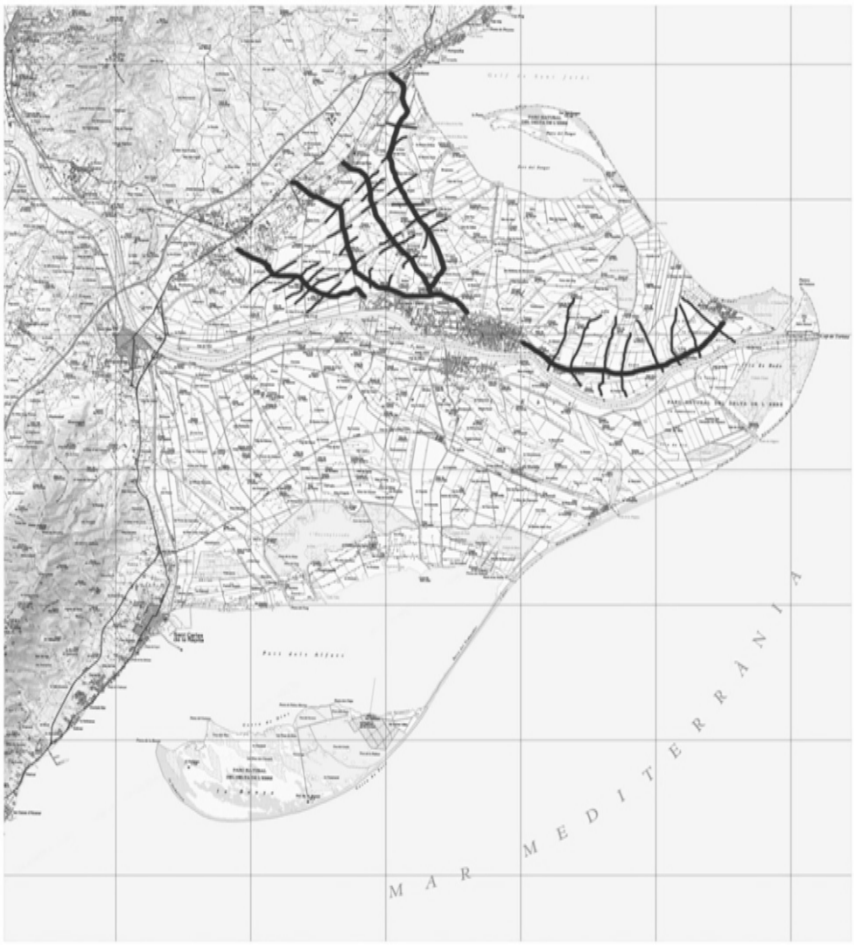


Fig. 6.7 Esquema de recorridos de mediciones (Solano., San Martín & García 2009a)

De las medidas y preliminar observación de los datos efectuados hasta esta etapa, fase 1a, se extrajo la dirección a seguir en la metodología planteada, mediante las mediciones más eficientes, y rápidas, sobre todo en la recogida de datos en campo. Se continúo con las variables identificadas de estudio.

6.1.5. Nuevo trabajo de campo y recopilación de información, fase 1b

Esta fase fue realizada como continuación de la fase 1a y para comprobar de una manera más clara los factores que se decidió tomar en cuenta para el estudio y análisis de la contaminación lumínica. Así mismo, sirvió como apoyo de comprobación de las relaciones entre climatologías en diferentes temporadas y el índice de contaminación lumínica resultante. Al igual que la primera se efectuó en el parque natural del Delta del Ebro. Por eso en este apartado no se realiza descripción del lugar, la descripción se puede encontrar en el apartado de la primera fase de este trabajo –fase 1a-. La primera fase de trabajo, que ya fue explicada anteriormente, se realizó en un periodo comprendido entre octubre de 2007 y agosto de 2008.

La segunda fase comprendió un periodo entre septiembre 2008 y abril 2009. Se continuó en esta fase con las mismas decisiones de elección del lugar que se tuvieron desde la fase 1a. Así también, los objetivos principales de la recogía de datos continuaron siendo los mismos que en la fase 1a.

En esta fase se analizaron los núcleos de población, realizando una encuesta a los municipios sobre el tipo y estado de sus instalaciones. Complementada con visitas de campo y estudios de niveles, características urbanísticas, estado de las instalaciones y demás datos de interés a la investigación. Mediante ello, se consiguió información acerca del EFS y GRE como valores de estudio particulares al grado de contaminación lumínica del foco contaminante-datos que se mostrarán más adelante, en el análisis lumínico-.

En la anterior fase 1a se propuso una sucesión de etapas a seguir para el total desarrollo de la investigación en el Delta del Ebro. El esquema se pudo observar al inicio de este apartado, Fig. 6.1., indicando las dos etapas de recogida de datos que tuvo esta fase. Basándonos en el anterior esquema, se han llevado a cabo nuevas recopilaciones de datos en el espacio de estudio. Estas recopilaciones no solo involucran datos lumínicos, en ésta ocasión también se han tomado datos relacionados al clima que se tenía en el momento de las mediciones. Esto con el objetivo de contrastar los datos y tratar de encontrar una relación en su aumento o su disminución. Los datos referentes al clima se tomaron mediante las estaciones climatológicas localizadas dentro del parque.

El tratamiento principal se realizó por medio de tres herramientas estadísticas de correlación paramétrica -modelos de Pearson, Spearman y Kendall- cuyo funcionamiento fue explicado en el apartado de metodología utilizada del presente trabajo. Los resultados de dicho tratamiento estadístico y las conclusiones de la correlación se explican detalladamente en el apartado de análisis estadístico de este trabajo.

A continuación, en la figura 6.9, se presenta un ejemplo de recorrido de medición con fotografía al horizonte –datos tomados con luminancímetro-, en un camino entre las poblaciones de La Aldea y Deltebre.

Se puede observar el mapa del área estudiada con un punto que indica el punto de toma de las imágenes y algunas de las imágenes que fueron tomadas en dichos puntos. Así también, la grafica de recorrido que se obtuvo de dichas mediciones. Las mediciones se encuentran en Cd/m^2

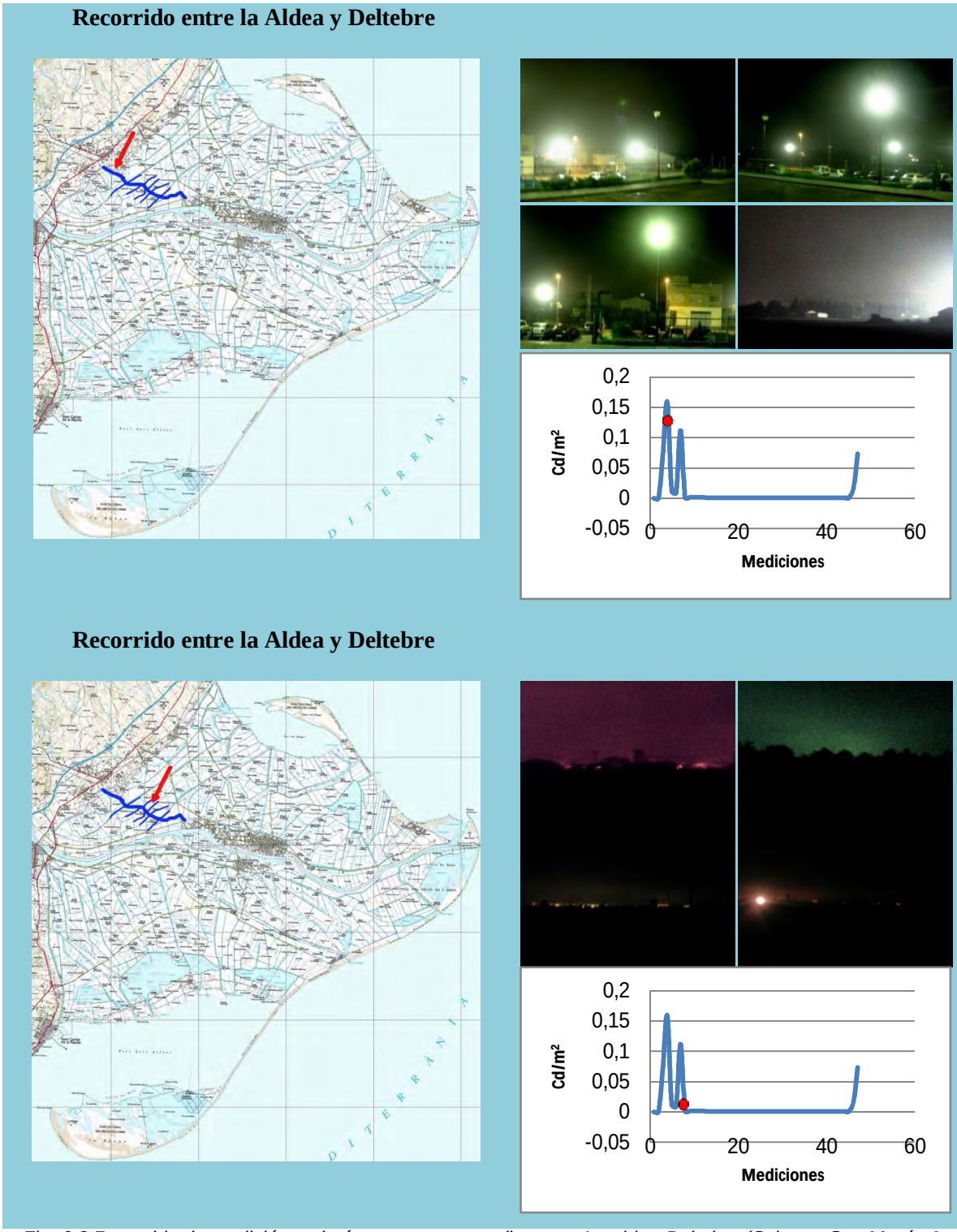
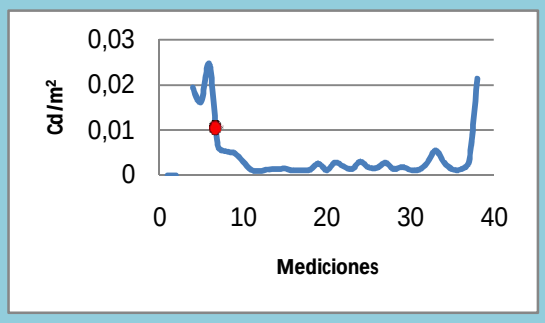


Fig. 6.8 Recorrido de medición en imágenes correspondiente a r La aldea-Deltebre (Solano., San Martín & García 2009a)

El mismo esquema, presentado anteriormente, se muestra a continuación para el recorrido entre Deltebre y Riumar. Se observan las similitudes de las mediciones en comparación con las imágenes.

Las mediciones de mayor magnitud están muy cerca de la ciudad y las fotografías demuestran la existencia de focos contaminantes cercanos.

Recorrido entre Deltebre y Riumar



Recorrido entre Deltebre y Riumar

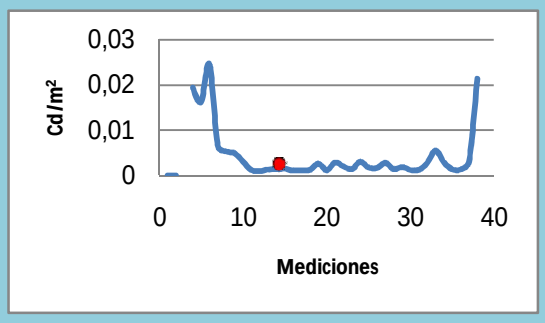


Fig. 6.9 Recorrido de medición en imágenes correspondiente a Deltebre-Riumar (Solano., San Martín & García 2009a)

6.1.5.1. Datos climatológicos

Como anteriormente fue comentado, esta segunda fase de recogida de datos en el Delta del Ebro, involucró la necesidad de conocer el comportamiento de la contaminación lumínica ante determinadas situaciones atmosféricas. Los datos climatológicos fueron tomados basándonos en las estaciones meteorológicas localizadas en el lugar. Se recogieron datos relacionados a la temperatura y la humedad relativa. Un ejemplo de dichos datos, en contraste con mediciones lumínicas en mismo tiempo y espacio, se esquematiza a continuación.

Mag/Arcseg^2	Humedad Relativa %	Temperatura °c
20,10	82,00	7,0
20,03	82,00	7,1
20,35	82,00	7,1
19,97	82,00	7,1
20,03	82,00	7,0
19,62	83,00	7,0
19,56	83,00	7,0
19,73	82,00	7,0
19,86	82,00	7,0
19,72	82,00	7,0
20,64	80,00	7,0
20,37	81,00	7,0
19,45	83,00	6,9
19,68	83,00	6,9
19,30	83,00	6,9
19,97	82,00	6,9
19,83	82,00	6,9
20,12	82,00	6,9
19,45	83,00	6,9
19,56	83,00	6,8
19,67	83,00	6,8
19,90	82,00	6,8
20,23	81,00	6,8
20,16	81,00	6,8
20,18	81,00	6,8
20,56	80,00	6,8
19,73	82,00	6,6
19,41	83,00	6,6
19,56	83,00	6,6
19,62	83,00	6,6
20,05	82,00	6,6
19,89	82,00	6,5
19,84	82,00	6,5
20,77	79,00	6,5
19,25	81,00	6,5
20,23	81,00	6,5
20,10	82,00	6,5
19,98	82,00	6,5
19,87	82,00	6,5
19,40	83,00	6,5
19,33	83,00	6,5
19,55	83,00	6,5
19,42	83,00	6,5
19,76	82,00	6,5

Tabla 6.3 Datos climatológicos en contraste con el clima del lugar

(Solano., San Martín, García & Ferrero 2009)

6.1.6. Conclusiones recogida de datos fase 1

Esta primera fase en el Delta del Ebro, fue ampliamente enriquecedora en el aspecto de reconocimiento de variables y de experiencia en tomas de medición en este tipo de áreas. Se tomaron datos climatológicos que posteriormente se correlacionaron con los datos lumínicos con la finalidad de analizar tendencias y se estudiaron los comportamientos de la contaminación lumínica en el lugar.

En resumen podemos concluir, que además de los importantes datos que se obtuvieron, esta fase sentó las bases que afinaron la metodología de trabajo.

6.2. Fase 2: Estudio en el Área Natural del Mar de Cortés

Esta segunda fase fue realizada con el objetivo de analizar la variable clima, desde una nueva perspectiva. En la primera fase, llevada a cabo en el Delta del Ebro, también fue analizada esta variable; sin embargo, en esta ocasión solo nos enfocamos en mediciones lumínicas y climatológicas con el objetivo de encontrar una tendencia entre las variaciones de contaminación lumínica.

Esta fase se propuso dos etapas principales:

- ❖ Medir y cualificar las condiciones lumínicas del lugar.
- ❖ Estudiar las influencias climatológicas que pudieran determinar variaciones en las mismas.

6.2.1. Descripción del ámbito de estudio

Los Mochis es una de las ciudades más importantes de Sinaloa, estado localizado en el norte de México. Tiene aproximadamente 200000 habitantes y está separada por 20 Kilómetros del golfo de California. Esta zona fue ideal para el estudio debido a que el lugar que une a la ciudad con el puerto es una carretera recta sin altitudes y sin lugares cercanos que pudieran causar interferencia en el estudio.

Para realizar las mediciones fue necesario trasladarse con los instrumentos y realizar mediciones a lo largo de los 20 kilómetros que separan la ciudad del puerto. El clima del lugar es especialmente cálido a lo largo del año, acrecentándose en verano, tipo cálido subhúmedo por la presencia cercana de la costa. Las mediciones se realizaron en el mes de diciembre. En esa época se

encontró un clima con variaciones en la humedad relativa (Entre el 50 y el 90 por ciento) y con una temperatura media de 15º c.

La ciudad cuenta con varias estaciones meteorológicas dentro de ella; sin embargo, como las estaciones de la ciudad abarcan por lo general el área urbana, en este caso utilizamos la estación meteorológica del aeropuerto internacional, que es la estación correspondiente al área que se estudió.

En cuanto a orografía, la zona estudiada es llana, con una altitud promedio de 17 metros sobre el nivel del mar. Carente de montañas o pendientes. En este caso no tomamos en cuenta los focos contaminantes, es decir la ciudad de Los Mochis, debido a que lo que analizamos fueron las condiciones lumínicas y su variación con respecto a las variaciones climatológicas del lugar estudiado.

6.2.2. Programación inicial y fases de trabajo

Este trabajo se realizó en una etapa comprendida entre el mes de diciembre de 2008 y enero de 2009. Se considero conveniente realizar primero las mediciones y auxiliándonos de la estación meteorológica, tomas los datos de clima en el momento de las mediciones.

En este caso, los supuestos de partida fueron los siguientes:

Los factores lumínicos que pueden definir las condiciones nocturnas afectadas por el clima son:

- Luminancia del fondo de cielo y sus variaciones con respecto al clima.

La variación de condiciones lumínicas de acuerdo al clima dependerá de:

- Condiciones de iluminación en el entorno.
- Contaminación atmosférica.
- Meteorología.

Al igual que en las otras fases de recogida de datos, y a objeto de avanzar en éste trabajo, se propusieron unas Etapas similares a las anteriores. Estas etapas también estuvieron siempre pendiente del resultado de las Etapas anteriores, o del “Feed back” de corrección detectado en los inicios metodológicos del trabajo. A continuación se puede observar que el esquema propuesto contiene una fase de recopilación de datos, señalando de nuevo que en esta fase se tomaron tanto datos lumínicos como de clima.

Fig. 6.10 Seguimiento de las Etapas de la investigación.

6.2.3. Planteamiento inicial del estudio

Esta fase también requirió un estudio con antelación del lugar de estudio, después de lo cual se establecieron los siguientes planteamientos:

A. Espacio de medición

Espacio de medición de luminancia del cielo. Constituido por mediciones hacia el zenit para evaluar la calidad del cielo. Las mediciones hicieron referencia a:

1) *Luminancia de la bóveda celeste*

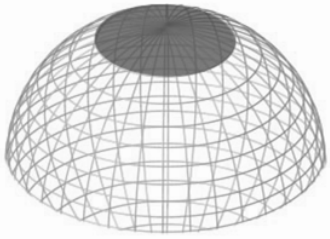


Fig. 6.11 Tipo de medición utilizada en esta fase

B. Dispositivos de medición utilizados en esta fase

Se contó como elementos básicos:

1) *Medidor de luminancia del fondo de cielo*

2) *Estación meteorológica*

Y como elemento complementario.

1) *Cámara fotográfica digital*
2) *Brújula*
3) *Termómetro*
4) *GPS*

Los modelos utilizados concretamente, ya fueron descritos en el apartado de metodología de este trabajo.

C. Determinación de los puntos de estudio

En este caso la determinación se tuvo siempre muy clara. El objetivo fue contrastar los datos lumínicos con los climatológicos, por lo tanto las mediciones fueron realizadas a lo largo del camino que separa La ciudad de Los Mochis del puerto de Topolobampo. En este caso especifico, se realizaron mediciones aproximadamente cada 200 metros a lo largo del tramo de 20 Kilómetros.

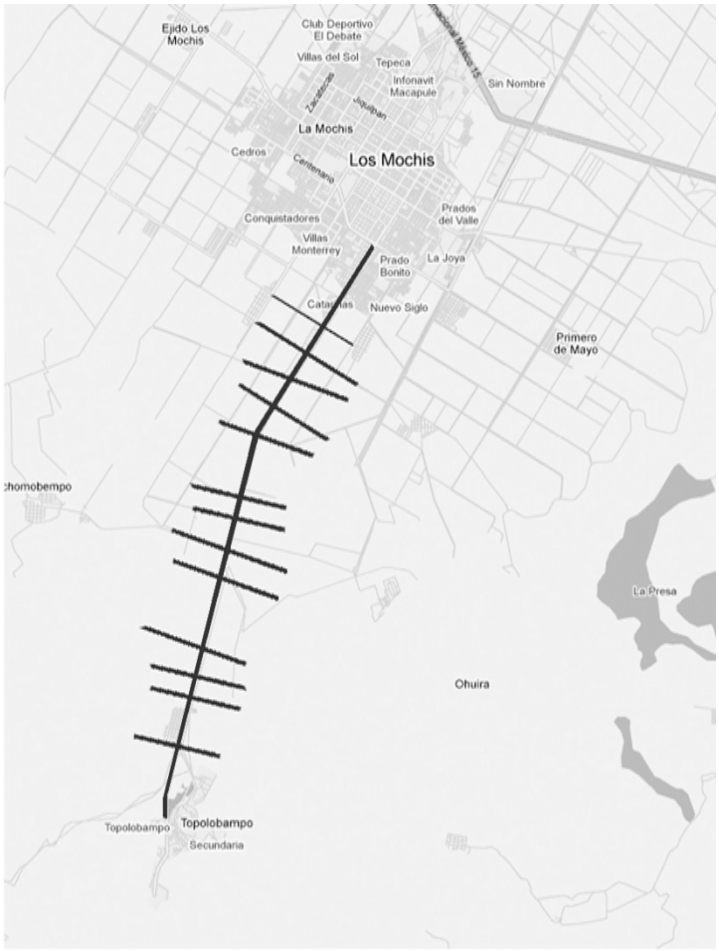


Fig. 6.12 Recorrido de medición

D. Identificación de los focos de contaminación

El punto de iluminación artificial nocturna que afectaba el área analizada es principalmente la ciudad de Los Mochis, por lo tanto se eligió como la población que se determinó influía en el lugar donde se realizó el estudio.

Asimismo, en esta fase fue necesario analizar el núcleo de población realizando una encuesta y análisis al municipio del lugar sobre el tipo y estado de sus instalaciones. Esto también fue complementado con visitas de campo y estudios de niveles, características urbanísticas, estado de las instalaciones y demás datos de interés a la investigación.

La encuesta utilizada se encuentra en el ANEXO III. Mediante ello, se consiguió información acerca de su EFS y GRE como valores de estudio representativos de su grado de contaminación lumínica. En el mapa siguiente se pueden observar los centros de contaminación estudiados, y proporcionalmente a su teórica afectación (proporcional a su población).

Fig. 6.13 Foco de contaminación estudiado

6.2.4. Trabajo de campo y recopilación de información

Para el trabajo de campo, al igual que la fase anterior, fue necesario trasladarse al lugar con los instrumentos y por la noche realizar reconocimientos y posteriormente mediciones. En estos recorridos, se efectuaron toda la serie de recogida de datos de luminancia del fondo de cielo, para determinar la calidad del cielo nocturno. Se realizaron las mediciones hacia el Zenit y se determinaron los datos climatológicos por medio de la estación meteorológica antes mencionada. No se encontraron perturbaciones en la metodología, los puntos de medición se realizaron tal y como se había planeado y los recorridos fueron los mismos propuestos en la metodología inicial.

6.2.5. Conclusiones de recogida de datos fase 2

Esta segunda fase en el área de Sinaloa fue necesaria para poder relacionar los datos lumínicos obtenidos con medidas climatológicas. Dado la experiencia que se adquirió con la primera fase, esta fase fue realizada con conocimientos específicos de lo que se quería obtener, y por lo tanto no se encontraron demasiados inconvenientes en el sistema utilizado.

Se tomaron datos climatológicos que posteriormente se correlacionaron con los datos lumínicos, lo cual se expone en el apartado de análisis estadístico de este trabajo, con la finalidad de analizar comportamientos y se analizaron los comportamientos de la contaminación lumínica en el lugar, agregando el análisis del foco contaminante. En resumen podemos concluir, que además de los importantes datos que se obtuvieron, esta fase se especificó en mediciones lumínicas, temperatura y humedad relativa.

6.3. Fase 3: Parque natural de Aigüestortes i Estany de Sant Maurici

Esta fase fue realizada con el objetivo de analizar la variable orografía, una de las partes del modelo propuesto, ya que hasta este momento solo se habían hecho mediciones en lugares carentes de montañas u otro tipo de formaciones geológicas. Como ya se mencionó en el apartado de marco teórico, la orografía representa una barrera que modifica la iluminación proveniente de los focos contaminantes y que, por lo tanto, afecta en cierta medida al índice de contaminación lumínica resultante. Esta fase fue realizada en el Parque Nacional de Aigüestortes i Estany De Sant Maurici. En este caso especifico, además de la importancia e interés de la investigación, por ser un lugar de montañas en donde se pudieran hacer mediciones relacionadas a la orografía, en la decisión de la elección de ese lugar se tomaron en cuenta los siguientes factores:

❖ Localizar una ciudad que estuviera naturalmente rodeada de obstáculos orográficos, en este caso montañas.

❖ Disponer de un lugar de relativamente fácil acceso -A pesar de eso se tuvo que caminar 10000 metros en una pendiente de más de 1000 metros SNM, cargando con los instrumentos de medición-.

Esta fase se propuso dos etapas principales:

❖ Medir y cualificar las condiciones lumínicas del lugar.

❖ Estudiar las influencias de tipo orográfico que pudieran determinar variaciones en las mismas.

6.3.1. Descripción del ámbito de estudio

Este parque se localiza en los Pirineos Catalanes, en la provincia de Lleida. Al ser un lugar de alta montaña, fue ideal para las mediciones -por la variable que se buscaba estudiar en esta ocasión-. Está sembrado con abetos centenarios, pinos de amitges, rododendros, pinos negros y arándanos. El área donde se localizaron las mediciones comprende el municipio de Vielha e Mijaran, capital de la comarca del Valle de Aran, localizado en los pirineos centrales.

Para realizar las mediciones fue necesario trasladarse con los instrumentos a una distancia de aproximadamente 10 kilómetros y subir a una altitud de 2010 metros SNM, a un refugio localizado a orillas de un lago llamado de la restanca. Ese lugar fue ideal, debido a que se tenía cerca una montaña de 3000 metros SNM que formaba barrera natural sobre la luz que provenía de las poblaciones del municipio.

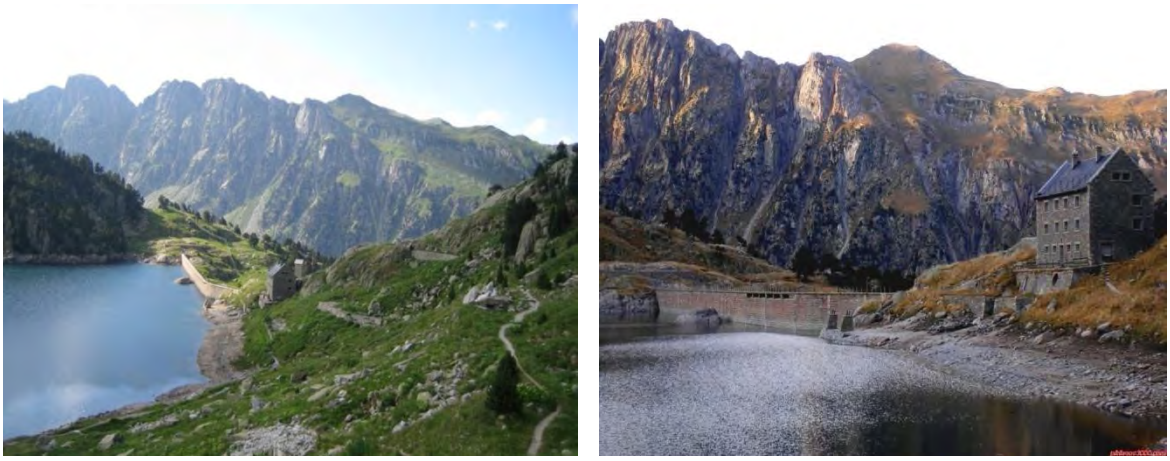


Fig. 6.14 Área desde donde se realizaron las mediciones

El clima del lugar es el típico de montaña. La mayoría del año lluvioso y con una humedad permanente, debido a las características de clima atlántico. Las mediciones se realizaron en el mes de septiembre. En esa época se encontró un clima con algunas nubes por la mañana, sin lluvias, pero con una humedad considerable. En el lugar se localizan tres estaciones meteorológicas, que fueron las que utilizamos para tomar los datos de clima que posteriormente se correlacionaron con los datos lumínicos. Más adelante se presentan las tablas climatológicas para los días específicos de las mediciones.

La orografía es pirenaica, de montaña. Una gran parte del parque sobrepasa los 1000 metros SNM y se encuentran montañas de una altitud de 3000 metros SNM. Existen gran cantidad de lagos de origen glaciar cuaternario. Las poblaciones analizadas en este trabajo, se encuentran a una altitud de 1000 metros SNM aproximadamente – por el interés de estudio, más adelante se explican las alturas exactas-.

Como ya se ha comentado, el lugar desde donde se realizaron las mediciones se encuentra una altura de 2010 metros SNM y esta naturalmente rodeado por montañas de aproximadamente 3000 metros SNM. Las áreas que se consideraron como criticas son las que se localizan dentro del municipio de Vielha e Mijaran. Son las áreas donde se constató la presencia cercana de focos y las áreas que se identificaron como importantes para el efecto que presenta la contaminación lumínica en el lugar estudiado.

6.3.2. Programación inicial y fases de trabajo

Este trabajo se realizó en una etapa comprendida entre el mes de septiembre y noviembre de 2009. Se considero conveniente realizar primero las mediciones y posteriormente la modelización de los focos contaminantes.

En este caso, los supuestos de partida fueron los siguientes:

Los factores lumínicos que pueden definir las condiciones nocturnas afectadas por orografía de montaña son:

- Luminancia del fondo de cielo.
- Iluminancia en planos verticales.
- Existencia de luminancias puntuales o sectoriales muy elevadas en el horizonte.

Las condiciones lumínicas dependerán de:

- ❖ Condiciones de iluminación en el entorno.
- ❖ Contaminación atmosférica.
- ❖ Meteorología.
- ❖ Orografía.

Al igual que en las otras fases de recogida de datos, y a objeto de avanzar en éste trabajo, se propusieron unas Etapas similares a las anteriores. Estas etapas también estuvieron siempre pendiente del resultado de las Etapas anteriores, o de la corrección por efectos detectados en Etapas posteriores.

Aquí también se puede observar que el esquema propuesto contiene una fase de recopilación de datos. Dentro de esa fase se realizaron las mediciones con instrumentos y el análisis de las poblaciones consideradas como focos contaminantes.

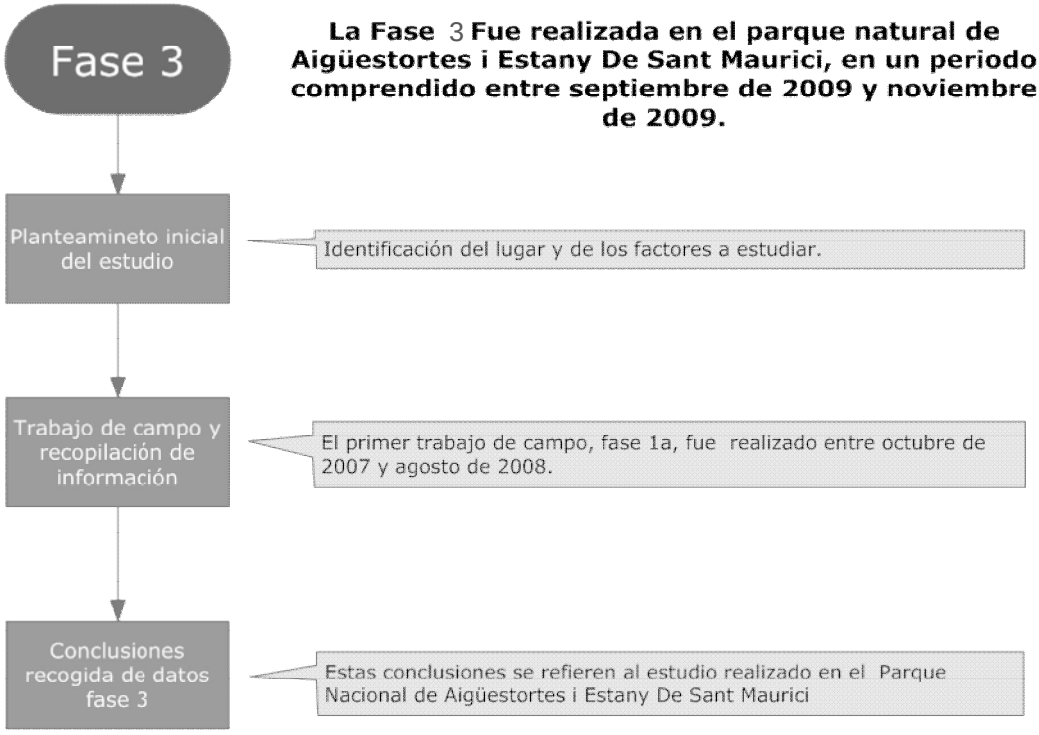


Fig. 6.15 Seguimiento de las Etapas de la investigación

6.3.3. Planteamiento inicial del estudio

Tras un estudio teórico y bibliográfico de la problemática y del lugar de estudio, se establecieron los siguientes planteamientos:

A. Espacio de medición

Similar a las fases anteriores, el espacio de medición se conformo de una cúpula cerrada constituida por el volumen curvo conformado por la bóveda celeste y teniendo como base el suelo del área. Las mediciones hicieron referencia a:

1) *Luminancia de la bóveda celeste.*
2) *Luminancias zonales y puntuales del horizonte.*

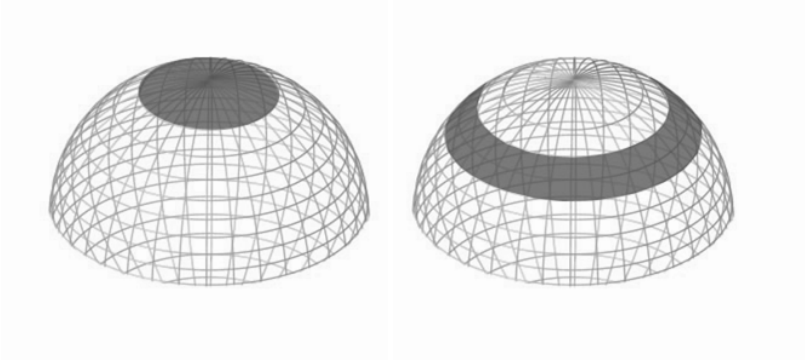


Fig. 6.16 Tipos de mediciones utilizados en esta fase

B. Dispositivos de medición utilizados en esta fase

Se contó como elementos básicos:

1) *Medidor de luminancia del fondo de cielo*
2) *Luminancímetro*
3) *Luxómetro*
4) *Estaciones meteorológicas*

Y como elementos complementarios:

1) *Cámara fotográfica digital*
2) *Brújula*
3) *Termómetro*
4) *GPS*

C. Determinación de los puntos de estudio

En este caso la determinación se tuvo siempre muy clara. Se buscaba un lugar donde poder analizar poblaciones que intervinieran en la contaminación lumínica y que estuviera dentro de una orografía de montaña.

Los puntos de estudio se localizaron en los alrededores del lago de la restanca, en el área de relativamente fácil acceso, ya que por la noche los riesgos de incidentes se ven incrementados y como se puede observar en el mapa –figura 6.15- el terreno en el lugar se accidenta a medida que la distancia hacia el lago se incrementa.

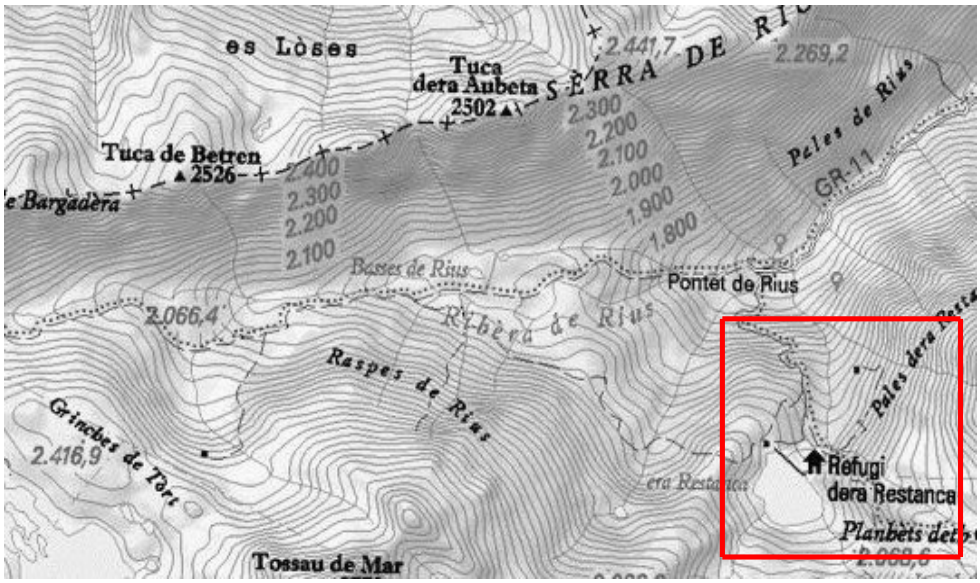


Fig. 6.17 Espacio donde se realizaron las mediciones

D. Identificación de los focos de contaminación

Los puntos de iluminación artificial nocturna que afectaban de manera significativa al parque se localizaron de la siguiente forma:

1) *Localización en imagen satelital.*
2) *Localización mediante observación sobre el terreno.*
3) *Comprobación del grado de influencia aplicando el modelo de Walker (1970).*
4) *Selección de los valores significativos.*

Al igual que en las fases anteriores, como en el Delta del Ebro, el estudio de núcleos contaminantes se condiciona a un estudio preliminar mediante el modelo de Walker (1970), de la teórica afectación de éstos, teniendo en cuenta su población, y su distancia al punto de análisis.

Esto se realiza con el objetivo de determinar los focos que potencialmente estarían afectando el área de estudio y, que por lo tanto, será necesario modelar. Los datos obtenidos son mostrados en la tabla 6.4, en Nanolamberts.

Municipio	Población	Distancia (Km)	Índice Walker	Lamberts	
Arties	430	7500	0,997455985	1,8064-09	ALTA
Betren	273	9500	0,350697021	3,51E-10	BAJA
Casau	63	10000	0,07119	7,12E-11	BAJA
Escunhau	97	9000	0,142640845	1,43E-10	BAJA
Garos	123	8500	0,208658577	2,09E-10	BAJA
Gausac	499	10000	0,56387	5,64E-10	BAJA
Vielha	2608	10000	2,94704	2,95E-09	ALTA

Tabla 6.4 Datos de las poblaciones cercanas según el modelo de Walker (1970)

Y la representación gráfica de esos datos:

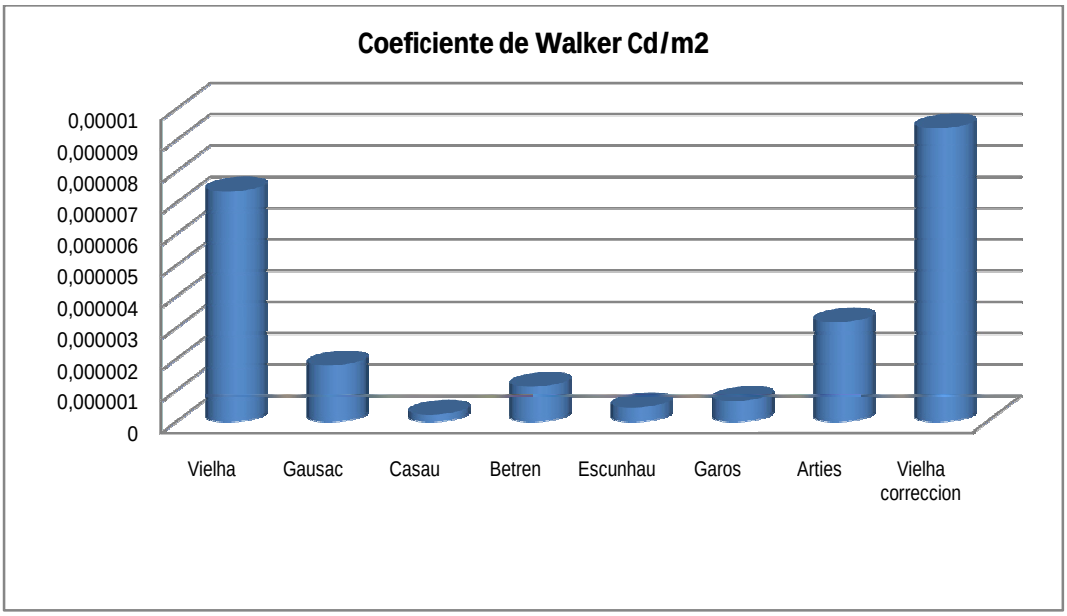


Fig. 6.18 Grafico de las poblaciones cercanas al parque según el modelo de Walker (1970)

Podemos ver en el gráfico, las poblaciones cercanas al lugar de estudio y su influencia. Se eligieron las poblaciones que se determinó influían en el lugar donde se realizó el estudio. Por lo tanto se han tenido en cuenta los siguientes núcleos de población: Vielha y Arties.

Al igual que las etapas anteriores, los núcleos de población se consideraron realizando una encuesta a los municipios y núcleos de población analizados, sobre el tipo y estado de las instalaciones de alumbrado. Complementada, como es usual, con visitas de campo y estudios de niveles, características urbanísticas, estado de las instalaciones y demás datos de interés en este contexto de la investigación. La encuesta utilizada se encuentra en el ANEXO IV del presente trabajo. Gracias a esto se consiguieron los datos del EFS y del GRE que nos indicaron la caracterización de la contaminación lumínica del foco. En el mapa siguiente se pueden observar los centros de contaminación estudiados, y equitativamente a su teórica afectación -proporcional al número de habitantes del lugar estudiado-:

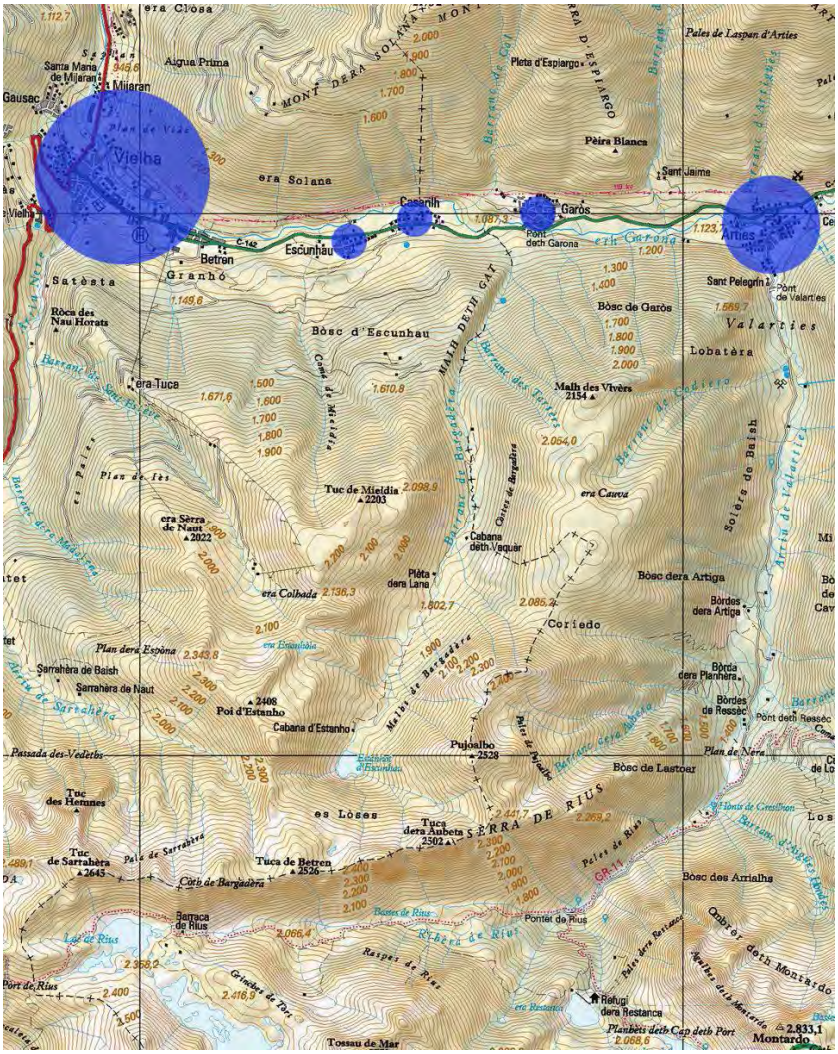


Fig. 6.19 Representación de las poblaciones de interés de estudio

6.3.4. Trabajo de campo y recopilación de información

Una vez localizados los puntos de influencia se llevaron a cabo las primeras mediciones.

Fig. 6.20 Tipos de luminarias encontradas en los focos contaminantes

De la misma manera en que fue desarrollándose el trabajo de campo, para esta fase también fue necesario trasladarse al parque con los instrumentos y por la noche realizar recorridos nocturnos de tomas de datos. Los recorridos se identificaron previamente por medición GPS y se efectúan toda la serie de mediciones de luminancia de fondo de cielo, así como del círculo completo de horizonte.

Se procuró realizar en primer lugar las mediciones hacia el horizonte, en donde se localizaban los focos contaminantes -La ciudad de Vielha y la ciudad de Arties-. Posteriormente se realizaron mediciones hacia el Zenit y por último hacia los puntos cardinales.

No se encontraron perturbaciones en la metodología, los puntos de medición se realizaron tal y como se había planeado y los recorridos fueron los mismos propuestos en la metodología inicial.

6.3.5. Conclusiones recogida de datos fase 3

De las medidas y preliminar tratamiento de los datos efectuados hasta esta etapa, se extrajo la dirección a seguir con la metodología propuesta, por lo que se continuó con el análisis de los focos contaminantes y las características orográficas del lugar.

Esta tercera fase en el área de Aiguastortes fue necesaria para poder relacionar los datos lumínicos obtenidos con medidas orográficas. Así como en la fase anterior y dado la experiencia que se adquirió con la primera fase, esta fase fue realizada con conocimientos específicos de lo que se quería obtener, y tampoco se encontraron demasiados inconvenientes en estudio.

Se tomaron datos orográficos y de terreno que posteriormente se correlacionaron con los datos lumínicos y se analizaron los comportamientos de la contaminación lumínica en el lugar, agregando el análisis del foco contaminante.

En resumen podemos concluir, que esta fase se especificó en mediciones lumínicas y de orografía.

6.4. Conclusiones de la recogida experimental de datos

La recogida experimental de datos se dividió en fases, y de esta manera se analizaron factores que con una sola fase no se hubieran podido abarcar. Se requirieron más de dos años de investigación de campo para poder obtenerlos. Y de esta manera se fue perfeccionando el método a seguir. Cada fase a su vez requirió de varios trasladas al área, y así se pudieron obtener datos en diferentes

temporadas y bajo diferentes circunstancias climatológicas o de terreno. El hecho de haber empleado conclusiones para cada fase, nos permite aclarar el enfoque directo de cada una de ellas.

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS LUMÍNICO

En este capítulo se presenta el análisis lumínico de los datos levantados en la recogida experimental. Como se observo en el capítulo 6, se necesitaron casi tres años para la total recogida, sin embargo los análisis que se muestran corresponden en base a una sinopsis de los datos. De igual forma, se pueden encontrar selección de mediciones en los ANEXOS VII, VIII.IX, X y XI.

7.1. Fase 1: Análisis lumínico en el Parque Natural del Delta del Ebro

Después de realizar la primera fase de trabajo de campo, se afina el método de estudio, y se obtienen las primeras tendencias, donde se pueden percibir la relación entre los focos contaminantes -normalmente, y en este caso, núcleos de población-, y la contaminación lumínica.

7.1.1. Medidas obtenidas

Se presenta un ejemplo de los datos en formato numérico, correspondientes a luminancia del cielo e iluminancia en suelo, y extrapolados a Cd/m² y Luxes.

Luminancia fondo del cielo				Iluminancia en suelo			
Valor de referencia 2.474×10^{-4} Cd/m²				Valor de referencia 5×10^{-5} Luxes			
Punto	Cd/m2			Punto	Luxes		
1	0,07268148	**20**	0,00070701	**1**	8,24668072	**20**	0,00057727
2	0,15900975	**21**	0,00081175	**2**	9,97455668	**21**	0,00055763
3	0,01228637	**22**	0,00087382	**3**	0,13665928	**22**	0,00064795
4	0,00890069	**23**	0,00075409	**4**	0,95425877	**23**	0,00061654
5	0,11205307	**24**	0,00074033	**5**	0,00699004	**24**	0,00063617
6	0,00147715	**25**	0,00068774	**6**	0,0007854	**25**	0,00067152
7	0,00120621	**26**	0,00079694	**7**	0,00064795	**26**	0,00038877
8	0,00121737	**27**	0,00079694	**8**	0,00047517	**27**	0,00060868
9	0,00122864	**28**	0,00084222	**9**	0,00067152	**28**	0,00062832
10	0,00122864	**29**	0,0006448	**10**	0,00086394	**29**	0,00065973
11	0,00081175	**30**	0,00070053	**11**	0,00051051	**30**	0,00062439
12	0,00057204	**31**	0,00062723	**12**	0,00353429	**31**	0,0006401
13	0,00081926	**32**	0,00062723	**13**	0,00055763	**32**	0,00060476
14	0,00102194	**33**	0,00094934	**14**	0,00046338	**33**	0,00037306
15	0,0008345	**34**	0,00062148	**15**	0,00057334	**34**	0,00067937
16	0,00101257	**35**	0,00070701	**16**	0,0006401	**35**	0,00066366
17	0,00078239	**36**	0,00070701	**17**	0,0005969	**36**	0,00063617
18	0,00078239	**37**	0,00063889	**18**	0,00060868	**37**	0,00058512
19	0,00078239	**38**	0,000669	**19**	0,00067544	**38**	0,00066759

Tabla 7.1 Ejemplo de Mediciones de recorrido entre La aldea y Deltebre (Solano, San Martín & García 2010a)

Estos datos corresponden al trayecto entre L'Aldea y Deltebre, de aproximadamente 9 km.

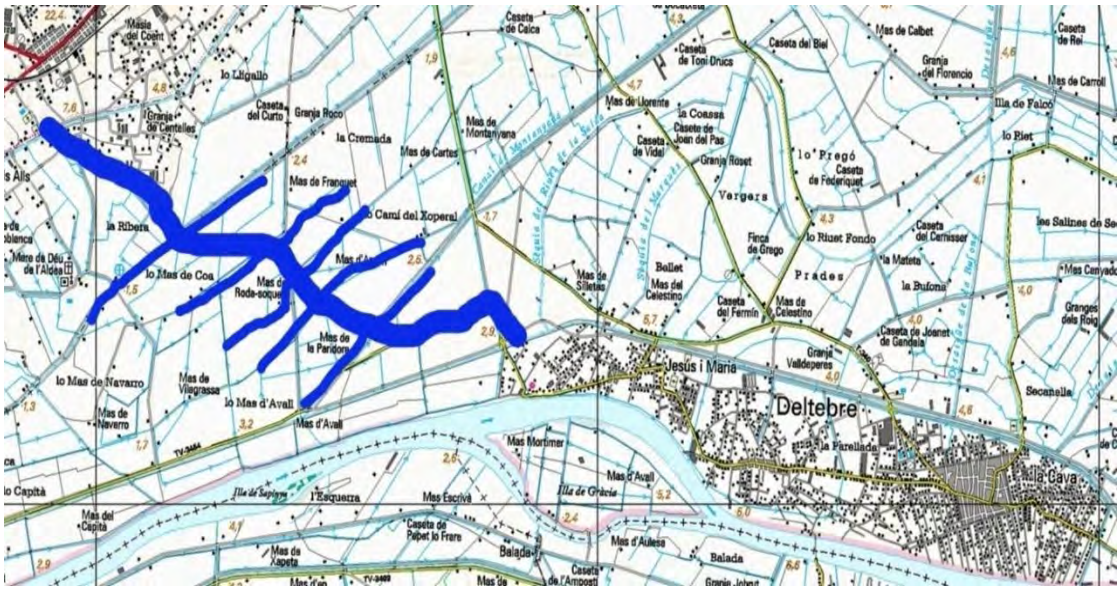
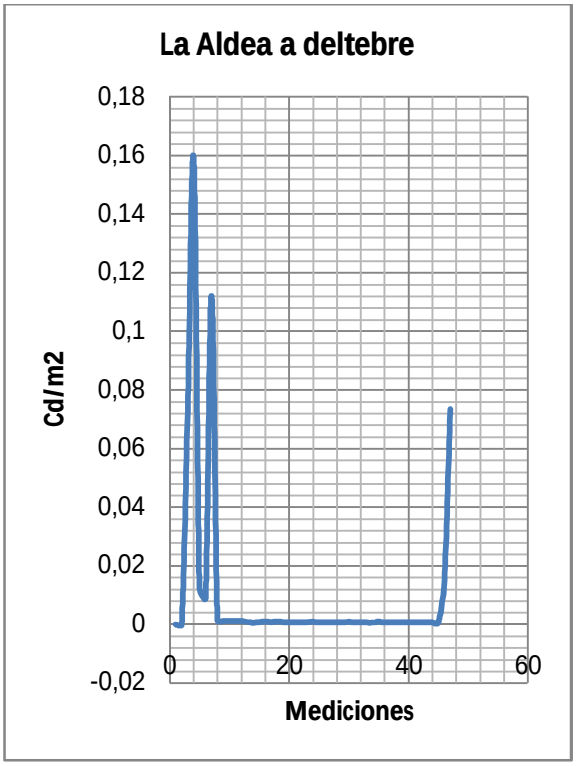
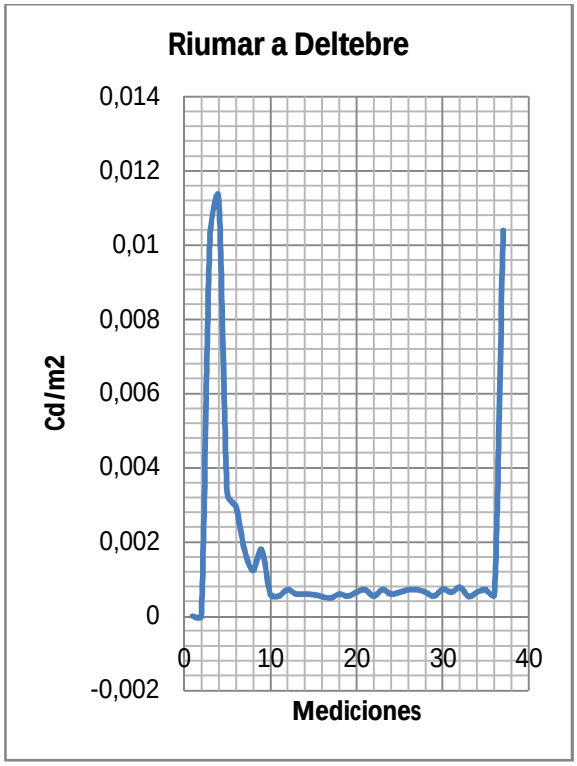


Fig. 7.1 Esquema de recorrido entre la aldea y Deltebre (Solano., San Martín & García 2009b)

Se puede observar, a simple vista, por los datos de la tabla 7.1, que ninguna medida llega a los parámetros considerados como cielo obscuro -21.6 Mag/arc-seg^2 o 2.474×10^{-4} Cd/m^2- Las representaciones graficas de los recorridos de medición se muestran a continuación.





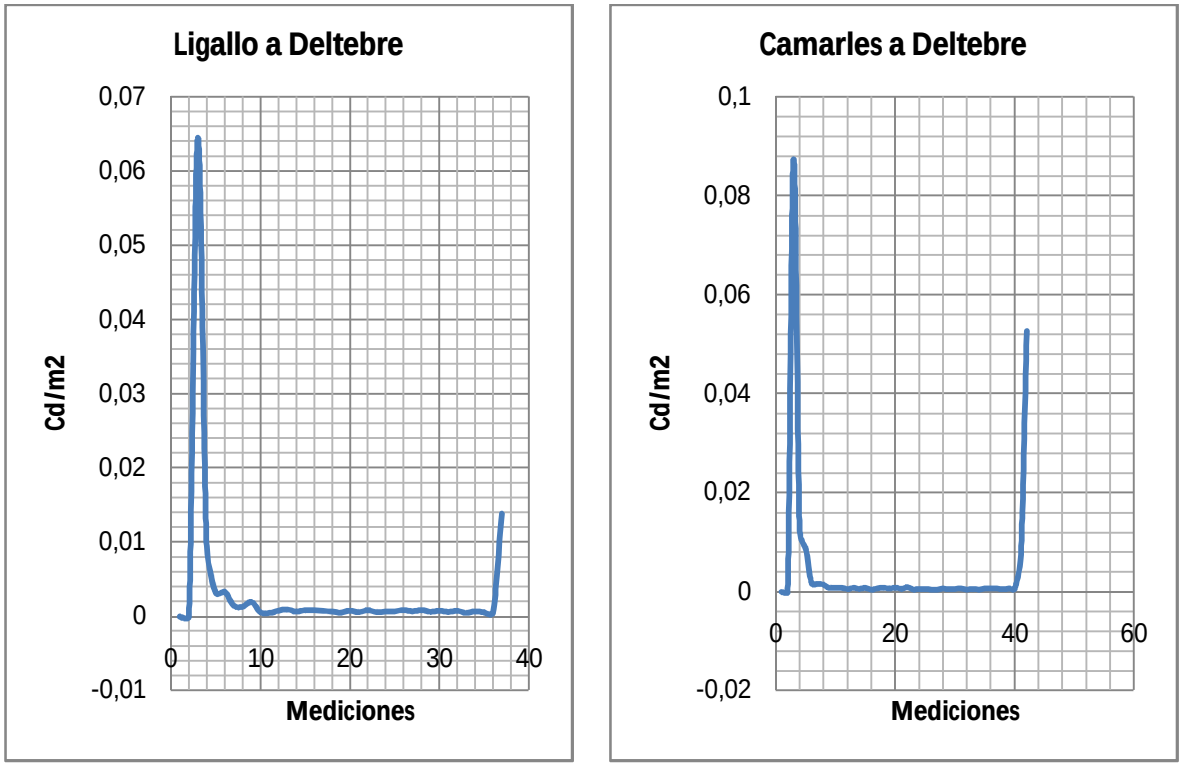


Fig. 7.2 Gráficos de recorridos de mediciones (Solano., San Martín & García 2009b)

Los datos expuestos son de fondo de cielo y de luminancia medida a nivel de suelo, sobre una superficie de reflectancia igual a 0,8, validada por la CIE.

7.1.2. Mapas de intensidad lumínica celeste

Si representamos en plano los datos obtenidos, podremos observar:

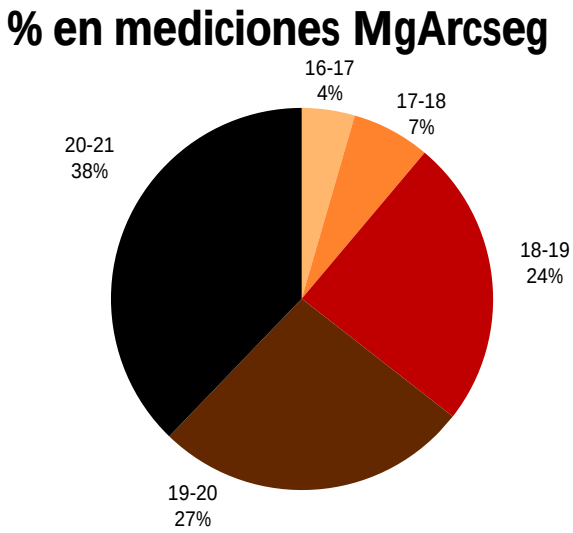


Fig. 7.3 Grafico de porcentaje de mediciones encontradas (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008)

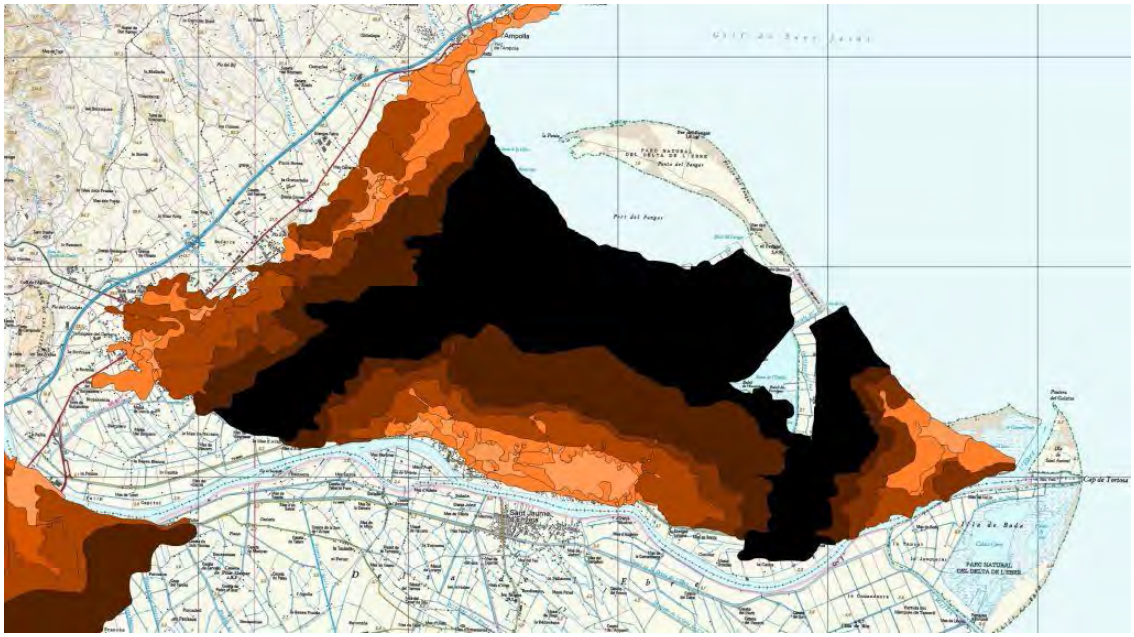


Fig. 7.4 Mapa lumínico del fondo del cielo según MgArcseg (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008)

En la representación de nivel según fondo de cielo, se puede ver la afectación a este valor, claramente dependiente de las poblaciones de alrededor, es decir de los focos de contaminación. De igual manera que con el gráfico lineal, se ve el rápido ascenso en este valor, y el valor residual latente, que evita que se consigan los 21,6 mg/arcseg (2.474×10^{-4} Cd/m^2) necesarios para obtener la noche natural.

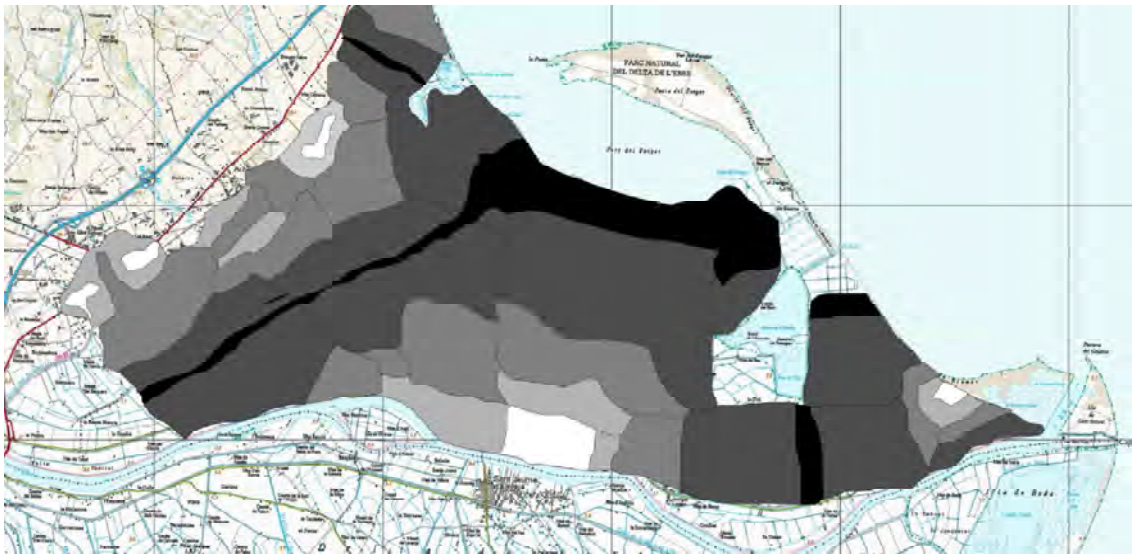


Fig. 7.5 Mapa lumínico de iluminancias del suelo según Luxes (Solano., San Martín, García & Ferrero 2008)

En la representación de la figura anterior, se observan los niveles de iluminancias a nivel de suelo. En esta se puede ver una correspondencia bastante cercana al mapa de fondo de cielo. Es decir, unos valores bastante altos en los lugares cercanos a las poblaciones, y una reducción

acusada y muy pronunciada a medida que nos vamos alejando de ellas, con los valores más altos en los puntos de intersección entre ellas. Otros de los valores a estudiar, es el de los puntos brillantes singulares, como focos de atracción o efecto barrera de la fauna del lugar. Estos puntos pueden ser industrias, halos luminosos de centros de contaminación, entre otros. En el momento de la elaboración de este documento se están realizando medidas para determinar su relación con el fenómeno. Análisis del efecto de los niveles de iluminación nocturna encontrados en el Delta del Ebro en la germinación del arroz. La variedad utilizada es "Arroz Delta del Ebro". Estudio en colaboración con biólogos de la Universidad de Barcelona.

7.1.3. Datos EFS Y GRE

Al igual que etapas anteriores, los núcleos de población se consideraron en esta etapa del estudio realizando una encuesta a los municipios y núcleos de población analizados, sobre el tipo y estado de sus instalaciones. Complementada con visitas de campo y estudios de niveles, características urbanísticas, estado de las instalaciones y demás datos de interés a la investigación necesarios para analizar el foco contaminante, así también se informatizaron los datos y se trataron con el modelo RAMAL-UPC –cuya metodología se puede observar en el ANEXO XII. Se realizaron un total de 12 encuestas –un ejemplo de esta, perteneciente a la fase 1, se puede observar en los ANEXOS I y II. Mediante ello, se consiguió información acerca de su EFS y GRE como valores de estudio representativos de su grado de contaminación lumínica. Los datos obtenidos se muestran en las siguientes tablas. El EFS, de interés para la presente investigación, se encuentra señalado.

Datos de análisis del foco	L'aldea	Ampolla	Camarles	Deltebre	Amposta
Habitantes	3.693	2.518	3.279	10.943	14.359
Total Potencia Instalada(W)	31.000,00	27.000.00	34.000,00	217.000,00	662.000,00
% potencia lámparas VM (50 lm/W)	70,00%	70,00%	95,00%	20,00%	48,00%
% potencia lámparas INC (10 lm/W)					0,00%
% potencia lámparas VSAP (100 lm W)	30,00%	25,00%	5,00%	80,00%	47,00%
% potencia lámparas HM (80 lm W)		5,00%			
% potencia lámparas FL (60 lm/W)				0,00%	5,00%
% luminarias tipo A (50 % FHS)					6,40%
% luminarias tipo B (35 % FHS)					2,70%
% luminarias tipo C (30 % FHS)					2,20%
% luminarias tipo D (20 % FHS)					12,00%
% luminarias tipo E (5 % FHS)					0,00%
% luminarias tipo F (1 % FHS)					76,10%
% luminarias tipo G (30 % FHS)					0,60%
FHS medio	12,00%	17,00%	6,00%	23,00%	5,84%
FHI medio	48,00%	43,00%	63,00%	46,00%	66,82%
FTI (klm)	0,00	0,00	0,00	19.530,00	48.988,00
FHS total	1.295,25	1.234,65	572,98	4.491,90	2.862,74
EFS estimado (Klm)	2.072,40	1.703,09	1.475,41	5.839,47	7.772,90
GRE estimado (Klm)	1.823,71	1.532,78	1445,21	3.970,84	6.311,59

Datos de análisis del foco	Sant Carles de la Ràpita	Sant Jaume d'Enveja	Els muntells	Poble Nou del Delta
Habitantes	15.300	2.843	499	250
Total Potencia Instalada(W)	400.000,00	30.000,00	16.300,00	9.700,00
% potencia lámparas VM (50 lm/W)	40,00%	15,00%	0,00%	95,00%
% potencia lámparas INC (10 lm/W)	0,00%	0,00%	85,00%	
% potencia lámparas VSAP (100 lm W)	55,00%	85,00%	15,00%	5,00%
% potencia lámparas HM (80 lm W)				
% potencia lámparas FL (60 lm/W)	5,00%	0,00%	0,00%	
% luminarias tipo A (50 % FHS)	20,00%	10,00%	10,00%	
% luminarias tipo B (35 % FHS)	30,00%	10,00%	0,00%	
% luminarias tipo C (30 % FHS)	0,00%	0,00%	0,00%	
% luminarias tipo D (20 % FHS)	20,00%	45,00%	80,00%	
% luminarias tipo E (5 % FHS)	20,00%	0,00%	0,00%	
% luminarias tipo F (1 % FHS)	5,00%	30,00%	10,00%	
% luminarias tipo G (30 % FHS)	5,00%	5,00%	0,00%	
FHS medio	20,66%	12,90%	12,33%	12,00%
FHI medio	49,84%	52,35%	43,68%	48,00%
FTI (klm)	31.200,00	2.775,00	383,05	0,00
FHS total	6.446,70	357,98	47,21	53,62
EFS estimado (Klm)	8.779,10	575,88	72,31	85,79
GRE estimado (Klm)	6.847,69	380,08	67,97	84,08

Datos de análisis del foco	Urb. ElsEucaliptus	Camping Aube	Riumar	Puerto Riumar
Habitantes	450	180	340	60
Total Potencia Instalada(W)	6.875,00	8.000,00	39.000,00	3.000,00
% potencia lámparas VM (50 lm/W)	100,00%	100,00%	17,00%	
% potencia lámparas INC (10 lm/W)				
% potencia lámparas VSAP (100 lm W)		0,00%	83,00%	100,00%
% potencia lámparas HM (80 lm W)				
% potencia lámparas FL (60 lm/W)				
% luminarias tipo A (50 % FHS)				
% luminarias tipo B (35 % FHS)				
% luminarias tipo C (30 % FHS)		100,00%		
% luminarias tipo D (20 % FHS)				
% luminarias tipo E (5 % FHS)				100,00%
% luminarias tipo F (1 % FHS)				
% luminarias tipo G (30 % FHS)				
FHS medio	5,00%	21,00%	6,00%	33,00%
FHI medio	50,00%	49,00%	54,00%	44,00%
FTI (klm)	343,75	400,00	3.568,50	300,00
FHS total	17,19	84,00	214,11	99,00
EFS estimado (Klm)	42,97	113,40	503,16	118,80
GRE estimado (Klm)	42,97	113,40	336,11	71,28

Tabla 7.2 Análisis correspondiente a los focos contaminantes

7.1.4. Mapa definitivo del Delta del Ebro

Después de realizar nuevas mediciones y tomar decisiones sobre esquemas que pudieran demostrar mejor la contaminación lumínica, se ha realizado un nuevo mapa de colores donde se

puede observar las condiciones lumínicas del parque. El mapa y la escala de colores se muestran a continuación.

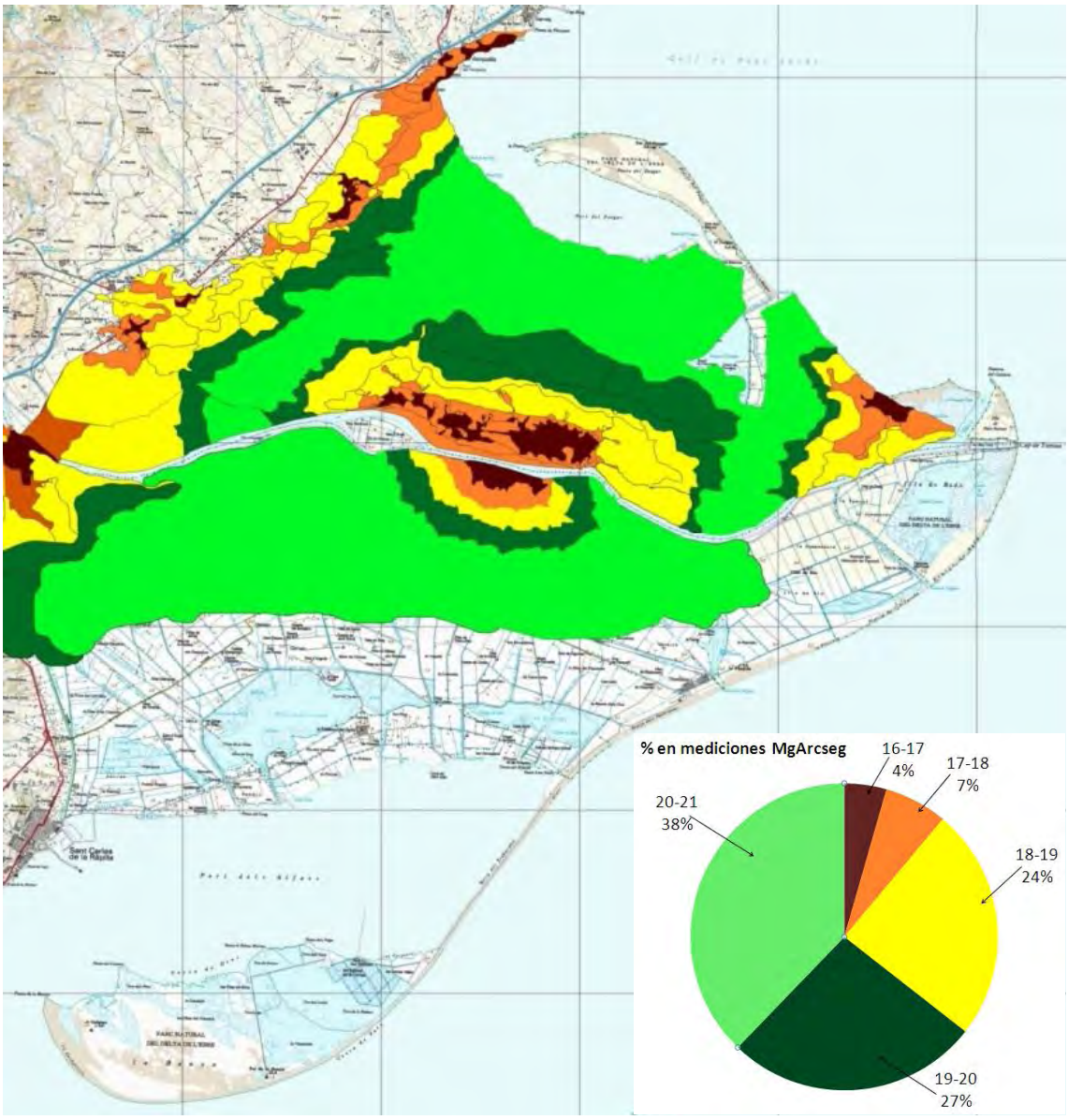


Fig. 7.6. Mapa definitivo con su respectivo gráfico (Solano., San Martín & García 2009a, 2009b, 2010a, 2010b)

En un principio se pensó utilizar la tipología de colores de Cinzano, Falchi y Elvidge (2001), ver ANEXO VI, pero se eligieron los colores mostrados por ser más explicativos graficamente.

7.1.5. Conclusiones del análisis lumínico de la Fase 1

A partir de la primera fase del trabajo, se llevaron cabo nuevas mediciones y un nuevo análisis de los datos con el fin de cerrar la investigación en el Delta del Ebro de manera definitiva. Se realizaron mediciones habituales y se graficaron de nuevo con el fin de observar su comportamiento. Las graficas continúan presentando un aumento dentro y fuera de las

poblaciones y una disminución a medida que nos alejamos de las mismas. En otras palabras, estas graficas nos indican que la contaminación lumínica varía dependiendo de la distancia a la que se encuentre el observador del foco contaminante.

7.2. Fase 2: Análisis lumínico en el Área Natural del Mar de Cortés

La segunda fase de trabajo consistió en mediciones de la calidad del cielo y de aspectos climatológicos. Posteriormente vendrían nuevas mediciones con el fin de afinar el método de medición.

7.2.1. Medidas obtenidas

A continuación se presenta un ejemplo de los datos en formato numérico y extrapolados a Cd/m². Estas mediciones corresponden al camino que se recorrió, el camino fue observado en el apartado de recogida experimental de la fase 2. Las mediciones corresponden al Zenit (Entre 10 y 2 de la mañana).

Luminancia fondo del cielo		**Luminancia fondo del cielo**	
Valor de referencia 21,6 Mag/arc-seg^2		**Valor de referencia 2.474×10-4 Cd/m²**	
Punto		**Punto**	**Cd/m2**
1	14,87	**1**	0,12173733
2	15,66	**2**	0,05880629
3	14,55	**3**	0,16346461
4	19,44	**4**	0,00180894
5	21,43	**5**	0,00028935
6	21,22	**6**	0,00035109
7	21,54	**7**	0,00026147
8	21,43	**8**	0,00028935
9	21,14	**9**	0,00037794
10	20,95	**10**	0,00045022
11	21,48	**11**	0,00027633
12	20,96	**12**	0,00044609
13	21,48	**13**	0,00027633
14	21,79	**14**	0,00020769
15	21,32	**15**	0,0003202
16	21,63	**16**	0,00024067
17	21,44	**17**	0,0002867
18	21,68	**18**	0,00022984
19	21,45	**19**	0,00028407
20	21,59	**20**	0,0002497
21	21,77	**21**	0,00021156
22	21,54	**22**	0,00026147
23	21,32	**23**	0,0003202
24	21,16	**24**	0,00037104
25	21,65	**25**	0,00023628
26	21,55	**26**	0,00025907
27	21,61	**27**	0,00024515
28	20,45	**28**	0,00071355
29	19,87	**29**	0,00121737
30	18,65	**30**	0,00374476
31	18,22	**31**	0,00556447

Tabla 7.3 Mediciones de luminancia de fondo de cielo

Se puede observar, a simple vista, que en este caso algunas medidas llegan a los parámetros considerados como cielo obscuro (21.6 Mag/arc-seg^2 o 2.474×10^{-4} Cd/m^2).

Los datos expuestos son de fondo de cielo. Su representación gráfica:

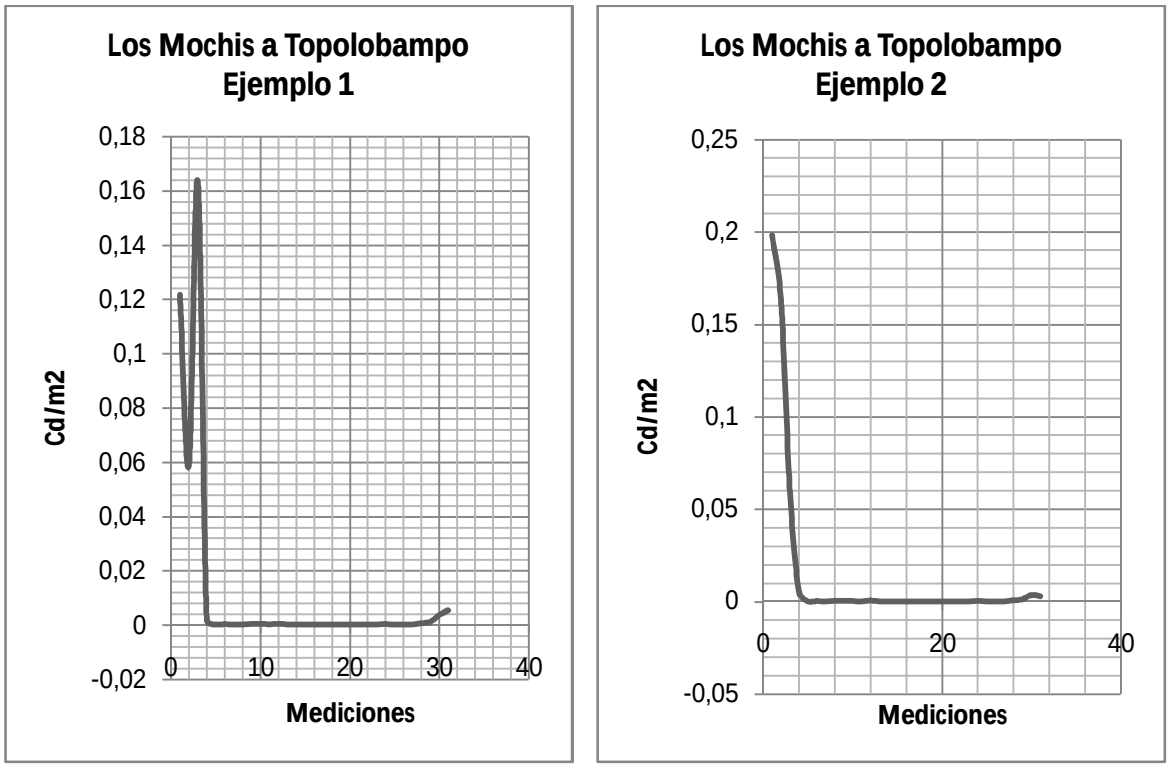


Fig. 7.7 Gráficos de recorridos de mediciones

Asimismo se puede ver perfectamente, esquematizado en los gráficos, los incrementos de Luminancia de fondo de cielo próximos a los núcleos de población. Con aumento muy significativos, y una cierta estabilidad a partir de aproximadamente 2 km de ellos. Llegándose a obtener medidas de noche natural en el medio de los recorridos de medición, es decir, en el punto más alejado de los focos contaminantes y por lo tanto con menos influencia. Como observamos, las primeras mediciones arrojaron los datos que se buscaban, por lo tanto se continuó con esta metodología -mediciones de luminancia del cielo y obtención de datos climatológicos-. Los datos nos mostraron que existe la noche natural en algunas partes del trayecto estudiado. Se llevaron a cabo dos nuevos recorridos nocturnos en días diferentes con el fin de comprobar la claridad de las primeras mediciones. Los recorridos fueron realizados tomando en cuenta la misma metodología de la primera etapa. Se realizaron mediciones de luminancia de fondo del cielo por medio del SQM.

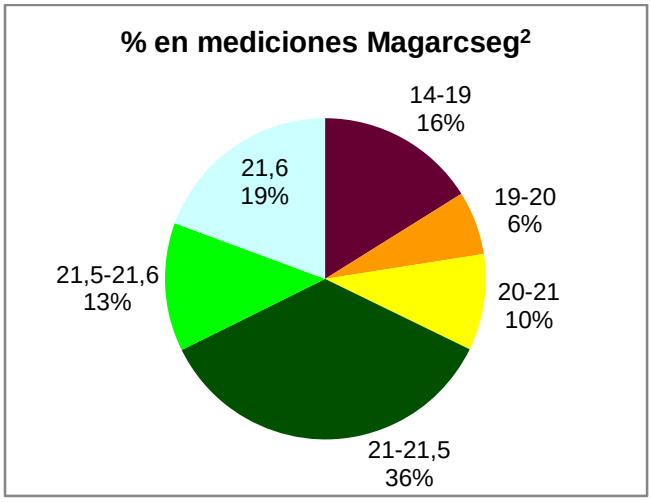


Fig. 7.8 Porcentaje de mediciones entre Los Mochis y Topolobampo, los colores corresponden a los elegidos para el mapa lumínico

7.2.2. Datos EFS Y GRE

Se realizo un análisis del foco contaminante de influencia del lugar y se obtuvieron los datos de caracterización relacionados a la contaminación lumínica proveniente del foco, en la tabla siguiente se observan dichos datos con el EFS señalado. La encuesta utilizada en esta ocasión se encuentra en el ANEXO III.

Datos de análisis del foco	Los Mochis
Habitantes	197000
Total Potencia Instalada(W)	1.987.000,00
% potencia lámparas VM (50 lm/W)	
% potencia lámparas INC (10 lm/W)	9,50%
% potencia lámparas VSAP (100 lm W)	90,50%
% potencia lámparas HM (80 lm W)	
% potencia lámparas FL (60 lm/W)	
% luminarias tipo A (50 % FHS)	4,00%
% luminarias tipo B (35 % FHS)	0,00%
% luminarias tipo C (30 % FHS)	3,00%
% luminarias tipo D (20 % FHS)	0,00%
% luminarias tipo E (5 % FHS)	77,00%
% luminarias tipo F (1 % FHS)	9,00%
% luminarias tipo G (30 % FHS)	7,00%
FHS medio	33,00%
FHI medio	44,00%
FTI (klm)	181.711,15
FHS total	59.964,68
EFS estimado (Klm)	71.957,62
GRE estimado (Klm)	45.908,96

Tabla 7.4 Análisis correspondiente al foco contaminante

7.2.3. Mapas de intensidad lumínica celeste

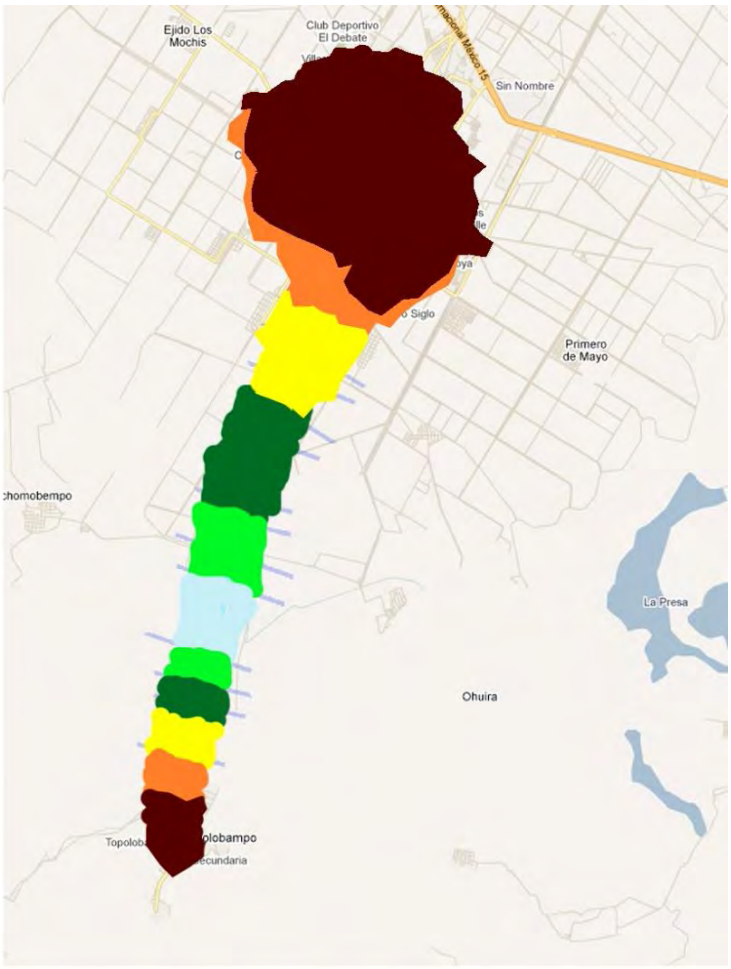


Fig. 7.9 Mapa lumínico del recorrido entre Los Mochis y Topolobampo
(Los colores en relación se observan en el grafico de la Fig. 7.8)

En la representación de nivel según fondo de cielo, de nuevo podemos observar la afectación a este valor, claramente dependiente de las poblaciones de alrededor en similitud con las anteriores fases, es decir de los focos de contaminación. De igual manera que con el gráfico lineal, se ve el rápido ascenso en este valor, y el valor residual latente, que evita que se consigan los 21,6 Mag/arc-seg^2 (2.474×10^{-4} Cd/m^2) necesarios para obtener la noche natural.

7.2.4. Conclusiones del análisis lumínico de la fase 2

En esta fase pudimos observar que si se encontraron espacios con medidas de noche natural, esto debido a que el único foco contaminante importante es la ciudad de Los Mochis. Las graficas muestran un comportamiento muy similar al de las otras fases, un aumento de la contaminación lumínica muy cerca de las poblaciones y una disminución determinante cuando nos alejamos del foco. El mapa lumínico también nos muestra un comportamiento de la contaminación lumínica

muy similar a los anteriores, agregando de nuevo que en un pequeño trayecto observamos los datos de noche natural.

7.3. Fase 3: Análisis lumínico en el Parque natural de Aigüestortes i Estany de Sant Maurici

Como fue mencionado anteriormente, esta fase fue realizada con el objetivo de analizar específicamente la variable orografía.

7.3.1. Medidas obtenidas

Se realizaron mediciones de fondo de cielo y hacia el horizonte de las poblaciones para observar comportamientos.

Luminancia fondo del cielo		Luminancia fondo del cielo	
Valor de referencia 21,6 Mag/arcseg^2		Valor de referencia 2.474×10-4 Cd/m^2	
Punto	**Mag/arcseg^2**	**Punto**	**Cd/m2**
1	21,43	**1**	0,00028935
2	21,75	**2**	0,00021549
3	21,54	**3**	0,00026147
4	21,73	**4**	0,00021949
5	21,74	**5**	0,00021748
6	20,95	**6**	0,00045022
7	21,48	**7**	0,00027633
8	20,96	**8**	0,00044609
9	21,48	**9**	0,00027633
10	21,79	**10**	0,00020769
11	21,32	**11**	0,0003202
12	21,63	**12**	0,00024067
13	21,77	**13**	0,00021156
14	21,44	**14**	0,0002867
15	21,68	**15**	0,00022984
16	21,45	**16**	0,00028407
17	21,59	**17**	0,0002497
18	21,65	**18**	0,00023628
19	21,54	**19**	0,00026147
20	21,32	**20**	0,0003202
21	21,76	**21**	0,00021351
22	21,55	**22**	0,00025907
23	21,61	**23**	0,00024515
24	21,71	**24**	0,00022358

Tabla 7.5 Mediciones de luminancia de fondo de cielo

7.3.2. Datos EFS Y GRE

Al igual que las etapas anteriores, los núcleos de población se consideraron en las siguientes etapas de este estudio realizando un estudio sobre el tipo y estado de sus instalaciones. Obteniéndose la información acerca de su EFS y GRE como valores de estudio representativos de su grado de contaminación lumínica, en la tabla 7.6 se pueden observar los datos. Se analizaron

las poblaciones de Vielha y Arties. Un ejemplo de una de las encuestas utilizadas se puede observar en el ANEXO IV.

Datos de análisis del foco	Vielha	Arties
Habitantes	2608,00	430,00
Total Potencia Instalada(W)	66435	8525
% potencia lámparas VM (50 lm/W)	41,50%	21,90%
% potencia lámparas INC (10 lm/W)	4,21%	9,38%
% potencia lámparas VSAP (100 lm W)	48,18%	45,16%
% potencia lámparas HM (80 lm W)	6,02%	23,46%
% potencia lámparas FL (60 lm/W)		
% luminarias tipo A (50 % FHS)		
% luminarias tipo B (35 % FHS)		
% luminarias tipo C (30 % FHS)		
% luminarias tipo D (20 % FHS)		
% luminarias tipo E (5 % FHS)		
% luminarias tipo F (1 % FHS)		
% luminarias tipo G (30 % FHS)		
FHS medio	33,00%	33,00%
FHI medio	44,00%	44,00%
FTI (klm)	4.927,28	666,79
FHS total	1.626,00	220,04
EFS estimado (Klm)	1.951,20	264,05
GRE estimado (Klm)	1.573,41	224,01

Tabla 7.6 Análisis de los focos contaminantes que afectan al lugar estudiado

7.3.3. Mapas de intensidad lumínica celeste

El mapa fue elaborado en base al lugar estudiado. Cabe destacar que en esta ocasión las mediciones se situaron en un área y no en recorridos, puesto que el enfoque del estudio era analizar el efecto de la orografía en la contaminación lumínica.

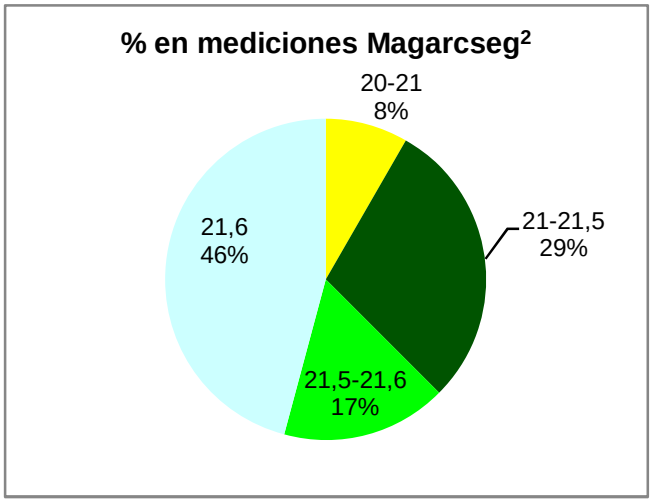


Fig. 7.10 Porcentaje de mediciones en el lugar, los colores corresponden a los elegidos para el mapa lumínico

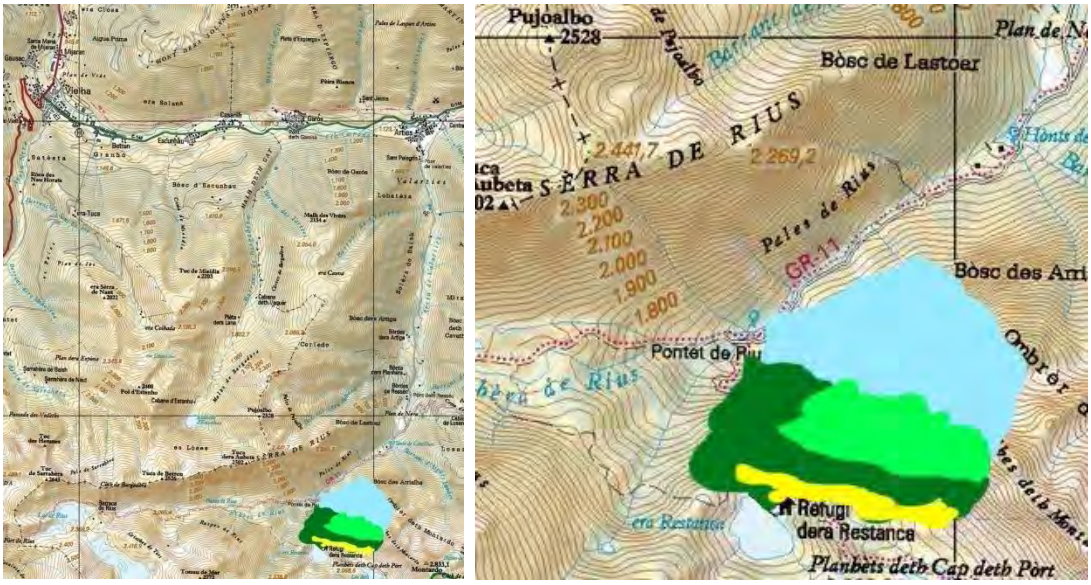


Fig. 7.11 Mapa lumínico del área de estudio, las mediciones correspondientes al color se muestran en la fig. 7.10

Podemos observar en el mapa lumínico del lugar de las mediciones, como los datos fueron variando entre 20 y 21,6 Mag/arcseg^2. En general, se encontraron mediciones de gran obscuridad, llegando a encontrar datos de noche natural, en azul, a medida que se iba descendiendo y por lo tanto las montañas, que como observamos en el mapa llegaban a alcanzar alturas de casi 2500 metros, generaban una barrera más efectiva. También hay que destacar que casi la mitad de las mediciones realizadas se encontraba en las medidas de noche natural 21,6 Mag/arcseg^2 o más.

7.3.4. Conclusiones del análisis lumínico de la fase 3

Los datos nos muestran la existencia de la noche natural en gran parte de la zona de estudio, creemos debido a la lejanía de núcleos muy importantes de población y de las barreras naturales formadas por las montañas. Así también pudimos observar en el mapa lumínico, que la contaminación lumínica disminuía a medida que la barrera orográfica crecía ante las mediciones; es decir, mientras se descendía por la ladera de la montaña. Esto nos sirvió posteriormente para determinar la afectación de la orografía en las mediciones.

7.4. Conclusiones del análisis lumínico

Después de llevar a cabo el análisis lumínico y partiendo de la premisa de que para la realización de la investigación fue necesario llevar a cabo recorridos piloto de reconocimiento y medición en los espacios seleccionados para el estudio; datos que aportaron la identificación de luminosidad

nocturna del lugar y permitieron establecer herramientas graficas de análisis de las características. Podemos mencionar las conclusiones siguientes al respecto:

- ❖ En las representaciones gráficas de nivel según fondo de cielo, llevadas a cabo por medio de mapas lumínicos, se pudieron observar las afectaciones de la contaminación lumínica directamente proporcional al tamaño y potencia utilizada por las poblaciones –focos de contaminación- de los lugares analizados.
- ❖ En las representaciones gráficas de los niveles de iluminancias a nivel de suelo, se pudo ver una correspondencia bastante cercana al mapa de fondo de cielo. Es decir, unos valores bastantes altos en los lugares cercanos a los focos contaminantes, y una reducción muy pronunciada a medida que nos vamos alejando de ellas, con unos aumentos significativos cuando dos o más focos se presentan afectando el mismo lugar.
- ❖ Determinamos que las mediciones hacia los horizontes de las ciudades pudieran estar afectando los procesos de migración, principalmente en el análisis llevado a cabo en el parque natural del Delta del Ebro. La comunidad de biólogos del parque comentaron acerca de irregularidades en algunas especies. Sin embargo, por falta de datos concisos, este punto no pudo ser determinado. Lo que sí se puede concluir es que por encima de las poblaciones de los lugares analizados se encuentra una barrera lumínica que no existiría en condiciones naturales de iluminación nocturna.
- ❖ De igual manera los gráficos lineales de las medicines nos mostraron el repentino ascenso de la contaminación lumínica alrededor y dentro del foco contaminante, para posteriormente normalizarse –casi en el mismo valor- a pesar de nunca haber encontrado mediciones de condiciones de iluminación nocturna.
- ❖ Derivado de las anteriores disertaciones concluimos que ninguno de los espacios analizados cuenta con un lugar, salvo en datos aislados, en donde se obtengan condiciones de iluminación nocturna natural –refiriéndonos al estándar de noche natural que ya se ha discutido anteriormente en este trabajo, 21,6 Mag/arcseg^2-.

CAPÍTULO 8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos arrojados por las tres fases de recogida experimental de datos fueron analizados por una herramienta de estadística de correlación paramétrica; específicamente modelos de regresión lineal. En éste caso se utilizaron los modelos de correlación de Pearson, Spearman y Kendall. En resumen, son modelos matemáticos que nos ayudan a estimar la relación que existe entre dos variables cuantitativas. Asimismo, los datos posteriormente fueron tratados con un análisis de estadística multivariante buscando asegurar la utilización de técnicas bivariadas y sobre todo para determinar que no hubiera factores que intervinieran en los resultados del estudio. Se llevaron a cabo búsquedas de correlación múltiple, coeficiente de determinación ajustado y análisis de varianza en las variables que así lo requirieron. El análisis estadístico se realizó con el objetivo principal de considerar posibles correlaciones entre los factores estudiados y la contaminación lumínica medida. Así también, funcionó como método de validación de los modelos y herramientas empleados. La estadística de datos no se dividió por fases, se dividió por cada factor analizado, sin embargo se mencionará de qué fase provienen los datos que se estén analizando.

8.1. Correlación entre mediciones lumínicas y humedad relativa

En las siguientes tablas podremos observar correlaciones entre la humedad relativa y los datos lumínicos. Estos datos se obtuvieron de la fase tres, realizada en el Delta del Ebro y en la cual se pudieron obtener datos climatológicos. Cabe señalar que los datos analizados en este segmento pertenecen a datos recogidos en ausencia de influencia lunar. Se realizó con el objetivo de encontrar relación entre la humedad relativa del lugar y las mediciones de contaminación lumínica en el mismo. En el anexo XX se encuentra una de las tablas climatológicas utilizadas.

		MEDICIONES	HUMEDAD
MEDICIONES	Correlación de Pearson	1	-0,832
	N	179	179
HUMEDAD	Correlación de Pearson	-0,832	1
	N	179	179
MEDICIONES	Correlación de Kendall	1,000	-0,722
	N	179	179
HUMEDAD	Correlación de Kendall	-0,722	1,000
	N	179	179
MEDICIONES	Correlación de Spearman	1,000	-0,813
	N	179	179
HUMEDAD	Correlación de Spearman	-0,813	1,000
	N	179	179

Tabla 8.1. Correlaciones de mediciones y la humedad relativa

Se puede observar, en las tres pruebas, que existe una buena correlación negativa entre la contaminación lumínica y la humedad relativa. La correlación negativa significa que si una variable disminuye la otra aumenta. Viendo que la unidad utilizada es Mag/arcseg^2 y recordando que esta medida entre menor sea mayor es la contaminación lumínica, nos atrevemos a indicar que si la humedad relativa aumenta disminuyen los Mag/arcseg^2.

En otras palabras, hay una relación entre el aumento de la contaminación lumínica y el aumento de la humedad relativa.

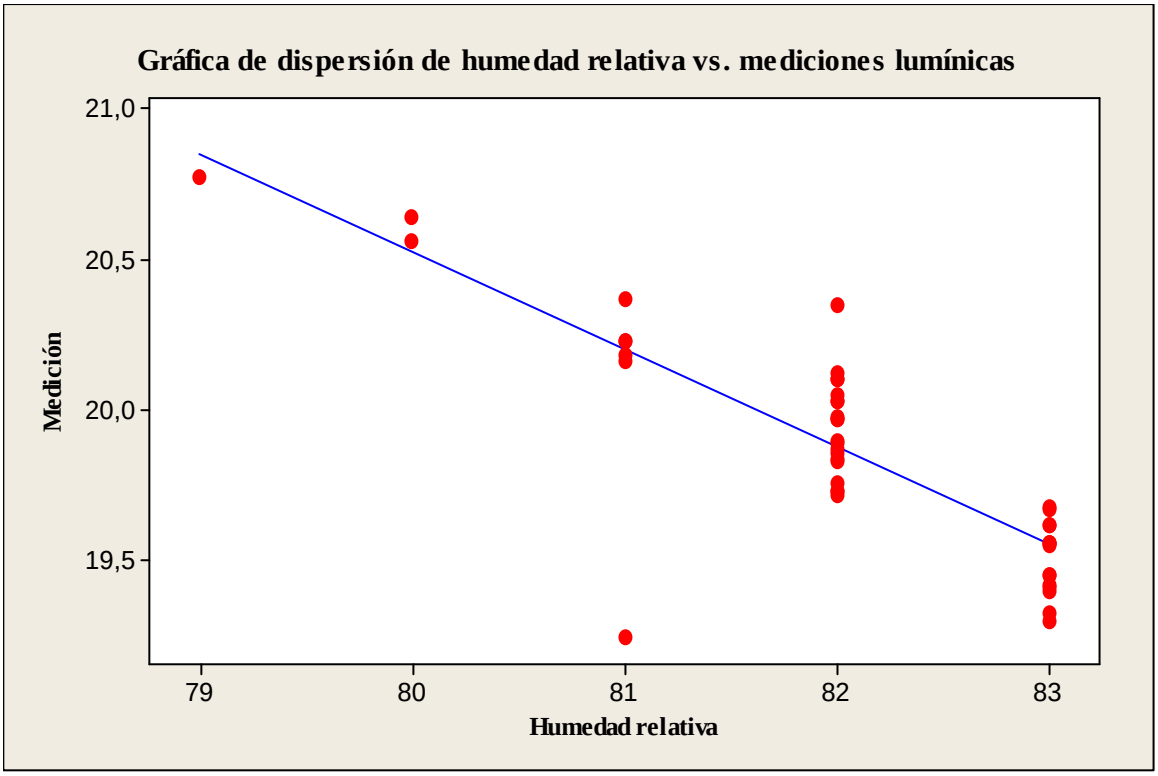


Fig.8.1 Histograma de la correlación entre las dos variables.
(Solano., San Martín, García & Ferrero 2009)

8.2. Correlación entre mediciones lumínicas y temperatura

Este apartado también involucra datos tomados en el Delta del Ebro, en la fase tres. Se realizó con el objetivo de encontrar relación entre la temperatura ambiente y las mediciones de contaminación lumínica del lugar.

La misma prueba anterior se efectuó tomando en cuenta los datos lumínicos y la temperatura en el momento de las mediciones.

Los análisis se muestran a continuación.

		MEDICIONES	TEMPERATURA
MEDICIONES	Correlación de Pearson	1	0,208
	N	179	179
TEMPERATURA	Correlación de Pearson	0,208	1
	N	179	179
MEDICIONES	Correlación de Kendall	1,000	0,162
	N	179	179
TEMPERATURA	Correlación de Kendall	0,162	1,000
	N	79	79
MEDICIONES	Correlación de Spearman	1,000	0,213
	N	179	179
TEMPERATURA	Correlación de Spearman	0,213	1,000
	N	179	179

Tabla 8.2. Correlaciones de mediciones y la temperatura

Se puede observar, tanto por los índices de correlación (Pearson 0,208 / Kendall 0,162 / Spearrman 0,213) como por la siguiente gráfica, que **no se encontró ninguna relación entre la temperatura y la contaminación lumínica.**

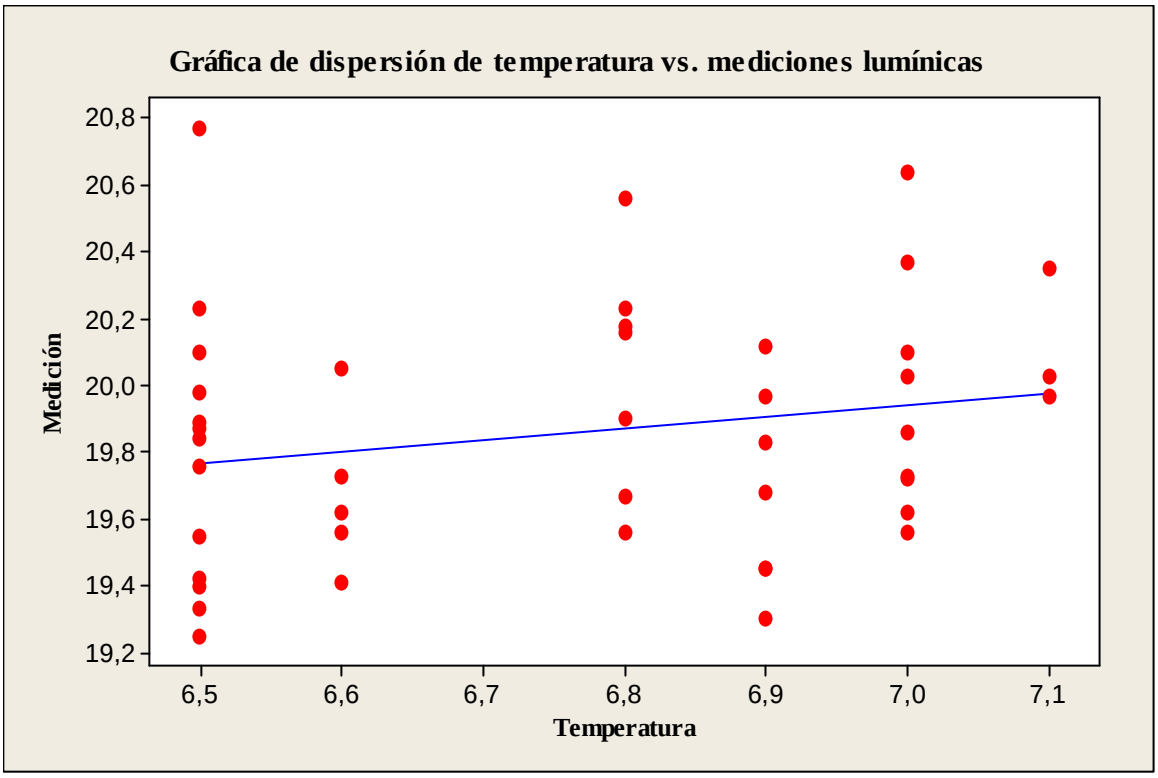


Fig. 8.2 Histograma de la correlación entre las dos variables (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009)

8.3. Correlación entre datos arrojados por instrumentos

Se muestra un análisis efectuado con el enfoque de analizar el comportamiento de los instrumentos de medición utilizados. Como se recordará, se utilizo un luminancímetro y un SQM. Los datos utilizados provienen del Delta del Ebro, de la fase 1b.

		LUMINA	SQM
LUMINA	Correlación de Pearson	1	-0,972
	N	40	40
SQM	Correlación de Pearson	-0,972	1
	N	40	40
LUMINA	Correlación de Kendall	1,000	-0,597
	N	40	40
SQM	Correlación de Kendall	-0,597	1,000
	N	40	40
LUMINA	Correlación de Spearman	1,000	-0,657
	N	40	40
SQM	Correlación de Spearman	-0,657	1,000
	N	40	40

Tabla 8.3 correlaciones entre los dos instrumentos de medición

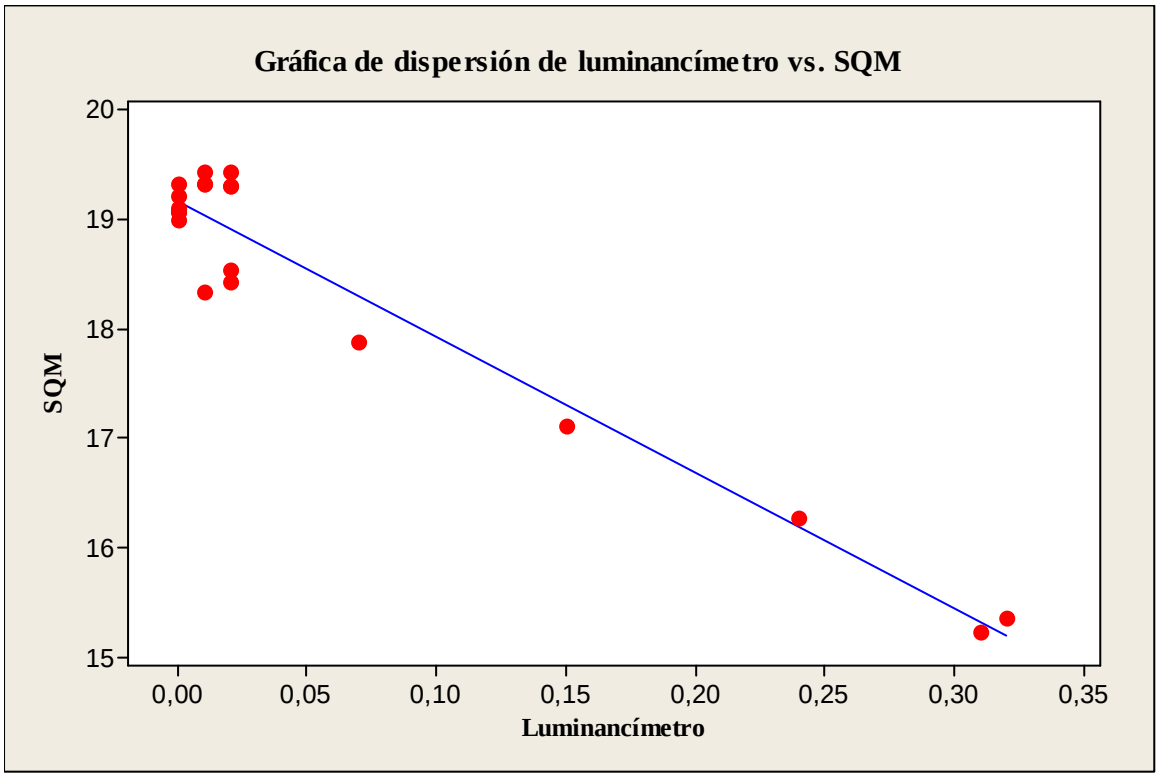


Fig. 8.3 Histograma de correlación entre los dos instrumentos (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009)

Esta prueba se realizó con el objetivo de validar los instrumentos de medición. El luminancímetro es un instrumento bastante preciso, con calibraciones validadas. Se tenía la duda de que el SQM arrojara los datos adecuados. Pero como se puede ver, **tanto por los índices de correlación (-0,972, -0,597 y –0,657) -Negativo por la misma razón que ya se explicó en un apartado anterior- como en la gráfica, los datos de ambos instrumentos presentan una relación casi perfecta.**

8.4. Correlación entre número de habitantes del foco y datos modelo de Walker (1970)

El modelo de Walker (1970) se utilizó con el objetivo de seleccionar las poblaciones a estudiar, estas correlaciones se realizaron para ver si fue una decisión acertada. Los datos provienen de las tres fases, se analizaron 27 poblaciones incluyendo algunas que no se tomaron para el estudio pero que si se trataron con el modelo de Walker (1970).

		POBLACIÓN	ÍNDICE WALKER
POBLACIÓN	Correlación de Pearson	1	1
	N	27	27
ÍNDICE WALKER	Correlación de Pearson	1	1
	N	27	27
POBLACIÓN	Correlación de Kendall	1,000	1
	N	27	27
ÍNDICE WALKER	Correlación de Kendall	1	1,000
	N	27	27
POBLACIÓN	Correlación de Spearman	1,000	1
	N	27	27
ÍNDICE WALKER	Correlación de Spearman	1	1,000
	N	27	27

Tabla 8.4 Correlaciones entre población y datos generados con el modelo de Walker (1970).

Para la validación anterior, también fueron correlacionados los datos que arrojó la prueba, específicamente datos lumínicos y de población. **Se puede observar una relación perfecta, por lo que la utilización de éste método fue una buena elección.**

8.5. Correlación entre número de habitantes del foco y datos EFS

Ya se mencionó, en el apartado de recogida experimental de datos, lo que representa el índice EFS para la presente investigación. La mayoría de los modelos utilizados en la medición de la

contaminación lumínica, toman en cuenta los números de habitantes al momento de determinar la emisión lumínica de las ciudades. Esta correlación se realizó con el objetivo de determinar relaciones entre el EFS y la cantidad de habitantes de las ciudades analizadas. Los datos provienen de las tres fases analizadas, se tomaron en cuenta las 16 poblaciones estudiadas con el modelo RAMAL-UPC, en resumen se muestran en la tabla 8.5.

Población	No. de habitantes	EFS
L'aldea	3693	2072,4
Ampolla	2518	1703,1
Camarles	3279	1475,4
Deltebre	10943	5839,5
Amposta	14359	7772,9
Sant Carles de la Ràpita	15300	8779,1
Sant Jaume d'Enveja	2843	575,9
Els muntells	499	72,3
Poble Nou del Delta	250	85,8
Urb. ElsEucaliptus	450	43,0
Camping Aube	180	113,4
Riumar	340	503,2
Puerto Riumar	60	118,8
Los Mochis	197000	71957,6
Vielha	2608	1951,2
Arties	430	264,1

Tabla 8.5 No. de habitantes y EFS de las poblaciones analizadas con este trabajo

Teniéndose ya recopilados todos los datos reales de instalación en las poblaciones elegidas para el estudio y de los cuales se muestra el EFS en la tabla 8.4, se procedió a correlacionar los datos para ver si se encontraba una relación entre los habitantes de la población y su Emisión de Flujo Superior estimado. Se excluyo la ciudad de Los Mochis, ya que al ser la de mayor población podría condicionar los resultados. Estas relaciones e muestran en las tablas siguientes.

		HABITANTES	EFS
HABITANTES	Correlación de Pearson	1	0,992
	N	15	15
EFS	Correlación de Pearson	0,992	1
	N	15	15
HABITANTES	Correlación de Kendall	1,000	0,657
	N	15	15
EFS	Correlación de Kendall	0,657	1,000
	N	15	15
HABITANTES	Correlación de Spearman	1,000	0,829
	N	15	15
EFS	Correlación de Spearman	0,829	1,000
	N	15	15

Tabla 8.6 Correlaciones entre población y datos EFS

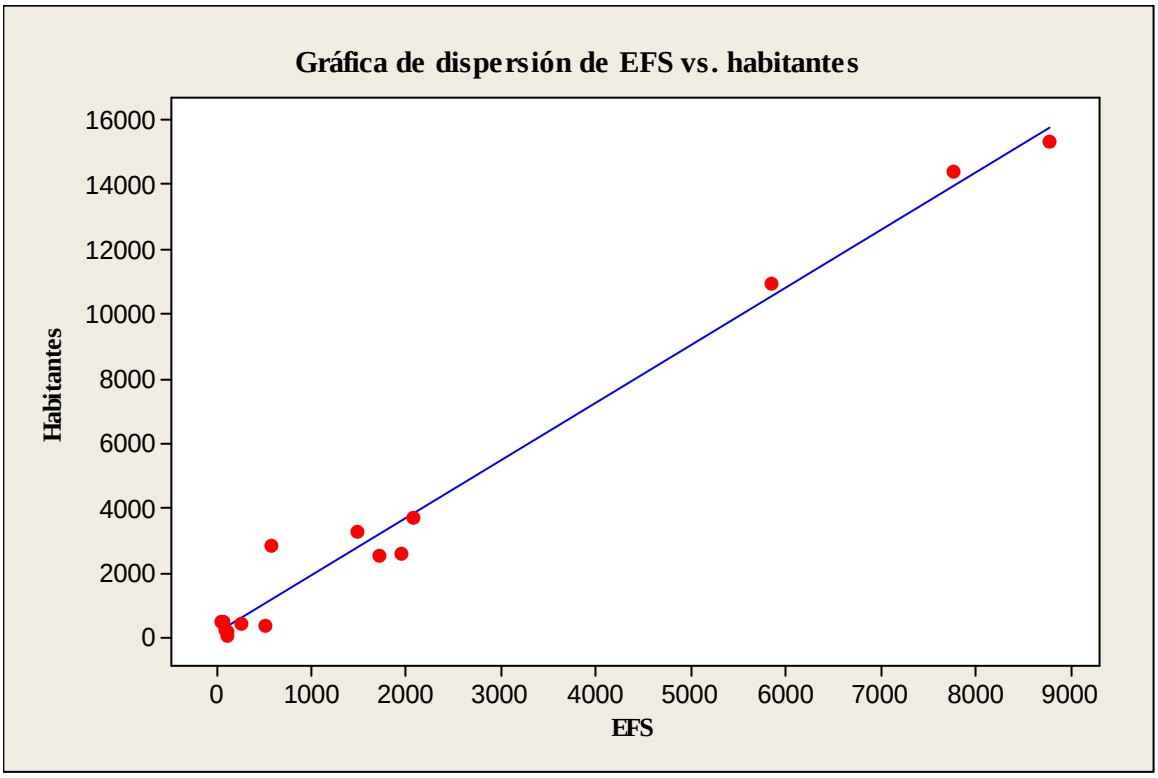


Fig. 8.4 Histograma de correlación entre habitante e índice EFS (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009)

En los datos anteriores observamos que encontramos una relación casi perfecta. Por lo que podemos suponer que entre mayor es el número de habitantes mayor es la contaminación. Una afirmación casi obvia; aunque debemos recordar que no siempre es así, sobre todo en poblaciones que tienen bastante controlada su iluminación nocturna artificial.

Sin embargo, **estos datos nos sirvieron para darnos cuenta que las poblaciones estudiadas poseen un grado de contaminación homogéneo.**

8.6. Correlación entre mediciones lumínicas y distancia de medición

Ese apartado se realizó con el objetivo principal de encontrar una correlación entre la contaminación lumínica y la distancia que existe hacia el centro urbano.

De esta manera tener bases para determinar la forma de trabajar con la distancia en el modelo propuesto. Los datos se obtuvieron en uno de los recorridos realizados en el Delta del Ebro, en la fase uno de la recogida experimental de datos. Estos datos se muestran, junto con la distancia, en las tablas 8.6 y 8.7.

Analizando Deltebre (Marzo 2008)		Analizando Deltebre (Noviembre 2008)	
Medición en Mag/ArcSeg^2	Distancia en Metros	Medición en Mag/ArcSeg^2	Distancia en Metros
17,56	0	17,27	0
17,45	0	16,6	0
18,78	200	16,48	200
18,9	400	18,36	400
19,45	600	18,74	600
19,86	800	18,23	800
19,45	1000	18,43	1000
20,65	1200	18,54	1200
20,75	1400	19,12	1400
20,45	1600	18,68	1600
20,65	1800	18,79	1800
20,65	2000	18,72	2000
20,68	2200	18,24	2200
20,78	2400	18,87	2400
20,87	2600	19,54	2600
20,65	2800	19,23	2800
20,76	3000	19,67	3000
20,56	3200	19,34	3200
20,45	3400	20,76	3400
20,76	3600	20,54	3600

Tabla 8.7 Correlaciones entre mediciones y distancia del foco

		MEDICIONES	DISTANCIA
MEDICIONES	Correlación de Pearson	1	0,799
	N	20	20
DISTANCIA	Correlación de Pearson	0,799	1
	N	20	20
MEDICIONES	Correlación de Kendall	1,000	0,616
	N	20	20
DISTANCIA	Correlación de Kendall	0,616	1,000
	N	20	20
MEDICIONES	Correlación de Spearman	1,000	0,754
	N	20	20
DISTANCIA	Correlación de Spearman	0,754	1,000
	N	20	20

Tabla 8.8 Correlación Deltebre (Marzo 2008)

Los datos observados se tomaron con el Sky Quality Meter, medidas en Mag/arcseg^2, la tabla 8.6 muestra las correlaciones de uno de los recorridos realizados en marzo de 2008. Las tres pruebas estadísticas demuestran una evidente relación positiva. Por lo tanto se puede argumentar que los datos tienen un comportamiento de decrecimiento con la distancia.

En la gráfica de dispersión perteneciente a estos datos –figura 8.5-, también se puede observar el comportamiento descriptivo de los mismos.

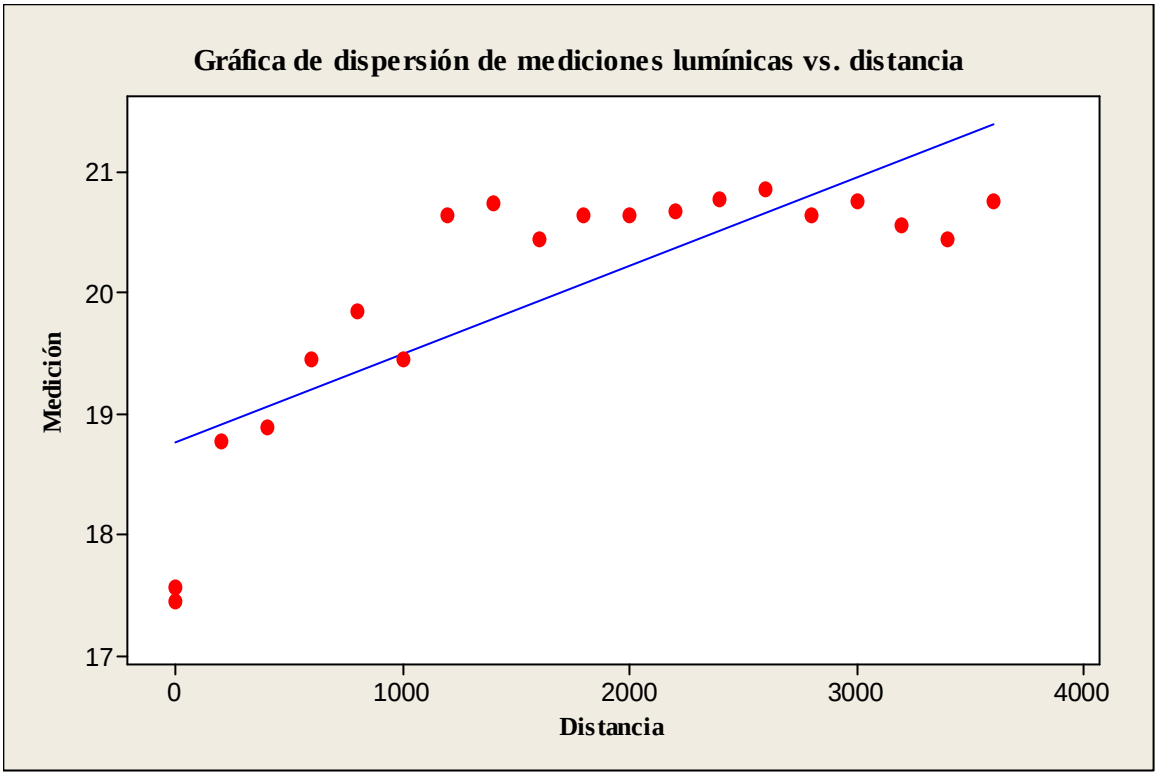


Fig. 8.5 Histograma de correlación entre mediciones hacia focos contaminantes y distancia de medición Deltebre -Marzo 2008- (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009)

Analizando la tendencia en el histograma de correlación de las medidas con la distancia de medición. Los datos del histograma anterior corresponden a los realizados en el mes de marzo de 2008, pertenecientes a la fase 1. Se muestran posteriormente los análisis realizados en la misma fase -el parque natural del Delta del Ebro- pero diferente temporada –específicamente en el mes de noviembre de 2008-.

		MEDICIONES	DISTANCIA
MEDICIONES	Correlación de Pearson	1	0,866
	N	20	20
DISTANCIA	Correlación de Pearson	0,866	1
	N	20	20
MEDICIONES	Correlación de Kendall	1,000	0,734
	N	20	20
DISTANCIA	Correlación de Kendall	0,734	1,000
	N	20	20
MEDICIONES	Correlación de Spearman	1,000	0,881
	N	20	20
DISTANCIA	Correlación de Spearman	0,881	1,000
	N	20	20

Tabla 8.9 Correlación Deltebre (Noviembre 2008)

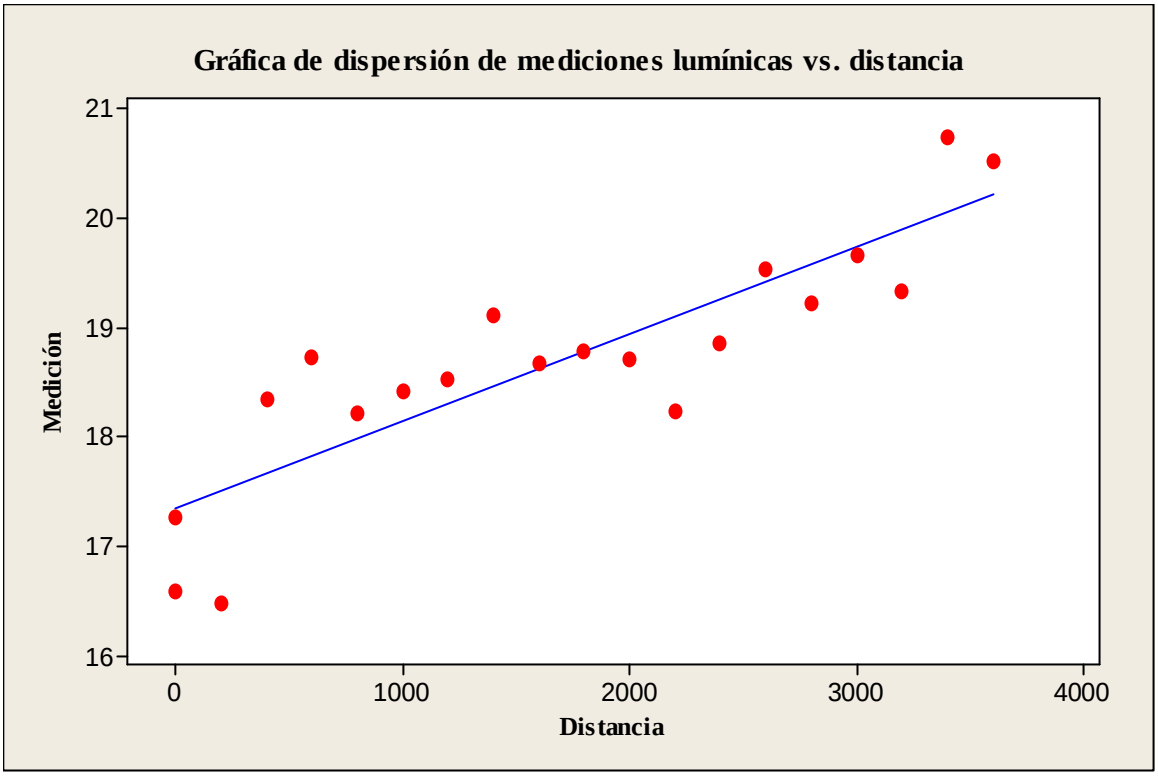


Fig. 8.6 Histograma de correlación entre mediciones hacia focos contaminantes y distancia de medición Deltebre -Noviembre 2008-(Solano., San Martín, García & Ferrero 2009)

Se puede observar, por los análisis anteriores, que hay una clara relación entre la distancia de medición y la contaminación lumínica. **En este caso tomando en cuenta la ley cuadrática inversa -que dice que la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia al centro donde se originan-. Es decir, a menor distancia mayor será la contaminación lumínica.** Se analizó Deltebre por ser la población de que se tienen más datos, debido a que la mayoría de los recorridos se dirigían hacia Deltebre

8.7. Correlación entre mediciones lumínicas y datos EFS

Este apartado se realizó para encontrar una relación entre el índice EFS, obtenido por medio del método RAMAL-UPC, y los datos lumínicos medidos por medio del SQM. El EFS se trabajo aplicándole la ley cuadrática inversa dependiendo del dato poblacional y la distancia a la que se localizaba la población.

En otras palabras, el dato EFS se multiplico por el cuadrado negativo de la distancia de la medición correspondiente, con esto se busco analizar el comportamiento del mismo y determinar si era factible aplicarle la ley cuadrática inversa.

Medición en Mag/Arcseg^2	Distancia en Metros	Medición en Cd/m^2	EFS (Ley cuadrática aplicada)
20,39	4000	0,00075409	0,36496875
20,42	4000	0,00073354	0,36496875
20,67	3500	0,00058267	0,47669388
19,61	3000	0,00154676	0,64883333
20,07	3000	0,00101257	0,64883333
18,88	2500	0,00302987	0,93432
19,10	2000	0,00247414	1,459875
18,61	2000	0,00388529	1,459875
18,91	2000	0,0029473	1,459875
18,28	1500	0,00526531	2,59533333
18,05	1500	0,00650764	2,59533333
17,49	1000	0,01089993	5,8395
17,73	1000	0,00873824	5,8395
17,33	1000	0,01263059	5,8395
17,46	1000	0,01120531	5,8395

Tabla 8.10 Datos de mediciones hacia focos contaminantes y EFS de la población

Las correlaciones entre los datos de mediciones en Cd/m^2 y el EFS -ley cuadrática aplicada- se muestran a continuación.

		MEDICIONES	EFS
MEDICIONES	Correlación de Pearson	1,000	-0,890
	N	15	15
EFS	Correlación de Pearson	-0,890	1,000
	N	15	15
MEDICIONES	Correlación de Kendall	1,000	-0,860
	N	15	15
EFS	Correlación de Kendall	-0,860	1,000
	N	15	15
MEDICIONES	Correlación de Spearman	1,000	-0,959
	N	15	15
EFS	Correlación de Spearman	-0,959	1,000
	N	15	15

Tabla 8.11 Correlación entre mediciones y EFS -ley cuadrática aplicada-.

La correlación realizada -correlación de EFS con medición en Cd/m^2-, por medio de los tres estadísticos utilizados, nos indica que **hay una relación directa casi perfecta entre las dos mediciones tomando en cuenta también la ley cuadrática inversa.**

Por lo tanto es factible modelar el comportamiento de la Emisión de Flujo Superior con el cuadrado negativo de la distancia. El esquema gráfico, en el histograma de relación, se muestra en la figura 8.7.

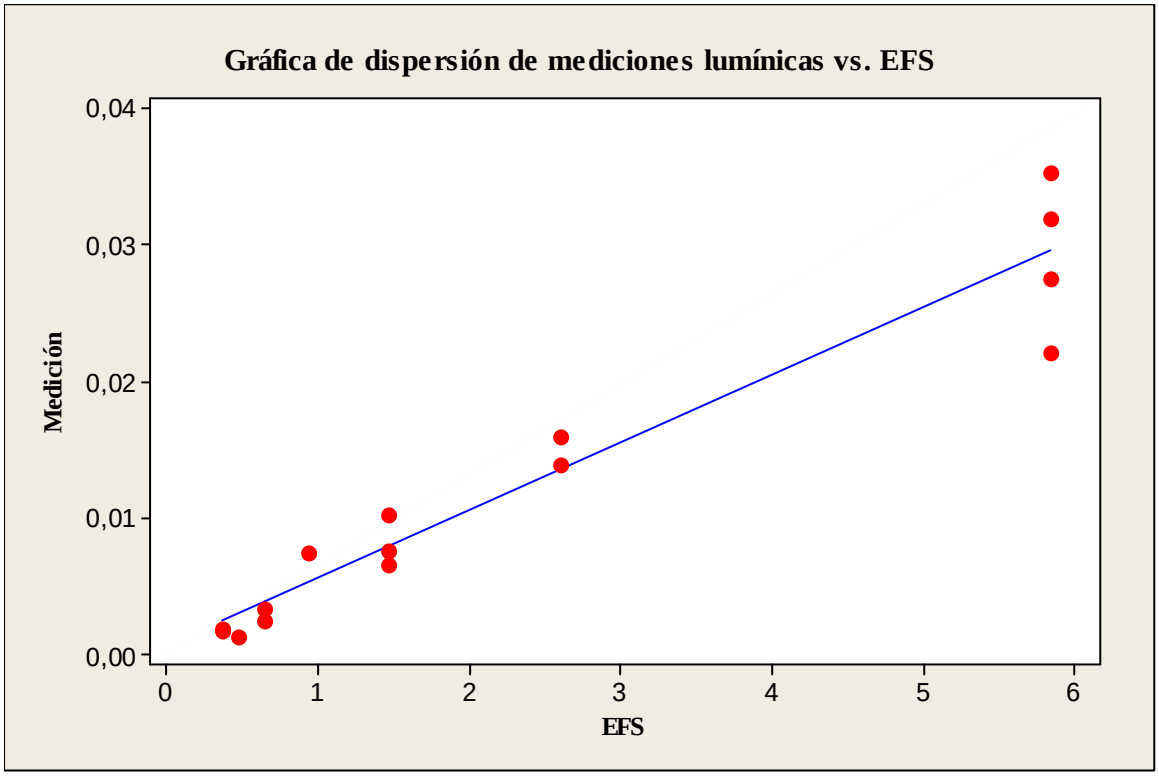


Fig. 8.7 Histograma de correlaciones entre mediciones hacia focos contaminantes y EFS del foco (Solano., San Martín, García & Ferrero 2009)

8.8. Análisis de regresión lineal múltiple

Se llevo a cabo un análisis de correlación de tipo multivariante entre las variables que lo requirieran para determinar multicolinealidad y asegurar que el modelo estadístico utilizado fue el adecuado. Esto también con el objetivo de establecer si las variables analizadas por separado, utilizando las técnicas bivariadas de correlación mostradas, fueron tratadas apropiadamente. Por lo tanto se discutirá sobre cada análisis realizado.

8.8.1. Contaminación lumínica vs datos climatológicos

En el caso de los datos climatológicos es necesario realizar la prueba de regresión múltiple para determinar si existe alguna relación entre la temperatura y la humedad relativa que pudiera estar causando ruido en los resultados. Los datos del análisis se muestran a continuación.

	MEDICIONES	TEMPERATURA	HUMEDAD
MEDICIONES	1		
TEMPERATURA	0,20824487	1	
HUMEDAD	-0,83198002	-0,00363706	1

Tabla 8.12 Coeficientes de correlación

Observando relaciones entre las variables para determinar multicolinealidad y tomando en cuenta que la CL –mediciones- es la variable dependiente, y temperatura y humedad son las variables independientes. Podemos observar que la correlación entre variables independientes es de -0,00363706 que es menor que la correlación entre mediciones y temperatura 0,20824487. Por lo tanto se determina que no existe multicolinealidad entre las variables independientes. Considerando los modelos posibles, utilizando un nivel de significancia de 0,5 %, con un análisis de regresión.

Tomando en cuenta el coeficiente de determinación ajustado y las estadísticas de regresión de las correlaciones entre la variable dependiente y las dos independientes:

Coeficiente de correlación múltiple	0,85691663
Coeficiente de determinación R^2	0,73430611
R^2 ajustado	0,72134543
Error típico	0,19279443
Observaciones	179

Tabla 8.13 Estadísticas de la regresión

En la tabla 8,13 se observa el coeficiente de correlación existente entre la variable dependiente y las dos variables independientes. El coeficiente de correlación múltiple nos demuestra una clara relación -casi 86%- que pudiera existir entre las dos variables o solo una de las independientes y un R^2 ajustado alto -0,72-. Con el análisis de varianza se encuentra un F calculado mayor que el p-valor: 56,65 vs 1,58, por lo que la relación continua sin descartarse.

Se analizan por separado las variables independientes y así se afirman las dos o se suprime aquella que no tenga relación en el modelo estadístico.

Humedad relativa vs Contaminación lumínica		Temperatura vs Contaminación lumínica	
Coeficiente de correlación múltiple	0,83198002	Coeficiente de correlación múltiple	0,20824487
Coeficiente de determinación R^2	0,69219075	Coeficiente de determinación R^2	0,04336593
R^2 ajustado	0,68486196	R^2 ajustado	0,02058893
Error típico	0,20502736	Error típico	0,3614464
Observaciones	179	Observaciones	179

Tabla 8.14 Estadísticas de la regresión de las variables individuales

la tabla 8.14 nos demuestra los análisis individuales de las variables independientes. El coeficiente de correlación ajustado, alto en humedad relativa y bastante bajo en temperatura, nos indica la variable -en este caso humedad relativa- que mayor tiene relación con la contaminación lumínica. Asimismo se observa que la variable temperatura no tiene una relación relevante con la

contaminación lumínica. Por lo que se afirma el método bivariable que anteriormente se había utilizado y se continúa descartando a la temperatura como influencia de la contaminación lumínica. A pesar de que diversos estudios indican una clara relación entre el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa, en este caso no fue asi.

8.8.2. Luminancímetro vs SQM

Como se recordará, este análisis buscó el mostrar las tendencias de los datos que arrojaron los dos instrumentos utilizados en esta investigación. En este caso el análisis multivariante no es necesario; las mediciones fueron simultáneas -mismo tiempo y mismas circunstancias- y por lo tanto cualquier variable que afectara la medición de un instrumento estaría afectando al otro. Lo que se determinó con el análisis bivariado fue la relación de tendencia que presentaban las mediciones.

8.8.3. Número de habitantes del foco vs datos modelo de Walker (1970)

Este análisis ya había sido llevado a cabo anteriormente por diversos científicos -ya citados en la primera y segunda parte de este trabajo-, incluyendo al propio Walker (1970) con sus convenientes datos y conclusiones. En este caso se realizó con el objetivo de asegurar que el foco contaminante fue adecuadamente localizado. Puesto que la relación del modelo de Walker (1970) involucra solamente a la población de la ciudad y la distancia como variables dependientes, y en este caso específico las caracterizaciones de los focos se efectuaron tomando una misma distancia para cada uno, no se consideró necesario el análisis multivariante.

8.8.4. Número de habitantes del foco vs datos EFS

Muy similar a la discusión anterior, el EFS determina el flujo emitido por el foco sin tomar en cuenta situaciones climatológicas o de distancia. Por lo tanto tampoco se cree necesario el análisis multivariante.

8.8.5. Mediciones lumínicas vs distancia de medición

Análisis efectuado con el objetivo de determinar el comportamiento de las mediciones ante la distancia. Las otras variables que pudieran afectar se trataron de aislar. Sin influencia de nubes, datos climatológicos -humedad relativa y temperatura- con mínimas variaciones, sin influencia lunar y en terreno totalmente plano con el recorrido manteniendo la altura sobre el nivel del mar. Tomando en cuenta estos aspectos, no se cree necesario el análisis multivariante.

8.8.6. Mediciones lumínicas vs datos EFS

El EFS fue tratado por medio de la ley cuadrática inversa, buscando comprobar si era posible relacionarlo de esta manera tomando en cuenta la distancia del observador al foco. Las correlaciones se realizaron con mediciones a diferentes distancias del foco -específicamente a la misma distancia que el EFS tratado- aislando los datos de otros factores que pudieran influir en los resultados -clima, orografía, nubes, entre otros- de la misma manera que en etapas anteriores. Por lo tanto, al tener identificadas la variable dependiente y la variable independiente, el modelo bivariado es válido para este contexto y no se precisa utilizar un análisis multivariante.

8.9. Conclusiones del análisis estadístico

Como se observó, los datos obtenidos en las respectivas recogidas experimentales de datos fueron correlacionados con el objetivo de determinar valores significativos que nos permitieran identificar las variables que caracterizan a la contaminación lumínica y el comportamiento de los instrumentos utilizados, en ocasiones las gráficas presentan tendencias no lineales -lo que no significa que no haya correlación, puesto que se puede tener exponencial o de otro tipo- lo importante es analizar el coeficiente de correlación, asimismo las pruebas de análisis multivariante y las posteriores discusiones individualizadas certificaron el tratamiento de los datos; las conclusiones respecto a este análisis son las siguientes:

- Se realizó una toma de datos lumínicos y, al momento, una toma de datos meteorológicos apoyados en las estaciones meteorológicas que se localizan dentro y alrededor del delta del Ebro. Las estaciones meteorológicas fueron elegidas de acuerdo al sector que se estaba estudiando. Los datos registrados, además de los lumínicos, fueron los de humedad relativa y de temperatura. En este caso se encontraron correlaciones negativas entre la contaminación lumínica -medida en Mag/Arcseg^2- y la humedad relativa y la temperatura. En el ejemplo de la humedad relativa, la correlación negativa nos indicó que entre mayor era la contaminación lumínica la humedad relativa disminuía. Recordando que entre menor son las mediciones en Mag/Arcseg^2 mayor es la contaminación lumínica, nos atrevemos a concluir que hay una relación entre el aumento de la contaminación lumínica y el aumento de la humedad relativa. La correlación de ésta información nos ayudo a concluir que:
    1. El aumento de la contaminación lumínica se relaciona directamente con el aumento de la humedad relativa en el ambiente estudiado.

2. La contaminación lumínica no presenta ninguna relación con el aumento o disminución de la temperatura que se tenga en el ambiente estudiado.

- Se realizaron mediciones habituales y se graficaron de nuevo con el fin de observar su comportamiento. Las graficas presentaron un aumento dentro y fuera de las poblaciones y una disminución a medida que nos alejamos de las mismas. En otras palabras, estas graficas nos indican que la contaminación lumínica varía dependiendo de la distancia a la que se encuentre el observador del foco contaminante.

- Fue utilizado el modelo de Walker (1970) con el objetivo de realizar una selección de las poblaciones que pudieran estar afectando al parque en materia de contaminación lumínica. Para tener la seguridad de que la elección de esta ley fue adecuada, se llevó a cabo una correlación entre los datos que arrojó y el número de habitantes de cada población. La correlación, casi perfecta, nos indica que, para estos casos, la utilización del modelo de Walker (1970) es válido.

- Se llevaron a cabo mediciones hacia el horizonte, hacia los cuatro puntos cardinales y, en algunas ocasiones, hacia donde se localizaba la población que en ese momento se encontraba dentro del recorrido. Estas mediciones se realizaron con los dos instrumentos de medición. El luminacímetro que se utilizó fue bastante preciso, con calibraciones validadas. Era necesario por lo tanto reconocer la efectividad del SQM, puesto que no se tenía la seguridad de que arrojara los datos adecuados. La correlación que se hizo entre los datos que arrojaron ambos instrumentos (Luminancímetro y SQM), nos sirvió para afirmar que los datos de los dos instrumentos presentaban características similares. Por lo tanto se concluye que la elección de su utilización fue adecuada.

- Los datos obtenidos por medio del método RAMAL-UPC – con la ley cuadrática aplicada- se correlacionaron con mediciones realizadas a diferentes distancias con el objetivo de ver el comportamiento. Datos que nos sirvieron posteriormente para la propuesta de modelo. De este tratamiento concluimos que los índices del método RAMAL-UPC disminuyen con la distancia del foco si es aplicada la ley cuadrática inversa.

- También se realizaron correlaciones entre los datos derivados del método RAMAL-UPC y el número de pobladores del foco contaminante. Derivado de este análisis concluimos que los focos contaminantes de los espacios naturales estudiados poseen un grado de contaminación homogéneo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA TERCERA PARTE

1. CINZANO, P., FALCHI, F. & ELVIDGE, C. D. (2001) The first world atlas of the artificial night sky brightness. Padova, Department of Astronomy, University of Padova.

2. CRAWFORD, D. L. (1998) Light Pollution: The Problem, the Solutions. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

3. GARCÍA GIL, M. & SOLANO LAMPHAR, H. A. (2010) Quantification and assessment of the energy waste due to obstructive light, research methodology and analysis. IN CIE (Ed.) *"Lighting Quality & Energy Efficiency" CIE2010.* Viena.

4. KEYHOLE INC (2006) Google Earth versión 4.x.

5. MICROSOFT (2007) Microsoft Office 2007.

6. MINITAB INC (2007) Minitab Statistical Software.

7. NARISADA, K. & SCHREUDER, D. (2004) *Light pollution hand book*, Springer.

8. SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & SOLANO LAMPHAR, 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.

9. SMARTDRAW (2009) Smart draw Software.

10. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & FERRERO, L. (2008) Contaminación lumínica en espacios naturales (Investigación en el parque natural del delta del Ebro, primeras conclusiones). IN CEI (Ed.) *XXXIV Simposio nacional de iluminación, Comité español de iluminación.* Las palmas de gran canaria, España.

11. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2009a) Estudio Sobre Contaminación Lumínica en el Parque Natural del Delta del Ebro. *Ciencia y trabajo,* 34**,** 211-216.

12. SOLANO LAMPHAR, H. A. & SAN MARTÍN PÁRAMO, R. (2009b) Study In Light Pollution At The Natural Park Of Delta DEL EBRO, Spain. IN DAW (Ed.) *2nd Bhartatiaya Vigyan Sammelan, Devi Ahilya Vishwavidyalaya.* Indore, India.

13. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & FERRERO, L. (2009) Contaminación lumínica en espacios naturales (Investigación en el parque natural del delta del Ebro, conclusiones definitivas). IN CEI (Ed.) *XXXV Simposio nacional de iluminación, Comité Español de iluminación.* Pontevedra, España.

14. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2010a) Study In Light Pollution At The Natural Park Of Delta DEL EBRO, Spain. IN CIE (Ed.) *"Lighting Quality & Energy Efficiency" CIE2010.* Viena.

15. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2010b) Contaminació lumínica en espais naturals, investigació en el parc natural del delta de l'Ebre. *Revista del col.legi oficial d'Enginyers Industrials de Catalunya.* (En proceso de publicación).

16. THOMSON REUTERS (2009) EndNote X3.0.1 para Windows.

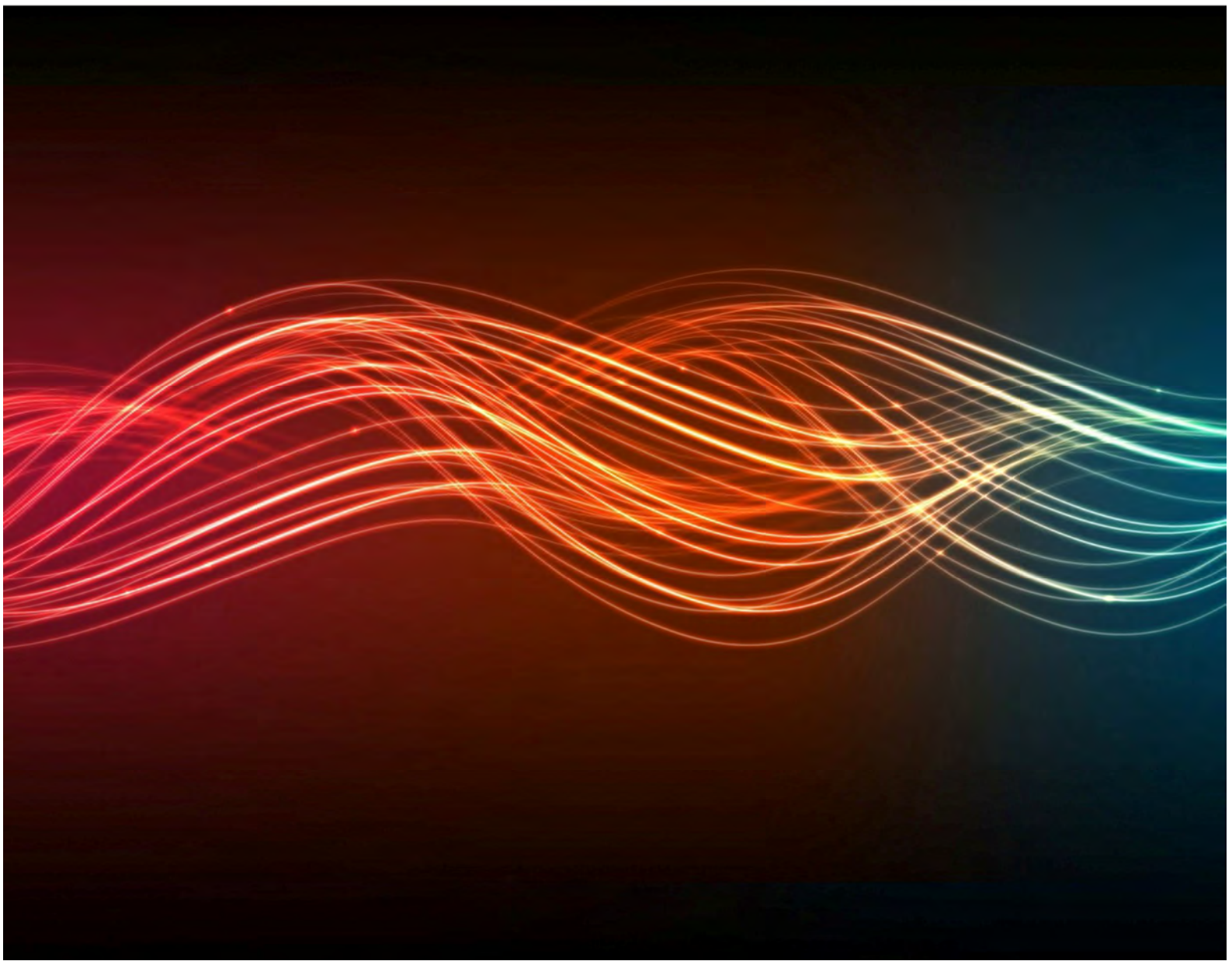
17. WALKER, M. F. (1970) Light pollution model. *Publications of the ASP,* 82**,** 672.

18. WOLFRAM, S. (2009) Wolfram Research: Mathematica, Technical and Scientific Software.

Cuarta Parte

Formulación de propuesta y razonamiento de la investigación

En este apartado se realizan las discusiones pertinentes acordes a los resultados de las recogidas experimentales de datos. Se lleva a cabo una metodología propuesta a seguir para el análisis de áreas afectadas por la contaminación lumínica, incluyendo el modelo numérico de evaluación.



INTRODUCCIÓN

En el presente segmento, cuarta parte de este trabajo de tesis doctoral, se lleva a cabo el desarrollo de la propuesta de modelo que se planteó al inicio de la investigación. Propuesta que está fundamentada en la evidencia bibliográfica de la primera y segunda parte, y en la evidencia analítica de la tercera parte. El desarrollo narrativo se encuentra, en principio, en divisiones de los apartados de la propuesta, que se discuten y se analizan para posteriormente unir las partes examinadas y fundamentar el modelo.

Asimismo se discute sobre un estudio del modelo predictivo aplicándolo a un caso real, y analizando los datos con herramientas estadísticas de correlación -básicamente los tres modelos que se utilizaron en el análisis estadístico de este trabajo-.

Finalmente, se lleva a cabo el razonamiento de la investigación con las conclusiones generales del presente trabajo; incluyendo los contrastes de los resultados con el planteamiento inicial, las aportaciones a la ciencia de carácter original, las aportaciones de divulgación científica y las propuestas de continuación.

A continuación se muestra el esquema de esta parte

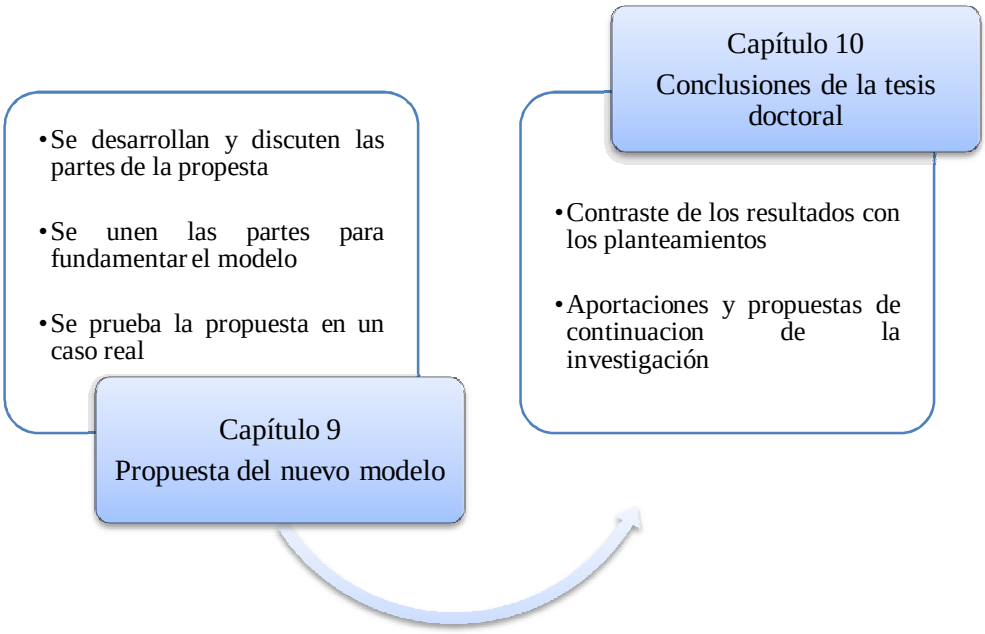


Fig.9.0 Esquema divisional de la formulación de propuesta y razonamiento de la investigación

CAPÍTULO 9: PROPUESTA DE NUEVO MODELO

Toda investigación medioambiental involucra realizar una serie de pasos metodológicos con el fin de resolver los problemas planteados y que el análisis sea adecuado y eficiente. Así pues, también es necesario establecer una serie de pautas a seguir para el análisis de la contaminación lumínica y su efecto en áreas circundantes a un foco contaminante. En este apartado se muestra el modelo que se propone con ésta tesis y que surgió de la investigación realizada; el resultado de casi tres años de trabajo de campo y de un año de trabajo de laboratorio. La derivación del análisis de los datos que se obtuvieron en el Delta del Ebro, en Aiguastortes y en Sinaloa. Recordando que el presente trabajo se propuso con uno de los objetivos de realizar un modelo que nos indicara la variación de condiciones nocturnas de luminosidad en espacios afectados por la Contaminación Lumínica. Aquí se explica la esquematización, las características y las partes que componen al modelo de análisis.

El modelo funciona como herramienta de apoyo a investigaciones en la biodiversidad, y localización de puntos para observaciones astronómicos -amateur y profesional-; así como también para toda aquella persona interesada en las investigaciones relacionadas con la contaminación lumínica. El modelo nos da una aproximación de la contaminación lumínica en un punto determinado, expresado en luminancia de la bóveda celeste en Cd/m^2 o $Mag/arcseg^2$; o de intensidad luminosa en lúmenes. Se tomaron en cuenta los factores que influyen directamente en el aumento o disminución de la contaminación lumínica: Características e índice de emisión lumínica de los focos contaminantes, distancia al punto requerido, orografía del terreno, curvatura de la tierra, dispersión y la extinción atmosférica al momento de la medición. El modelo también funciona en la determinación de una aproximación de la contaminación lumínica a cualquier altura que se desee, dentro de los límites de la bóveda celeste. También es posible conocer la contaminación lumínica de determinada longitud de onda, si así se requiere, siempre y cuando se tenga la certeza de que la longitud de onda utilizada proviene del o los focos de influencia que se estén estudiando.

Para el modelo que se está proponiendo se hace primero un análisis del foco o los focos contaminantes que se encuentran en el área a estudiar. Esto se realiza con un modelo desarrollado en el departamento de estudios luminotécnicos de la UPC, cuyas características fueron explicadas anteriormente en el apartado de desarrollo de la investigación, subíndice metodología utilizada de este trabajo y cuya sistemática de estudio se puede observar en el ANEXO XII. El modelo es llamado Ratio y Análisis Medio Ambiental Lumínico: RAMAL-UPC y nos permite un conocimiento y cálculo más detallado del fenómeno.

Las siguientes etapas del modelo propuesto se basan en la caracterización de la luz de acuerdo a la extinción y dispersión que sufre en su viaje primero hacia la atmósfera y después hacia el observador. Todas las fórmulas que se introdujeron se validaron con correlaciones de mediciones in situ -como se mostró en el apartado de análisis de resultados-, con cotejos hacia otras investigaciones y con opiniones de científicos relacionados al tema. El modelo se compone de diferentes partes involucrando diferentes variables que se decidió exponer en forma separada. Dichas variables se explican detalladamente en los apartados siguientes.

9.1. Análisis del foco contaminante

9.1.1. Flujo dirigido

Si tomamos en cuenta una ciudad como un foco contaminante, asumimos que la ciudad está compuesta de un sistema de iluminación artificial nocturna. Este sistema se puede contabilizar y por lo tanto obtener el flujo total instalado correspondiente al foco contaminante. Esta contabilización se puede llevar a cabo, y de manera muy eficiente, por medio del método RAMAL-UPC explicado detalladamente en el ANEXO XII del presente trabajo.

El modelo RAMAL UPC nos sirve para conocer los efectos lumínicos de una instalación en su entorno, o para predecirlos y, mediante el análisis y simulación, introducir los cambios en nuestro proyecto que permitan reducir dichos efectos. (San Martin, García & Solano, 2009).

El modelo RAMAL UPC se basa en la consideración del flujo emitido por el alumbrado artificial, tomando en cuenta las geometrías de las instalaciones, la fotometría de las luminarias y la zona de implantación, y las reflexiones ocurridas en pavimento y en las paredes laterales. Además, no solo se toma en cuenta el alumbrado artificial público, también se considera el privado como rótulos, ventanas, escaparates, entre otros.

El cálculo con el modelo RAMAL UPC, nos permite conocer la emisión de flujo superior valorado en lúmenes. Al resultado final se le añade una consideración respecto a la composición espectral de la luz emitida y se obtiene el $\boldsymbol{GRE}$ -grado relativo de emisión-, valorándolo en incidencia en la luminosidad.

En este caso, como bien se explicó antes, se realiza un modelado para determinar la afectación de las instalaciones de alumbrado artificial. La mayoría de los modelos analizados bibliográficamente, sólo determina una aproximación del flujo por cada habitante.

Primero se realiza una contabilización del flujo lumínico perteneciente a la ciudad, por medio de una encuesta y una programación como se explicó antes. Para nuestra fórmula es necesario tomar uno de los indicadores utilizados en el modelo RAMAL-UPC y caracterizarlo a fines de la nueva fórmula. De tal forma que podamos modelizar nuestro indicador $\boldsymbol{FD}$ -flujo dirigido-. El $\boldsymbol{FD}$ contempla la cantidad de flujo lumínico que uno o varios focos dirigen hacia el Zenit, tomando en cuenta los ángulos que se forman dependiendo de la altura y distancia a la que se encuentra el observador y la altura de la ciudad. Se ha tomado como ejemplo la fórmula de aproximación para el comportamiento angular de la radiación producida por superficies de fuente de luz. (Garstang 1986; Kocifaj 2007). Por lo tanto, el cálculo de $\boldsymbol{FD}$ queda como se muestra a continuación.

$$\boldsymbol{FD = EFSCOS\alpha} \quad (1)$$

El EFS se obtiene llevando a cabo la informatización de las características de los casos tipo del foco contaminante, -más información al respecto en el ANEXOXII-, si se tiene el caso tipo identificado, el EFS se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\boldsymbol{EFS = FTI\ x\ FHSimedio + FTI\ x\ (FHI\ medio\ x\ \nabla)} \quad (2)$$

Donde:

$\boldsymbol{FTI}$ = Flujo total instalado. Después de llevar a cabo la modelización del foco -ciudad- tomando en cuenta el método RAMAL-UPC, se determina el flujo que contempla todo el foco analizando el sistema de iluminación que contiene. El $\boldsymbol{FTI}$ se obtiene al conocer el tipo y la cantidad de lámparas que contiene el foco contaminante y realizar la sumatoria de los lúmenes de cada una de ellas.

$\boldsymbol{FHImedio}$ = Flujo hemisférico inferior medio. Por medio del método RAMAL-UPC se obtiene el flujo que el alumbrado artificial dirige por debajo de la horizontal, en otras palabras es el flujo que ilumina el pavimento y las paredes dentro del foco contaminante. Agregando que al realizar la encuesta a los municipios, se debe determinar el factor de utilización de la instalación.

$\boldsymbol{\nabla}$ = Reflexión piso paredes. Aproximadamente, entre el 10 % y el 15% del flujo hemisférico inferior medio se regresa de nuevo hacia arriba. Se obtiene por medio del $\boldsymbol{FHImedio}$ **,** después de haber realizado un porcentaje del tipo de luminaria que se tiene en el foco contaminante. En caso de que el pavimento este cubierto de nieve se recomienda tomar en cuenta que el reflejo será mayor, alrededor de un 30% del $\boldsymbol{FHImedio}$.

A continuación se muestra una tabla realizada por la asociación del cemento de Portland, en donde se indican diferentes valores de reflexión dependiendo del tipo de cemento que se esté utilizando. Se recomienda cambiar el 0.15 en orden de la tabla siguiente.

Tipo de cemento	Valor de reflexión
Cemento Portland.	0.10
Asfalto con un mínimo de 60% de grava.	0.07
Asfalto con agregado obscuro.	0.07
Asfalto con textura pulida.	0.08

Tabla 9.1 Reflexiones de diferentes tipos de cemento

Así también, Shirkey (2009) recomienda los siguientes valores de reflexión para diferentes superficies que citamos como referencia para tomar en cuenta estos valores en el análisis del foco contaminante, siendo necesario señalar que es una tabla general, pudiéndose encontrar otras más extensas.

Suelos	Seco	Mojado	No especificado
Arenilla	0.25	0.18	
Arena	0.40	0.20	
Arena blanca	0.55		
Obscuro	0.13	0.8	
Claro	0.18	0.10	
Superficies			
Asfalto			0.10
Lava			0.10
Concreto			0.30
Piedra			0.30
Roca		0.35	0.20
Campos			
Césped largo	0.18	0.13	
Césped corto	0.26	0.19	
Arroz	0.12		
Lechuga	0.19		
Patata	0.22		
Nieve			
Fresca	0.85		
Densa	0.75		
Antigua	0.55		
Derretida	0.35		

Tabla 9.2 Reflexiones de diferentes tipos de superficie (Shirkey 2008).

$\boldsymbol{FHSi\ medio}$ = Flujo hemisférico superior instalado medio. El método RAMAL–UPC también es el utilizado para calcular el flujo que se dirige por arriba de la horizontal. Dependiendo de la luminaria y la forma del elemento difusor, habrá una cantidad de luz que se escapara por arriba de la horizontal.

El $\boldsymbol{FHSi\ medio}$ nos indica ese flujo. El $\boldsymbol{FHSi\ medio}$ se expresa en porcentaje dependiendo del $\boldsymbol{FTI}$.

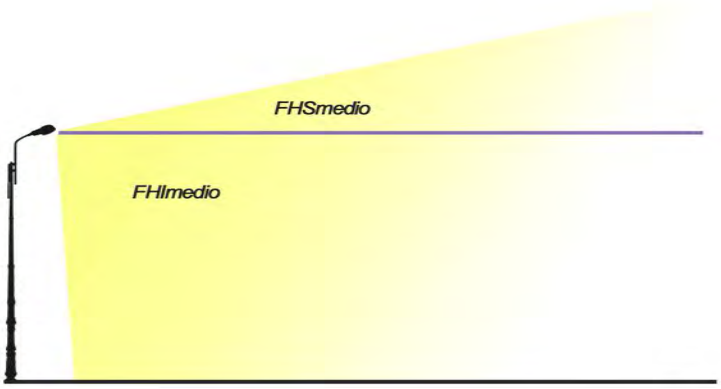


Fig. 9.1 Explicación grafica del FHS y el FHI (Solano., San Martín, García 2009b)

α = Ángulo cenital de flujo dirigido

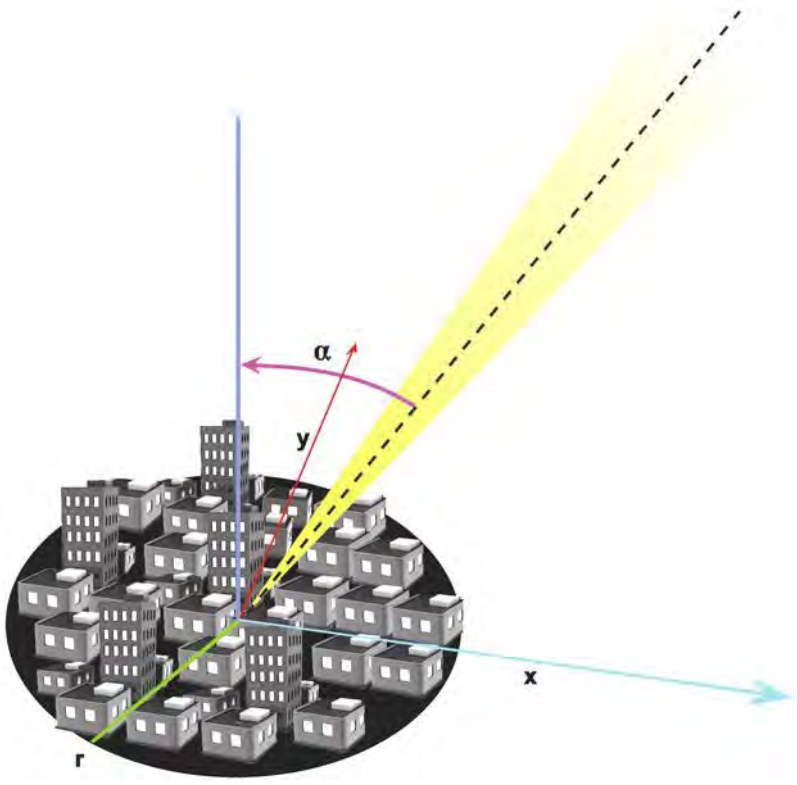


Fig 9.2 Explicacion grafica del flujo dirigido (Solano., San Martín, García 2009b)

EFS = Emisión de flujo superior. Se le da el tratamiento con la primera ley de Lambert multiplicándolo por el coseno del ángulo que se forma entre el zenit y la línea del flujo dirigido, principio básico de fotometría. Representa el comportamiento que experimenta el flujo irradiado por la ciudad. Siguiendo la fórmula de aproximación para el comportamiento angular de la radiación producida por superficies de fuente de luz al manejar a la ciudad como una superficie lambertiana, la intensidad de la radiación disminuye hacia el Zenit y aumenta en la medida que el ángulo alfa se aproxima a la horizontal. Destacando que todos los modelos toman a la ciudad

como una superficie lambertiana, pero que en realidad no se han llevado a cabo estudios que determinen cual es la distribución de la luz que sale del foco contaminante. Nota: En el caso de que se realice la informatización del sistema con el programa informático explicado en el apartado de desarrollo de la investigación, subíndice metodología utilizada, de este trabajo; el EFS será calculado por Software, sin embargo cumplirá la misma función que el EFS de fórmula. Observando el comportamiento de la fórmula de FD propuesta ante diferentes ángulos α con un EFS de 100000 lúmenes:

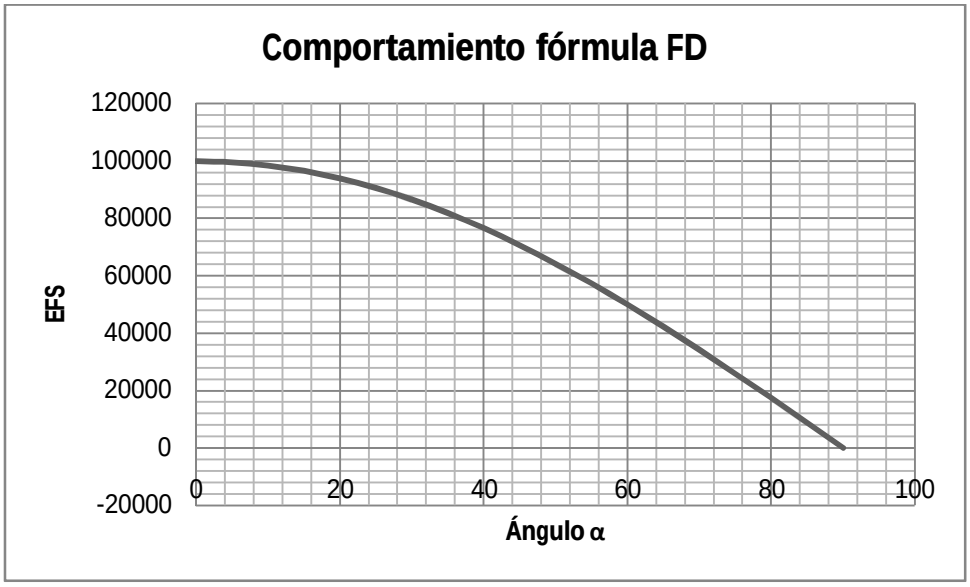


Fig 9.3 Comportamiento descriptivo de la fórmula de flujo ditigido

9.1.2. Características geométricas del foco contaminante

Hablemos de la ciudad o del foco contaminante, es decir, el lugar desde donde proviene el flujo lumínico. Se toma en cuenta a la ciudad como un área circular contaminante, siguiendo el ejemplo de Garstang (1986), escogiendo un punto central del que parten dos ejes (x,y) y la circunferencia con un radio r –que dependerá de las dimensiones de la ciudad-. (Garstang, 1986).

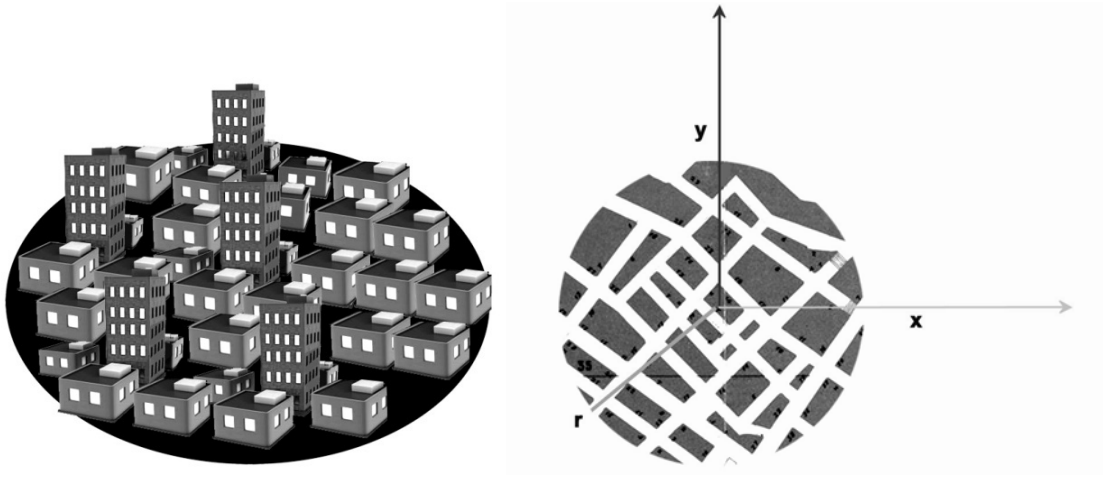


Fig. 9.4 Gráfica del área de la ciudad (Solano., San Martín, García 2009b, 2010c)

El hecho de tomar en cuenta a la ciudad como un área circular uniforme sobre un plano horizontal, permite mejores resultados para observadores que se encuentren dentro de la ciudad. (Shirkey, 2006).

Al representar a la ciudad como un disco de área circular y con brillo uniforme es necesario determinar el espacio de influencia que se encuentra dentro de dicha ciudad, y que caracteriza el flujo proveniente de la misma, realizando una doble integración en el área. Kocifaj (2007) realiza la integración con coordenadas polares, Garstang (1986) representa el foco contaminante en plano cartesiano.

Siguiendo a (Garstang 1986), el foco contaminante del presente modelo se puede representar en plano cartesiano. Es un circulo en donde "x" y "y" son las dos coordenadas del plano horizontal que salen del centro del circulo y que por lo tanto delimitan el lugar desde donde sale el flujo, "r" es el radio del circulo. El área se encontrará por integración, como recomendación de apoyo en el manual de Abramowitz and Stegun (2006).

La integración se verá determinada por la función de "x" y por la función de "y"- $\boldsymbol{f(x,y)}$ que dependerá de las características del foco contaminante en el plano cartesiano. En caso de que se tome a la ciudad como un punto y no como área, se omitirán las integraciones sobre "x" y "y" y por lo tanto: $x = 0, y = 0$

El tomar a la ciudad como un punto es recomendable para observadores fuera de la ciudad, la doble integración funciona si se requiere conocer la contaminación lumínica en puntos dentro de la ciudad (Garstang 1986, Shirkey 2007). Recordando que el presente trabajo fue realizado con el objetivo de caracterizar la contaminación lumínica como efecto en espacios naturales, por lo tanto no se requiere conocer el efecto para observadores dentro de la ciudad. Por lo que la anterior recomendación se aconseja solamente para casos necesarios dentro de la ciudad. De esta manera el modelo incluirá los apartados de área de la ciudad y en caso que se requiera puede utilizarse el cálculo de plano por integración e incluirlo en la ecuación propuesta.

9.2. Análisis del observador

9.2.1. Determinación de distancias y ángulos

Existe una distancia entre la ciudad o foco contaminante y el volumen en donde se impactan los fotones, provenientes del foco, desde donde inician un nuevo camino hacia el observador o punto

de interés -desde el ángulo solido primario hasta el ángulo sólido secundario-. Esta distancia guarda relación con la distancia que existe entre la ciudad y el observador. Básicamente es la hipotenusa perteneciente al triangulo que involucra a la ciudad, -si se realizan las observaciones hacia el zénit a 90 grados-, al observador y al punto de impacto de los fotones en la atmósfera, esto funcionaría con sólidos.

Sin embargo es necesario recordar que la atmósfera no es un sólido, es un medio por el que pasa la luz, y por lo tanto lo que tenemos que determinar en este modelo es el ***AAT***, véase figura 9.5, debido a que se tendrá que integrar definidamente desde la superficie hasta él ***AAT.*** En caso de que se realicen observaciones en diferentes ángulos es necesario realizar operaciones geométricas diferentes.

A continuación se muestra gráficamente y posteriormente se determina como obtener los ángulos y distancias de trabajo.

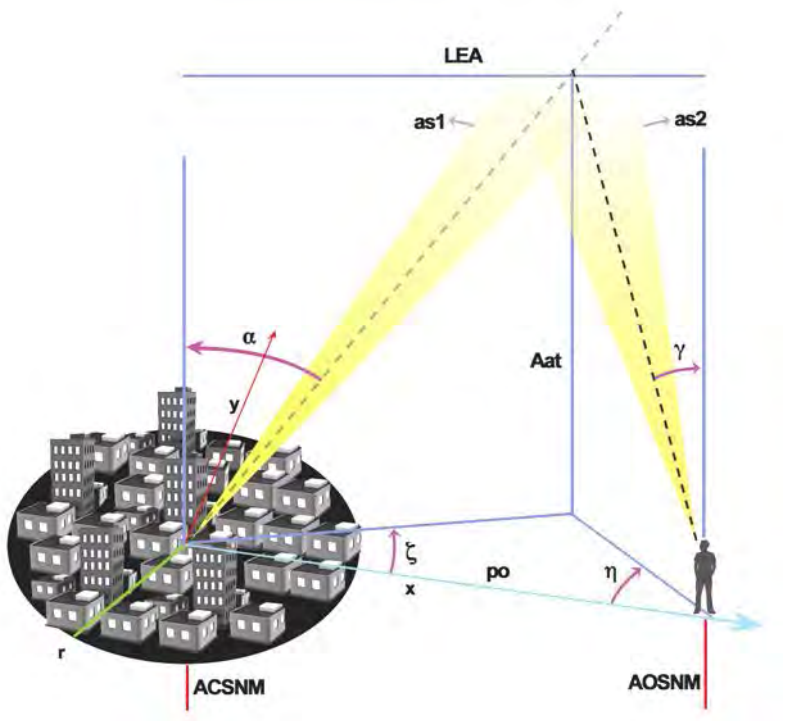


Fig. 9.5 Esquema de la propuesta con distancias y ángulos de trabajo (Solano., San Martín, García 2009b)

El factor que interesa conocer es el ángulo , que es el que guarda relación entre el flujo lumínico emitido y su direccionalidad -dependiendo de la distancia entre la ciudad y el observador y de los ángulos del observador y que ya se conocen-. Por lo tanto, basándonos en las características del modelo y en geometría analítica tenemos:

$$\alpha = ArcCos\left(\left(1 + Tan^2\gamma\right) + \frac{po}{Aat}x\left(\frac{po}{Aat} - 2Tan\gamma\ x\ cos\eta\right)\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Donde:

γ = Angulo cenital del observador

PO = Distancia entre el punto contaminante y el observador

Aat = Altura efectiva de atmósfera

η = Angulo acimutal del observador

Analizando Aat, la altura de la atmósfera, que es el término que se desconoce de la fórmula anterior, tenemos que esta dependerá no solo de los ángulos, también guarda relación con la altura que tengan tanto la ciudad como el observador.

Derivado de los anteriores análisis tenemos:

$$Aat = 9,996 - ABS(CLEA - PO) * Sen\sigma \quad (4)$$

$$\sigma = 90 - (Arctan(\frac{PO}{AOSNM - ACSNM}) \quad (5)$$

$$CLEA = Aatc * Cos\xi \quad (6)$$

$$Aatc = \sqrt{(PO^2 + Aato^2) - (2 * PO * Aato) * Cos\eta} \quad (7)$$

$$Aato = \frac{OLEA}{Cos\eta} \quad (8)$$

$$OLEA = AO * Sen\gamma \quad (9)$$

$$AO = \frac{9.996 - AOSNM}{Cos\gamma} \quad (10)$$

Donde:

σ = Ángulo que se forma entre la diferencia de alturas de la ciudad y el observador a nivel del mar

$Clea$ = Distancia de atmósfera entre la ciudad y altura efectiva de atmósfera

$\boldsymbol{Olea}$= Distancia de atmósfera entre el observador y altura efectiva de atmósfera

$\boldsymbol{\alpha}$ = Angulo cenital del flujo dirigido

$\boldsymbol{\xi}$ = Angulo acimutal del flujo dirigido

$\mathbf{AO}$ = Distancia de segundo ángulo sólido

$\boldsymbol{Aatc}$ = Distancia entre ciudad y línea cenital de altura efectiva atmósfera

$\boldsymbol{Aato}$ = Distancia entre observador y línea cenital de altura efectiva de atmósfera

$\boldsymbol{\gamma}$ = Angulo cenital del observador

$\boldsymbol{PO}$ = Distancia entre el punto contaminante y el observador

$\boldsymbol{Aat}$ = Altura efectiva de atmósfera

$\boldsymbol{\eta}$ = Angulo acimutal del observador

$\boldsymbol{Aosnm}$ = Altura del observador sobre el nivel del mar

$\boldsymbol{Acsnm}$ = Altura de la ciudad sobre el nivel del mar

9.3. Determinación de corrección por curvatura de la tierra

En el año 2001, Albers y Duriscoe (2001) agregaron una corrección a la ley de Walker. Ésta consiste en tomar en cuenta la curvatura de la tierra a grandes distancias. La curvatura de la tierra ejerce una influencia en la contaminación lumínica resultante, ésta deberá tomarse en cuenta para agregar un coeficiente en la fórmula de Walker. (Albers, Duriscoe, 2001).

A pesar de que ésta corrección se utiliza para grandes distancias, no recae en ningún error si se utiliza en la presente propuesta, siendo altamente recomendable; ya que es insignificante en pequeñas distancias y no crea ninguna especie de ruido al modelo -sin embargo es utilizada para no caer en error de grandes distancias-.

$$\boldsymbol{CU = Exp^{-h/A}} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{h = PO\ x\ (1.57x10^{-4}Km)} \tag{12}$$

Donde:

$\boldsymbol{CU}$ = Curvatura de la tierra

$\boldsymbol{h}$= relación de curvatura (Dependiendo de la distancia)

$\boldsymbol{PO}$ = Distancia entre ciudad y observador

$\boldsymbol{A}$= Constante de 4000 metros

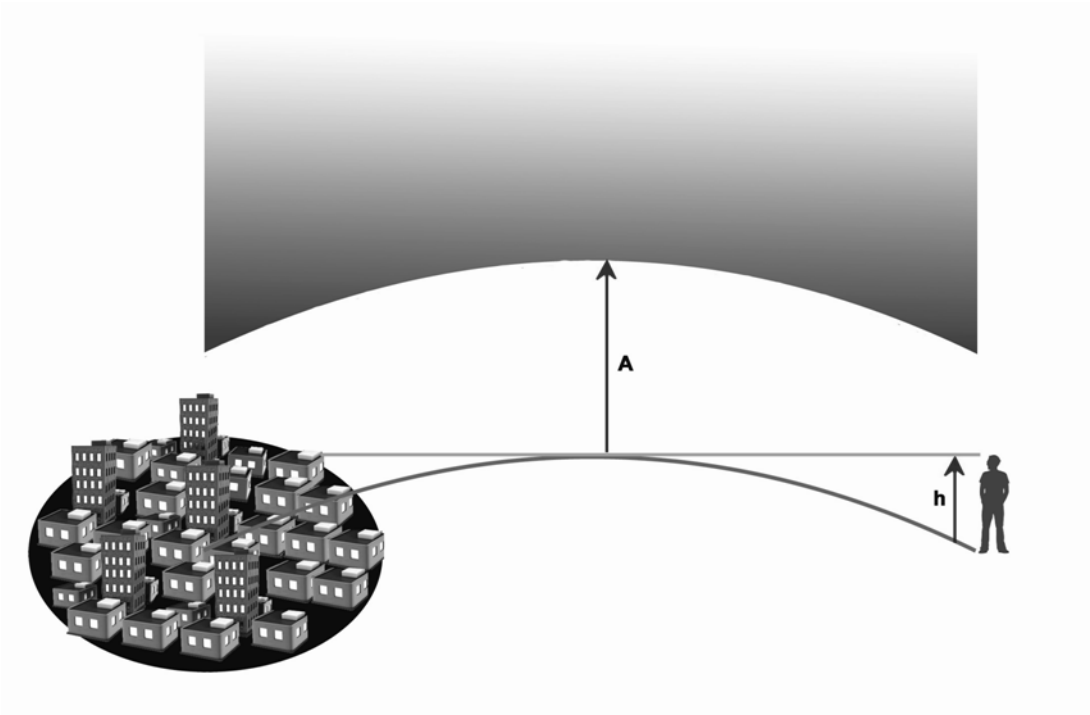


Fig. 9.6 Caracterización de la curvatura de la tierra (Solano, San Martín, García 2010c)

9.4. Análisis del coeficiente de transmisión de la atmósfera

La transmisión de la luz en la atmósfera depende de las propiedades ópticas que se encuentren entre el elemento emisor y el receptor -en este caso entre la ciudad y la capa efectiva de atmósfera, y entre la capa efectiva de atmósfera y el observador-.

La atmósfera por donde atraviesa el flujo lumínico en su camino desde la ciudad, está compuesta principalmente de moléculas de aire y aerosoles. Y a una mayor altura de la capa efectiva de la atmósfera se encuentra también el ozono. Habrá extinción por moléculas y aerosoles desde la salida del flujo lumínico de la ciudad y hasta la llegada al observador, y habrá extinción por ozono a alturas mayores de 10 Km.

Es necesario aclarar que el ozono se encuentra a una altura mayor de 10 Km, si se toma en cuenta una altura de atmósferas mayor a 10 km, caso raro, se recomienda incluir una corrección por ozono.

El coeficiente de transmisión de la atmósfera, tomando en cuenta la ley de Beer-Lambert-Bouguer, se obtiene mediante la fórmula mostrada a continuación, basándonos en Houghton (2002).

$$\boldsymbol{CT = exp^{-XK}} \tag{13}$$

Donde:

$\boldsymbol{K\lambda}$ = Extinción atmosférica (Dependiendo de la partícula)
$\boldsymbol{X}$ = Masa de aire (Para la ciudad y para el observador)

Como todas las caracterizaciones de la presente propuesta serán representadas en ángulos menores de 85 grados, podemos utilizar la fórmula tradicional o la aproximación desarrollada por Kasteng y Young (1989).

Realizando una prueba sencilla –de datos arrojados entre 0 y 85 grados para cada una de las fórmulas- determinamos cual se abarca más a nuestras necesidades y cuál de las dos fórmulas posee más exactitud.

Fórmula tradicional:

$$\boldsymbol{X = \frac{1}{CosAng}} \tag{14}$$

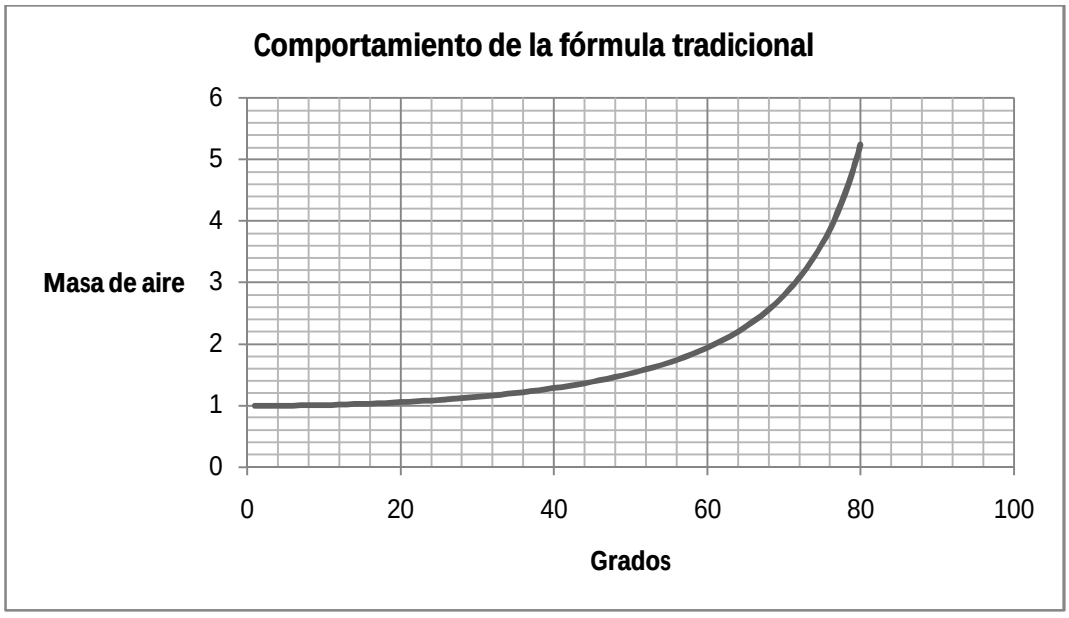


Fig. 9.7 Gráfica de los resultados de la fórmula tradicional de masa de aire

Kasteng y Young (1989):

$$X = \frac{1}{CosAng + 0.50572(96.07995 - Ang)^{-1.6364}} \quad (15)$$

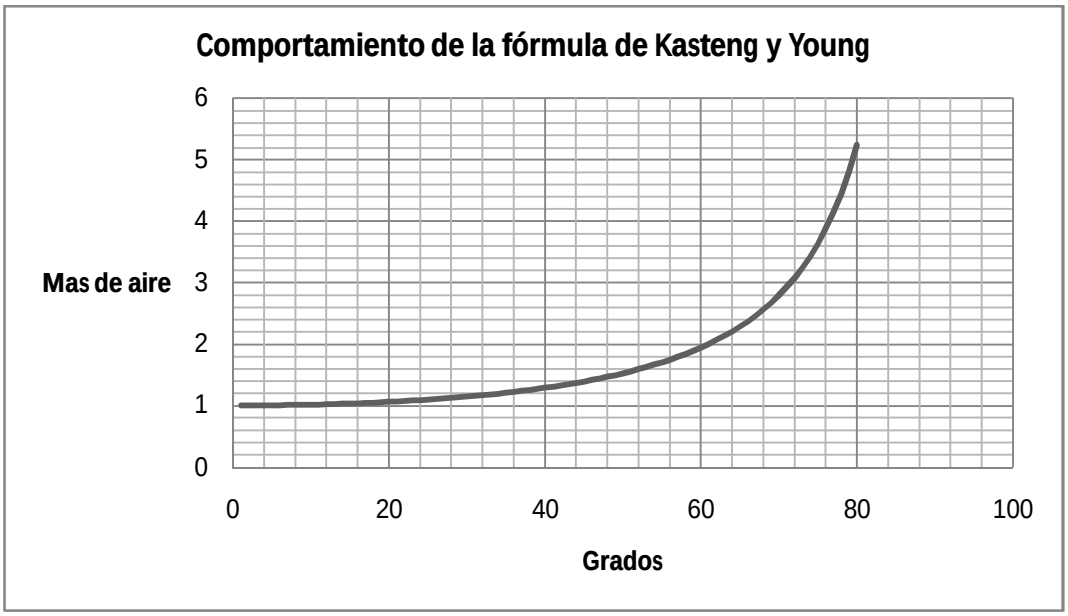


Fig. 9.8 Gráfica de los resultados de la fórmula Kasteng y Young (1989) de masa de aire

Nota: Ang corresponde al ángulo cenital para ambas fórmulas.

Las dos presentan gráficamente características similares. Sin embargo, se utilizó la recomendada por Kasteng y Young (1984) por considerarse más exacta, como ellos mismos lo indican en su revisión, además representa la masa de aire con más realidad incluso hacia el zénit.

9.4.1. Extinción atmosférica

Para obtener el coeficiente de extinción de la luz por cualquier medio, es necesario tomar en cuenta los factores de ese medio que extinguen la luz. En el caso de la atmósfera, en las observaciones atmosféricas, como se explicó anteriormente, se tiene tres principales componentes; dispersión de Rayleigh, dispersión por aerosoles y la extinción molecular principalmente por ozono. Un coeficiente de extinción anhelado por las personas que estudian el cosmos, sería de 0.15. (Schaefer 1987). En un buen centro de observación, como el Cerro Tololo en Chile, se pueden encontrar estos valores. El promedio del coeficiente de extinción atmosférica en el este de los Estados Unidos ronda por el 0,30. (Green 1992).

La extinción total será el resultado de la suma de los factores:

$$K\lambda = Er + Ea + Eoz \tag{16}$$

Donde:

$K\lambda$ = Extinción atmosférica
Er = Dispersión de Rayleigh
Ea = Dispersión por aerosoles
Eoz = Extinción por ozono

La obtención del coeficiente de extinción para cada factor se explica con detalle a continuación.

9.4.1.1. Dispersión por moléculas de Rayleigh

Ya se mencionó anteriormente que en astronomía se toman en cuenta tres factores para calcular la total extinción que sufren los objetos que se observan. Una de ellas es la fórmula de dispersión de Rayleigh. Ésta fórmula determina cual es la dispersión que sufre la luz al atravesar las partículas de aire. La fórmula es la siguiente:

$$Aray = 9.4977\ x\ 10^{-3} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^4 c^2\ x\ exp\left(-\frac{Aobs}{7.996}\right) \tag{17}$$

$$c = 0.23465 + \left(\frac{1.076\ x\ 10^2}{146 - (1/\lambda^2)}\right) + \left(\frac{0.93161}{41 - (1/\lambda^2)}\right) \tag{18}$$

Donde:

$Aray(\gamma, h)$ = Extinción de Rayleigh (mag/masa de aire)
$Aobs$ = Altura del observador –Km sobre el nivel del mar-
λ =Longitud de onda de la luz que se está estudiando
c = Índice de refracción

9.4.1.2. Extinción por ozono

Otro factor importante en la extinción atmosférica es el ozono. Este se localiza a una altura de entre 10 y 40 Kilómetros. Al servir de filtro de las ondas ultravioletas, es también un

contribuyente importante a la extinción visual de los objetos observados. La fórmula de extinción por ozono es: (Bessel 1990; Kumar et al. 2000)

$$\boldsymbol{Aoz(\lambda) = 0.2775 Coz(\lambda)} \tag{19}$$

$$\boldsymbol{Coz(\lambda) = 3025 exp\left(-131(\lambda - 0.26)\right) + 0.1375 exp\left(-188(\lambda - 0.59)^2\right)} \tag{20}$$

Donde:

$\boldsymbol{Coz(\lambda)}$ Es el coeficiente de absorción del ozono
$\boldsymbol{\lambda}$ =Longitud de onda de la luz que se está estudiando

Un valor promedio que toman algunos investigadores en la extinción por ozono es: Aoz= 0.016 (Schaefer 1987). Sin embargo, se toma la fórmula completa y de ésta manera se podrá caracterizar la extinción por ozono a diferentes longitudes de onda. Aunque volviendo a recordar que el ozono difícilmente afecta a la contaminación lumínica, por lo que para este modelo no se utilizará.

9.4.1.3. Dispersión por aerosoles

Por último, el otro factor relacionado con la extinción atmosférica son los aerosoles. Los aerosoles son partículas de polvo fino, gotas de agua y contaminación atmosférica. Son más bajas que las moléculas que causan la difusión Rayleigh.

La determinación de los aerosoles es una tarea difícil, por las variaciones que presentan en temporadas y regiones, además la extinción depende poco de la longitud de onda. Sin embargo se puede tener una muy buena aproximación con la fórmula que se presenta a continuación (Stalin et al 2008).

$$\boldsymbol{Aaer(\lambda, h) = Ao\lambda^{-\Sigma} exp\left(-\frac{h}{H}\right)} \tag{21}$$

Donde:

$\boldsymbol{\gamma}$ =Longitud de onda de la luz que se está estudiando.
$\boldsymbol{Ao}$ y $\boldsymbol{\Sigma}$ dependen del lugar geográfico
$\boldsymbol{Aop}$ = El espesor óptico total de los aerosoles atmosféricos para una longitud de onda de un micrón. Depende del contenido total de partículas y de su eficiencia en la absorción y dispersión

de la luz. (Stalin et al 2008). Normalmente se toma una constante de 0.087. (Bessel 1990, Mohan et al 1999).

$\boldsymbol{Aerc} \approx 0.8$ (Mohan et al 1999) Se recomienda tomar un valor de 1,3 para α. (Angstrom 1961, Schaefer y Bulder 1992, Green 1992).

$\boldsymbol{Aobs}$ = Altura del observador –Km sobre el nivel del mar-

$\boldsymbol{H}$ = escala de alturas H≈1.5 km. Usualmente se toma este valor como estándar. (Hayes y Latham 1975).

9.4.2. Cálculo del coeficiente de transmisión

El cálculo completo involucra solo dos fuentes de extinción atmosférica -aerosoles y moléculas- y los dos respectivos viajes de la luz –hacia la atmósfera y hacia el observador- Es verdad que el ozono es una importante fuente de extinción atmosférica, sin embargo, se toma en cuenta en las observaciones astronómicas, es decir, en la extinción de la luz que viene de fuera de la atmósfera. Como la contaminación lumínica se encuentra dentro de un espacio efectivo atmósfera terrestre y el ozono a una altura mayor de 10 Kilómetros, recomendamos no utilizarlo en el modelo, o solo en casos en que se tenga la certeza que existe ozono en el camino de la luz.

Por lo tanto:

$$\boldsymbol{CT = exp^{-XK} = C1 + C2} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{C1 = exp^{-X1(Ka+Km)PA}} \tag{23}$$

$$\boldsymbol{C2 = exp^{-X2(Ka+Km)AO}} \tag{24}$$

Donde:

$\boldsymbol{CT}$ = Coeficiente de transmisión total

$\boldsymbol{C1}$ = Primer coeficiente de transmisión

$\boldsymbol{C2}$ = Segundo coeficiente de transmisión

$\boldsymbol{X1}$ = Masa de aire de la ciudad

$\boldsymbol{X2}$ = Masa de aire del observador

$\boldsymbol{(Ka + Km)PA}$ = Extinción atmosférica entre la ciudad y el límite de atmósfera

$\boldsymbol{(Ka + Km)AO}$ = Extinción atmosférica entre el observador y el límite de atmósfera

9.5. Análisis de probabilidad de dispersión

Como se ha ido analizando a lo largo del presente trabajo, la atmósfera consiste en una composición de partículas moleculares y aerosoles que interactúan con la iluminación que parte del flujo contaminante. En este apartado se analiza la dispersión que sufren, debido a la composición atmosférica, los fotones en su trayecto desde la ciudad hasta el punto en el que comienzan su retorno hacia el observador.

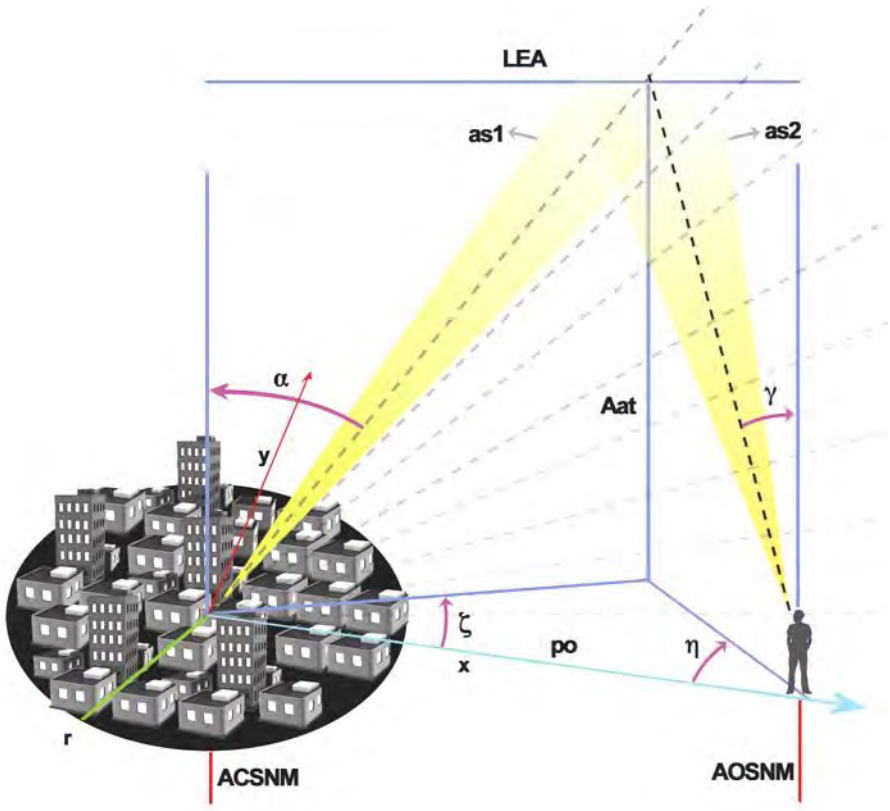


Fig. 9.9 Esquema de probabilidad de dispersión

Se deberá determinar la probabilidad de que un fotón emitido por el foco contaminante y transmitido a través del ángulo solido primario, sea dispersado hacia el ángulo solido secundario y por lo tanto llegue al observador. Existen dos clases de dispersiones. La dispersión por componente molecular y la dispersión por partícula de aerosoles. Como las dos dispersan la luz de manera diferente, se utiliza una fórmula diferente para cada una de ellas.

Siguiendo a Baddiley (2002) y a Kocifaj (2007), se toma en cuenta la función de la fase de dispersión. De esta manera, para determinar el efecto del primer ángulo solido en el segundo, y por supuesto en el observador, deberá realizarse una integración definida en toda la línea de , desde el suelo hasta la altura efectiva de atmósfera.

Cuando la luz golpea una partícula con un índice de refracción diferente de su medio ambiente se produce refracción, las características de la refracción dependerán de las características de las partículas. (Prahl, 1988). Así pues, la fórmula utilizada se muestra a continuación:

$$\boldsymbol{Prob = \frac{1}{4\pi} FF\,(1,2)D} \tag{25}$$

Donde:

$\boldsymbol{D =}$ Coeficiente de Dispersión

$\boldsymbol{FF}$ = Función de la fase de dispersión. Esta función describe la cantidad de luz dispersada desde la dirección del vector $\mathbf{1}$, dentro de la dirección del vector $\mathbf{2}$ -en el caso de la presente propuesta, ángulo solido primario y ángulo solido secundario-. La función más utilizada es tratarla por medio de probabilidad de distribución. (Prahl, 1988). En este caso, la fórmula $\boldsymbol{\frac{1}{4\pi} P\,(1,2),}$ satisface la condición de normalización: $\boldsymbol{\int 4\pi\, p(1,2) dw = 1}$ La función de fase de dispersión molecular, basándonos en Baddiley (2002), será:

$$\boldsymbol{FFm = \left(\frac{3}{4}\right)(1 + cos^2\theta)} \tag{26}$$

La función de fase para la dispersión por aerosoles, basándonos en Kocifaj (2007), será la siguiente:

$$\boldsymbol{FFa = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g^2 cos\theta)^{\frac{3}{2}}}} \tag{27}$$

Donde de acuerdo a las características del modelo y analizando geométricamente tenemos que:

$$\boldsymbol{\theta = Arccos\left(\frac{1}{2}\left(\frac{po^2}{Aat^2} cos\gamma cos\alpha - \frac{cos\alpha}{cos\gamma} - \frac{cos\gamma}{cos\alpha}\right)\right)} \tag{28}$$

Y en donde:

$\boldsymbol{g = \frac{1}{2}\int_{-1}^{+1} P cos\theta d(cos\theta) = \frac{\beta}{3}}$ (Lenoble 1985)

Para cálculos numéricos se puede tomar un valor de $\boldsymbol{g = 0,90}$ (Kocifaj 2007)

Por lo tanto la dispersión en la presente propuesta se representa mediante la siguiente probabilidad:

$$Prob = Disp\frac{1}{4\pi}P\,(FFm + FFa) = Alb\ x\ K\lambda\ x\ \frac{1}{4\pi}(FFm + FFa) \tag{29}$$

Donde:

Disp = Dispersión
FFm = Función de fase para la dispersión molecular
FFa = Función de fase para la dispersión por aerosoles
Alb = Albedo
K = Extinción

9.6. Determinación de obstáculos por orografía

La orografía es un aspecto que aun no ha sido abordado por los investigadores de la contaminación lumínica, salvo contados casos solamente teóricos mencionados en el apartado de antecedentes de este trabajo. Para determinar la manera en que la orografía afecta la distribución de la iluminación artificial proveniente de las ciudades se realizó el estudio de los pirineos, cuyos datos se expusieron en el apartado de análisis de resultados de este trabajo. Para la presente propuesta se asume que un porcentaje de la montaña extingue la luz artificial proveniente de la ciudad, y por lo tanto afecta a la contaminación lumínica resultante.

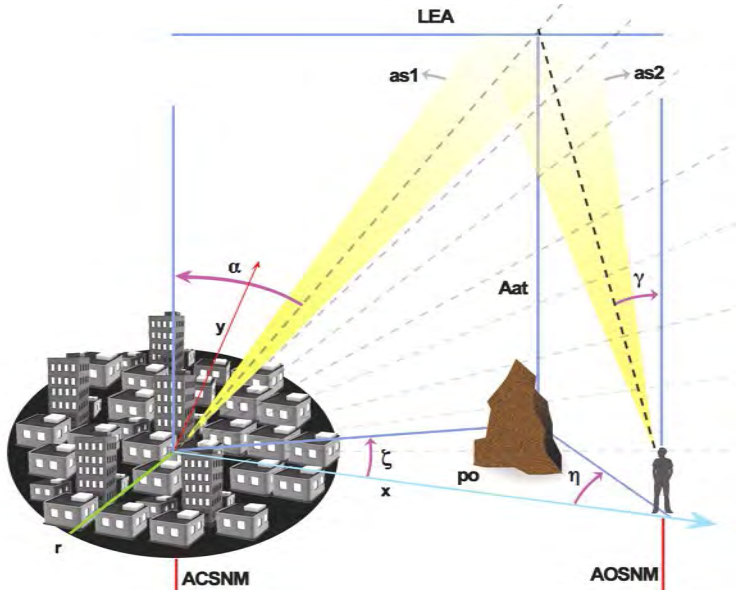


Fig. 9.10 Esquema de obstáculo por orografía entre el observador y la ciudad (Solano., San Martín, García 2010c)

Empíricamente observamos que el efecto de la orografía dependerá del tamaño del área contaminante, la distancia a la que se localice la montaña de la ciudad, la altura de la ciudad y el ángulo del observador. Se determina un área hipotética del foco contaminante empíricamente y se determina el área perspectiva del obstáculo dependiendo de la distancia de la ciudad y la distancia del observador.

En anteriores apartados se disertó sobre la dispersión de la luz que sucede a través de la atmósfera compuesta por aerosoles y partículas moleculares, así como la probabilidad de que suceda. También observamos que es necesario integrar definidamente en el volumen atmosférico para determinar el flujo lumínico resultante. En este caso la integral viene dada por la fórmula siguiente:

$$\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Aat}} \boldsymbol{FldAat} \tag{30}$$

Donde:

$\boldsymbol{Aat}$ = Altura efectiva de atmósfera
$\boldsymbol{Fl}$ = Flujo lumínico
$\boldsymbol{dAat}$ = Diferencial de altura de la atmósfera

En caso de obstáculos orográficos entre la ciudad y el observador, recomendamos la siguiente fórmula, agregando el concepto de corrección por orografía:

$$\int_{\boldsymbol{Co}}^{\boldsymbol{Aat}} \boldsymbol{FldAat} \tag{31}$$

$$\boldsymbol{Co = Aobst * Exp}\left(-\left(\left(-\boldsymbol{PO + Dobst}\right) * \frac{\boldsymbol{Aobst}}{\boldsymbol{Aat} * \mathbf{1000}}\right)\right) \tag{32}$$

Donde:

$\boldsymbol{Co}$ = Corrección orografía
$\boldsymbol{Aobst}$ = Altura obstáculo
$\boldsymbol{PO}$ = Distancia entre el punto contaminante y el observador.
$\boldsymbol{Dobst}$ = Distancia obstáculo del observador
$\boldsymbol{Aat}$ = Altura efectiva de atmósfera

En este caso la observación deberá dirigirse en dirección acimutal al obstáculo, si se tienen ángulos acimutales en regiones diferentes, la fórmula propuesta no deberá utilizarse.

9.7. Modelo que evalúa la variación de condiciones nocturnas de luminosidad en espacios afectados por la Contaminación Lumínica con atmósfera diáfana

Se desarrolla la fórmula completa para una atmósfera sin condiciones adversas de clima tomando en cuenta todos los factores expuestos anteriormente y los principios de fotometría.

Tenemos un flujo lumínico dirigido que corresponde al EFS partiendo de la ciudad hacia el primer ángulo sólido, que podemos llamar también flujo luminoso y que mide la energía global emitida por el foco contaminante. Por lo tanto, este flujo se representa:

$$\boldsymbol{Flha = AcxEFSxCos\alpha d\Omega 1} \tag{33}$$

$$\boldsymbol{d\Omega 1 = \frac{dS1}{pa^2}} \tag{34}$$

$$\boldsymbol{dS1 = dh * dv} \tag{35}$$

Donde:

$\boldsymbol{Flha}$ = Flujo lumínico hacia ángulo solido primario
$\boldsymbol{Ac}$ = Área de la ciudad –tomando la fuente puntual el $\boldsymbol{Ac}$ siempre será igual a 1-
$\boldsymbol{EFS}$ = Emisión de flujo superior
$\boldsymbol{\alpha}$ = El ángulo que se forma entre el zenit y la línea del flujo dirigido.
$\boldsymbol{d\Omega 1}$ = Diferencial de ángulo solido primario. El ángulo solido que representa al flujo lumínico que parte de la ciudad, le llamamos ángulo solido primario. Éste ángulo tiene relación con el volumen en que los fotones impactan en la atmósfera, y la distancia que hay entre dicha superficie y la ciudad. Es decir, el flujo luminoso recibido por la atmósfera. (Wolfram research 2010).
$\boldsymbol{dS1}$ = Superficie elemental de primer ángulo sólido
$\boldsymbol{dh * dv}$ = Los lados de la superficie elemental de ángulo sólido, representados en la figura
$\boldsymbol{pa}$ = Distancia entre foco y el volumen donde impactan los fotones. La ley de la inversa del cuadrado o ley cuadrática inversa refiere a algunos fenómenos físicos cuya intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia al centro donde se originan. Como consecuencia de la propagación

de la luz en línea recta, esta ley también es utilizada en la iluminación. Denominamos $\boldsymbol{pa}$ a la distancia y debido a la ley cuadrática inversa, esta $\boldsymbol{pa}$ estará elevada a un cuadrado negativo.

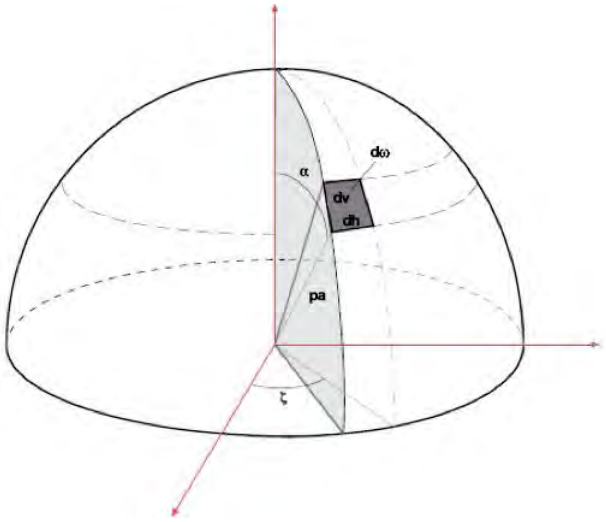


Fig. 9.11 Representación grafica del primer ángulo solido (Solano., San Martín, García 2009b)

Continuando con el modelo, tenemos el flujo luminoso por el primer ángulo solido, ahora debemos determinar el comportamiento de la intensidad a través del volumen de ángulo solido, tomando en cuenta la distancia y la extinción de la luz en ese paso. Por lo tanto:

$$\boldsymbol{Fllea = AcxEFSxCos\alpha \frac{dS1}{pa^2} C1} \tag{36}$$

Donde:

$\boldsymbol{Fllea}$ = Flujo lumínico hacia atmósfera
$\boldsymbol{C1}$ = Primer coeficiente de transmisión

Hasta este punto se tiene el flujo luminoso por el primer ángulo sólido en relación a la distancia, por lo tanto se deben determinar los fotones que pasaran desde ese ángulo sólido al segundo ángulo solido en dirección al observador.

La probabilidad para una atmósfera compuesta por moléculas y aerosoles, se vio anteriormente.

Tomando en cuenta estos factores:

$$\boldsymbol{Flho = AcxEFSxCos\alpha \frac{dS1}{pa^2} C1C2\ x\ Prob\ x\ ArodΩ2} \tag{37}$$

Donde:

$\boldsymbol{Flho}$ = Flujo lumínico hacia observador
$\boldsymbol{C2}$ = Segundo coeficiente de transmisión
$\boldsymbol{Prob}$ = Probabilidad de dispersión
$\boldsymbol{Aro}$ = Área de observador
$\boldsymbol{d\Omega 2}$ = Diferencial de ángulo solido secundario

El primer ángulo solido es proporcional al segundo, la superficie elemental del primer ángulo solido es proporcional a la diferencial de distancia del segundo (Kocifaj 2007), por lo que La fórmula anterior pasa a ser:

$$\boldsymbol{Flho = AcxEFSxCos\alpha\ x\ pa^{-2} x\ C1C2\ dao\ x\ Prob\ x\ ArodΩ2} \tag{38}$$

Donde:

$\boldsymbol{dao}$ = Diferencial de distancia entre el observador y volumen donde impactan los fotones.

Ahora, basándonos en la geometría del modelo propuesto tenemos:

$$\boldsymbol{dao = \frac{dh}{Cos\gamma}} \tag{39}$$

$$\boldsymbol{pa^{-2} = \frac{Cos^2\alpha}{Aat^2}} \tag{40}$$

$$\boldsymbol{Flho = AcxEFSxCos^3\alpha\ x\ Aat^{-2} x\ C1C2\ dAat\ x\ cos^{-1}\gamma\ x\ Prob\ x\ ArodΩ2} \tag{41}$$

Donde:

$\boldsymbol{Aat}$ = Altura de atmósfera
$\boldsymbol{dAat}$ = Diferencial de altura de atmósfera. De esta manera se podrá integrar en una altura de atmósfera definida. Basándonos en Kocifaj (2007)

Tomando en cuenta otro principio de fotometría tenemos que la intensidad luminosa recibida por el observador será proporcional al área del observador y el ángulo solido secundario –ángulo de observación-.

Por lo tanto:

$$\boldsymbol{IObs = \frac{Ac}{Cos\gamma}\, x \frac{EFSxCos^3\alpha\, x\ Aat^{-2} x\, C1C2\, dAat\, x\, Prob\, x\, ArodΩ2}{ArodΩ2}} \tag{42}$$

Donde:

$\boldsymbol{IObs}$ = Intensidad al observador

Eliminando términos similares y agregando la integración por altura de atmósfera tenemos:

$$\boldsymbol{IO = \frac{Ac}{Cos\gamma}\int_0^{Aat} (EFSxCos^3\alpha\, x\ Aat^{-2} x\, C1C2\ x\, Prob) dAat} \tag{43}$$

Y agregando la corrección por obstáculo orográfico y la corrección por curvatura de la tierra:

$$\boldsymbol{IO = CU\frac{Ac}{Cos\gamma}\int_{CO}^{Aat} (EFSxCos^3\alpha\, x\ Aat^{-2} x\, C1C2\ x\, Prob) dAat} \tag{44}$$

Donde:

$\boldsymbol{CO}$ = Corrección por orografía

$\boldsymbol{CU}$ = Corrección por curvatura de la tierra

Así también es posible delimitar la longitud de onda que está relacionada con la contaminación lumínica del caso de estudio, integrando definidamente de acuerdo a la parte del espectro que se conozca de la luz proveniente del foco contaminante. Kocifaj (2007).

Por lo tanto:

$$\boldsymbol{IO = CU\frac{Ac}{Cos\gamma}\int_{CO}^{Aat} (Cos^3\alpha\, x\ Aat^{-2} x \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} (EFS\, x\, C1C2\ x\, Prob)\, d\lambda) dAat} \tag{45}$$

Donde:

$\boldsymbol{\lambda 1}$ = Menor longitud de onda

$\boldsymbol{\lambda 2}$ = Mayor longitud de onda

La fórmula 46 corresponde al modelo propuesto para atmosfera diáfana, sin tomar en cuenta condiciones adversa de climatología. Para convertir a luminancia debemos conocer la superficie aparente perteneciente al volumen de atmósfera, esta superficie en metros cuadrados nos dará la aproximación de la luminancia que afecta al observador. La superficie aparente dependerá de la distancia y del ángulo de observación. Así también podemos convertir los valores de luminancia en Mag/Arcseg^2 con una conversión recomendada por Zotti (2007).

(46)

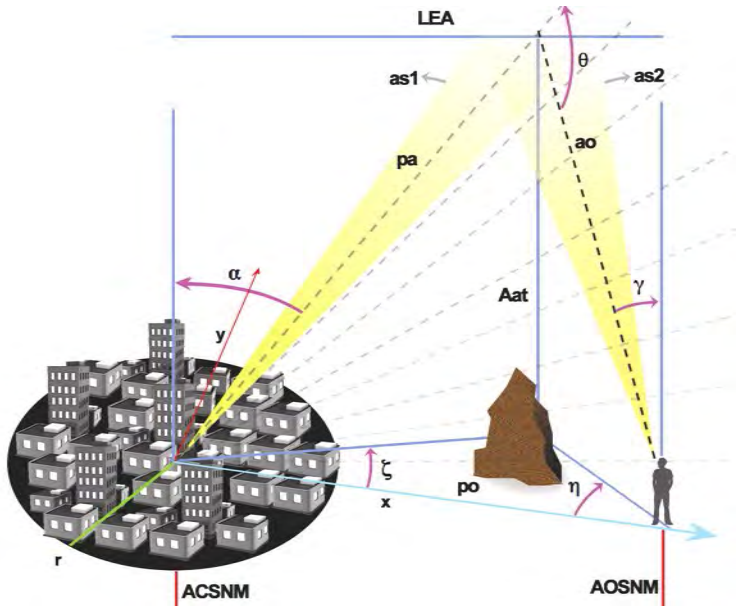


Fig. 9.12 Esquema del modelo completo (Solano., San Martín, García 2010c)

9.8. Propuesta de corrección para condiciones adversas de climatología

Existe una manera de determinar la extinción si se cuenta con condiciones adversas de clima. Si se tienen un objeto iluminado, un observador a cierta distancia del objeto y un medio climatológico adverso que extinga la luz, podemos obtener un algoritmo que nos determine la extinción de la luz que sufre el objeto en su camino óptico. (Stoelinga y Warner 1999).

Stoelinga y Warner (1999) proponen una fórmula que es ampliamente utilizada posteriormente en investigaciones sobre visibilidad atmosférica. La fórmula se muestra a continuación:

$$\frac{I(Xobs)}{Io} = exp\ -(Int \sum_{0}^{Xobs} K\lambda(x)dx \tag{47}$$

Donde:

Io = Luminancia del objeto.

I(Xobs) = Luminancia en la localización del observador.

Kλ = Coeficiente de extinción.

Despejando:

$$\mathbf{0.02} = \boldsymbol{exp} -(\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Xobs}} \boldsymbol{K\lambda(x)dx}) \tag{48}$$

$$\mathbf{0.02} = \boldsymbol{exp}(-\boldsymbol{K\lambda(x)}\{_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{Xobs}}) \tag{49}$$

$$\mathbf{0.02} = \boldsymbol{exp}(-\boldsymbol{K\lambda Xobs}) \tag{50}$$

$$\boldsymbol{ln}(\mathbf{0.02}) = -\boldsymbol{K\lambda Xobs} \tag{51}$$

$$\boldsymbol{Xobs} = \boldsymbol{VIS} = -\frac{\boldsymbol{ln}(\mathbf{0.02})}{\boldsymbol{K\lambda}} \tag{52}$$

La fórmula de visibilidad bajo condiciones adversas de climatología queda de la siguiente forma: (Stoelinga y Warner 1999).

$$\boldsymbol{VIS} = \boldsymbol{min}(\mathbf{2000.}, -\frac{\boldsymbol{ln}(\mathbf{0.02})}{\boldsymbol{K\lambda}}) \tag{53}$$

El coeficiente de extinción se divide en cuatro -uno para cada condición- y se obtiene:

$$\boldsymbol{K\lambda} = \mathbf{144.7}\ \boldsymbol{x}\ \boldsymbol{c}^{\mathbf{0.88}}$$ Nubes **(**Kunkel 1984) (54)

$$\boldsymbol{K\lambda} = \mathbf{2.24}\ \boldsymbol{x}\ \boldsymbol{c}^{\mathbf{0.75}}$$ Lluvia (Marshall y Palmer 1984) (55)

$$\boldsymbol{K\lambda} = \mathbf{327.8}\ \boldsymbol{x}\ \boldsymbol{c}^{\mathbf{1}}$$ Nube de nieve (Rutledge y Hobbs 1983) (56)

$$\boldsymbol{K\lambda} = \mathbf{10.36}\ \boldsymbol{x}\ \boldsymbol{c}^{\mathbf{0.7776}}$$ Nieve (Stallabrass 1985) (57)

Donde:

c = Concentración en g/m^3

9.8.1. Modelo que evalúa la variación de condiciones nocturnas de luminosidad en espacios afectados por la Contaminación Lumínica con condiciones adversas de climatología

Hay una propuesta realizada en el modelo de Kocifaj (2007) que permite conocer la influencia de las nubes en la contaminación lumínica conociendo la altura de la nube. Es necesario conocer la altura de la nube y el ángulo de reflejo de la nube, que está ligado directamente al ángulo de observación. La fórmula, adaptada a este modelo propuesto, se muestra a continuación.

$$\boldsymbol{In = \frac{Ac}{\pi(An)^2}\int_{\lambda 1}^{\lambda 2}(CRn\ xEFS)d\lambda\ \ x\ Cos^5\alpha\ x\ CTn} \tag{58}$$

Donde:

$\boldsymbol{In}$ = Intensidad aportada por la nube
$\boldsymbol{Ac}$ = área de la ciudad
$\boldsymbol{CRn}$ = Coeficiente de reflexión de la nube (Tomando un valor promedio de 0,5)
$\boldsymbol{An}$ = Altura de la nube
$\boldsymbol{EFS}$ = Emisión de flujo superior
$\boldsymbol{CTn}$ = Coeficiente de transmisión de la nube

Nota: El coeficiente de transmisión de la nube se calcula de la misma manera que se calcula el coeficiente de transmisión de la atmósfera, explicado anteriormente, en este caso se toma a la nube como una superficie y por lo tanto el coeficiente estará entre la ciudad y la altura de la nube, sin necesidad de integrar. Esa fórmula puede integrarse en el modelo propuesto y por lo tanto la intensidad luminosa incluyendo la reflexión por nubes será:

$$\boldsymbol{IOn = In + IO}$$
$$\boldsymbol{= In + Cu\frac{Ac}{Cos\gamma}\int_{CO}^{Aat}(Cos^3\alpha\ x\ \ Aat^{-2}x\ \int_{\lambda 1}^{\lambda 2}(EFS\ x\ C1C2\ \ x\ Prob)\,d\lambda)dAat} \tag{59}$$

L fórmula 60 representa el modelo final tomando en cuenta condiciones adversas de clima. En caso de que se requiera conocer la extinción de la contaminación lumínica en condiciones de lluvia y nieve, así como tener resultados más exactos, se recomienda utilizar las fórmulas utilizadas en el logaritmo de (Stoelinga y Warner 1999), -53, 54, 55 y 56- e incluirlas en el coeficiente de transmisión de la nube. Recordando que es necesario conocer la concentración en g/m^3. Por lo tanto, el coeficiente de transmisión quedaría:

$$CTaa = exp^{-X(K\lambda + K\lambda a)} \quad (60)$$

Donde:

$CTaa$ = Coeficiente de transmisión en atmósfera adversa

X = Masa de aire

$K\lambda a$ = Coeficiente de extinción de atmósfera adversa

$K\lambda$ = Coeficiente de extinción de atmósfera diáfana

Y por lo tanto, los coeficientes de transmisión – $C1C2$- incluidos en los modelos finales –fórmula 46 y fórmula 60- quedarían:

$$C1 = exp^{-X1(Ka+Km+K\lambda a)PA} \quad (61)$$

$$C2 = exp^{-X2(Ka+Km+K\lambda a)AO} \quad (62)$$

Donde:

$C1$ = Primer coeficiente de transmisión

$C2$ = Segundo coeficiente de transmisión

$X1$ = Masa de aire de la ciudad

$X2$ = Masa de aire del observador

$(Ka + Km + K\lambda a)PA$ = Extinción atmosférica entre la ciudad y el límite de atmósfera con condiciones adversas de clima

$(Ka + Km + K\lambda a)AO$ = Extinción atmosférica entre el observador y el límite de atmósfera con condiciones adversas de clima

Nota: La fórmula 60 no ha sido probada y solo se incluye como recomendación.

9.9. Fórmula para conocer la contaminación lumínica de un punto influenciado por varios focos contaminantes

Si se tiene varios focos que se cree influyen en el observador o punto analizado, se deberá analizar cada foco dependiendo de los ángulos que tengan hacia el observador y realizar una sumatoria de cada uno de los análisis. Por lo tanto:

$$IT = I1 + I2 + I3 \ldots + I\infty \quad (63)$$

Donde:

IT= La contaminación lumínica total

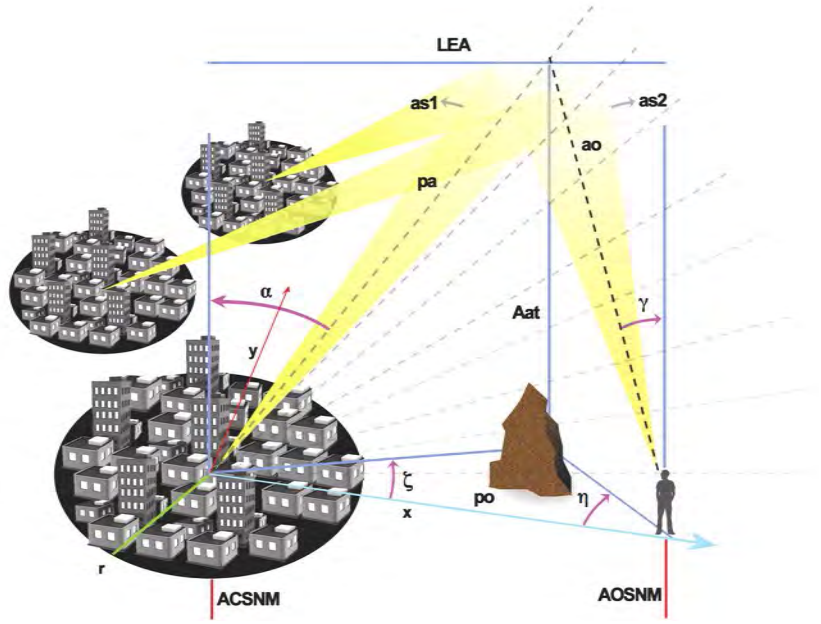


Fig. 9.13 Esquema del modelo completo para varios focos contaminantes

9.10. Pruebas al modelo propuesto

El modelo propuesto -la ecuación 46- se probó introduciendo las fórmulas en una plantilla de Excel y analizando el comportamiento. Los datos arrojados se graficaron y se correlacionaron con las mediciones in situ para determinar tendencias y comportamientos. Los datos pertenecen a simulaciones hacia el Zenit.

9.10.1. Caso real

Analizando un caso real, como el que se encontró en el Delta del Ebro, el recorrido de la Aldea a Deltebre. Hay que recordar que debemos tomar en cuenta los focos contaminantes que influencian el lugar y sumar los datos arrojados por cada uno de ellos.

Aplicando la Ley de Walker, como se ha hecho a lo largo del desarrollo de la investigación, determinamos que los focos contaminantes que influencian ese recorrido son: La Amposta, La Aldea, Camarles y Deltebre.

Analizando los focos por medo del método RAMAL-UPC tenemos:

Datos de análisis del foco	L'aldea	Camarles	Deltebre	Amposta
Habitantes	3.693	3.279	10.943	20.359
Total Potencia Instalada(W)			217.000,00	662.000,00
% potencia lámparas VM (50 lm/W)	70,00%	95,00%	20,00%	48,00%
% potencia lámparas INC (10 lm/W)				0,00%
% potencia lámparas VSAP (100 lm W)	30,00%	5,00%	80,00%	47,00%
% potencia lámparas HM (80 lm W)				
% potencia lámparas FL (60 lm/W)			0,00%	5,00%
% luminarias tipo A (50 % FHS)				6,40%
% luminarias tipo B (35 % FHS)				2,70%
% luminarias tipo C (30 % FHS)				2,20%
% luminarias tipo D (20 % FHS)				12,00%
% luminarias tipo E (5 % FHS)				0,00%
% luminarias tipo F (1 % FHS)				76,10%
% luminarias tipo G (30 % FHS)				0,60%
FHS medio	12,00%	6,00%	23,00%	5,84%
FHI medio	48,00%	63,00%	46,00%	66,82%
FTI (klm)	0,00	0,00	19.530,00	48.988,00
FHS total	1.295,25	572,98	4.491,90	2.862,74
EFS estimado (Klm)	2.072,40	1.475,41	5.839,47	7.772,90

Tabla 9.3 Análisis de los focos analizados en la simulación

Teniendo los focos contaminantes analizados, se procede a determinar los puntos de simulación en mapa y de esta manera se podrán obtener, de una manera más eficiente, las distancias que pertenecen a cada uno de los puntos; respecto al respectivo foco contaminante.

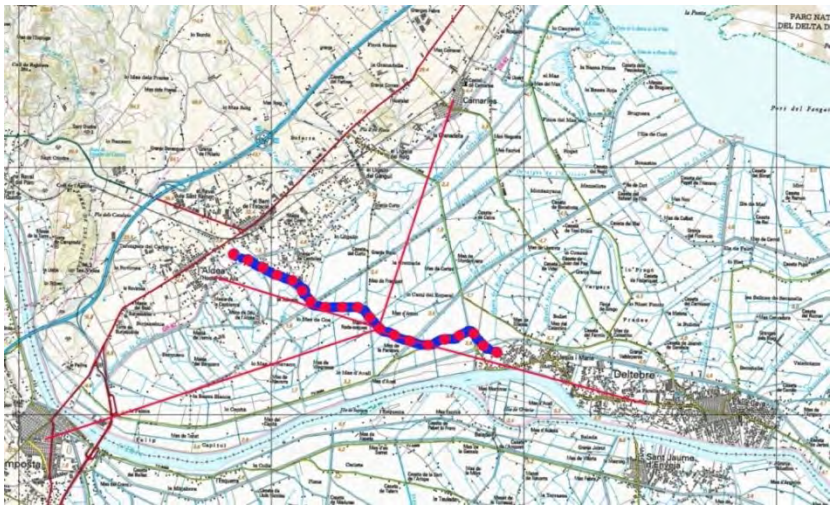


Fig. 9.14 Esquema de la simulación realizada con ejemplo de toma de distancia (Solano., San Martín, García 2009b)

Posteriormente de realizar las simulaciones y sumar la influencia de cada foco, se obtienen los primeros datos. A continuación se exponen un ejemplo de datos obtenidos por el modelo en contraste con los datos de mediciones in situ, posteriormente los gráficos que demuestran el comportamiento de ambas mediciones.

Luminancia fondo del cielo, datos modelo				Luminancia fondo del cielo, mediciones in situ			
Valor de referencia 2.474×10-4 Cd/m²				Valor de referencia 2.474×10-4 Cd/m²			
Punto	Cd/m2			Punto	Cd/m2		
1	16,981	**24**	20,421	**1**	15,45	**24**	20,43
2	17,237	**25**	20,449	**2**	14,6	**25**	20,51
3	17,466	**26**	20,476	**3**	17,38	**26**	20,35
4	18,86	**27**	20,503	**4**	17,73	**27**	20,35
5	18,971	**28**	20,53	**5**	14,98	**28**	20,29
6	19,077	**29**	20,556	**6**	19,68	**29**	20,58
7	19,455	**30**	20,582	**7**	19,9	**30**	20,49
8	19,541	**31**	20,683	**8**	19,89	**31**	20,61
9	19,623	**32**	20,658	**9**	19,88	**32**	20,61
10	19,702	**33**	20,647	**10**	19,88	**33**	20,16
11	19,778	**34**	20,633	**11**	20,33	**34**	20,62
12	20,058	**35**	20,621	**12**	20,71	**35**	20,48
13	20,091	**36**	20,608	**13**	20,32	**36**	20,48
14	20,123	**37**	20,598	**14**	20,08	**37**	20,59
15	20,155	**38**	20,582	**15**	20,3	**38**	20,54
16	20,186	**39**	20,524	**16**	20,09	**39**	20,59
17	20,217	**40**	20,451	**17**	20,37	**40**	20,59
18	20,247	**41**	20,439	**18**	20,37	**41**	20,56
19	20,277	**42**	20,385	**19**	20,37	**42**	20,51
20	20,307	**43**	20,367	**20**	20,48	**43**	20,51
21	20,336	**44**	17,673	**21**	20,33	**44**	17,16
22	20,365	**45**	17,466	**22**	20,25	**45**	15,44
23	20,393			**23**	20,41		

Tabla 9.4 Contraste de datos obtenidos por el modelo y mediciones in situ (Solano., San Martín, García 2009b)

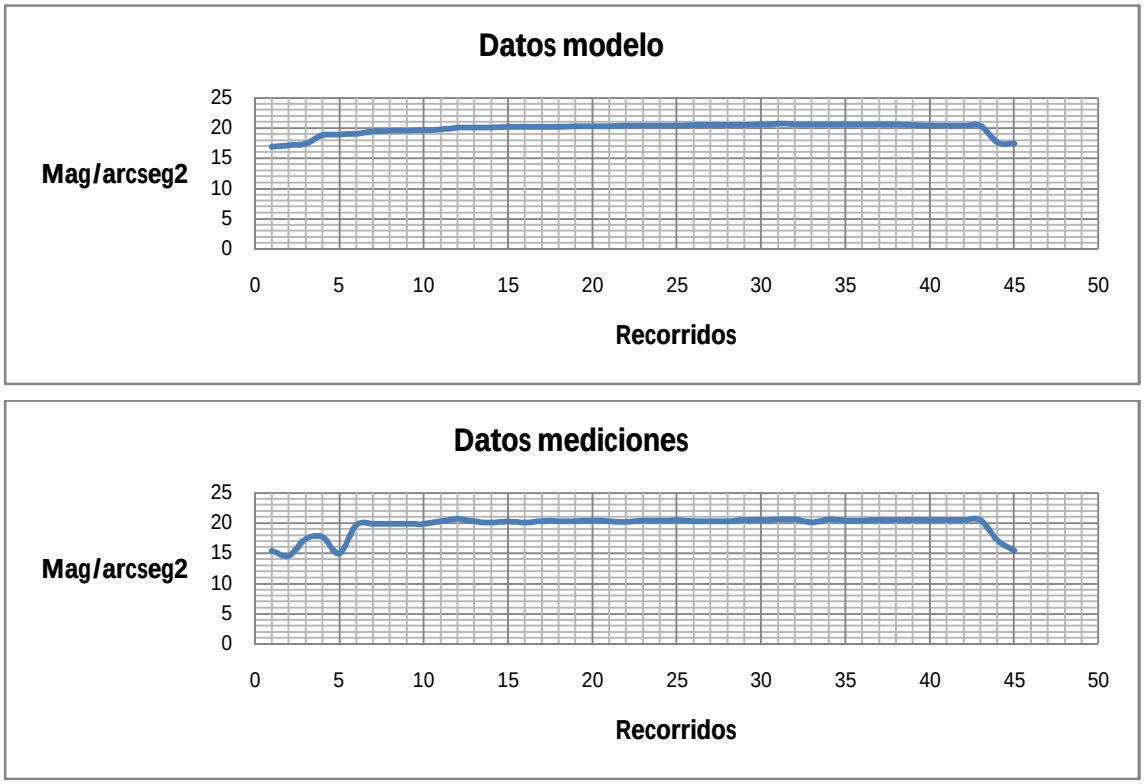


Fig. 9.15 Variación de la contaminación lumínica con la distancia (Solano., San Martín, García 2010c)

Se procede a analizar los datos obtenidos por el modelo propuesto, con los datos arrojados por las mediciones in situ; utilizando los modelos de correlación que han servido de análisis estadístico a lo largo de este trabajo.

		MEDICIONES	DATOS MODELO
MEDICIONES	Correlación de Pearson	1	0,906
	N	45	45
DATOS MODELO	Correlación de Pearson	0,906	1
	N	45	45
MEDICIONES	Correlación de Kendall	1,000	0,638
	N	45	45
DATOS MODELO	Correlación de Kendall	0,638	1,000
	N	45	45
MEDICIONES	Correlación de Spearman	1,000	0,786
	N	45	45
DATOS MODELO	Correlación de Spearman	0,786	1,000
	N	45	45

Tabla 9.5 Análisis estadístico de los datos de simulación de caso rea vs mediciones

Se puede observar una buena correlación entre los datos, asumiendo que las simulaciones fueron realizadas en condiciones de atmósfera diáfana y las mediciones se trataron de realizar bajo las mismas circunstancias.

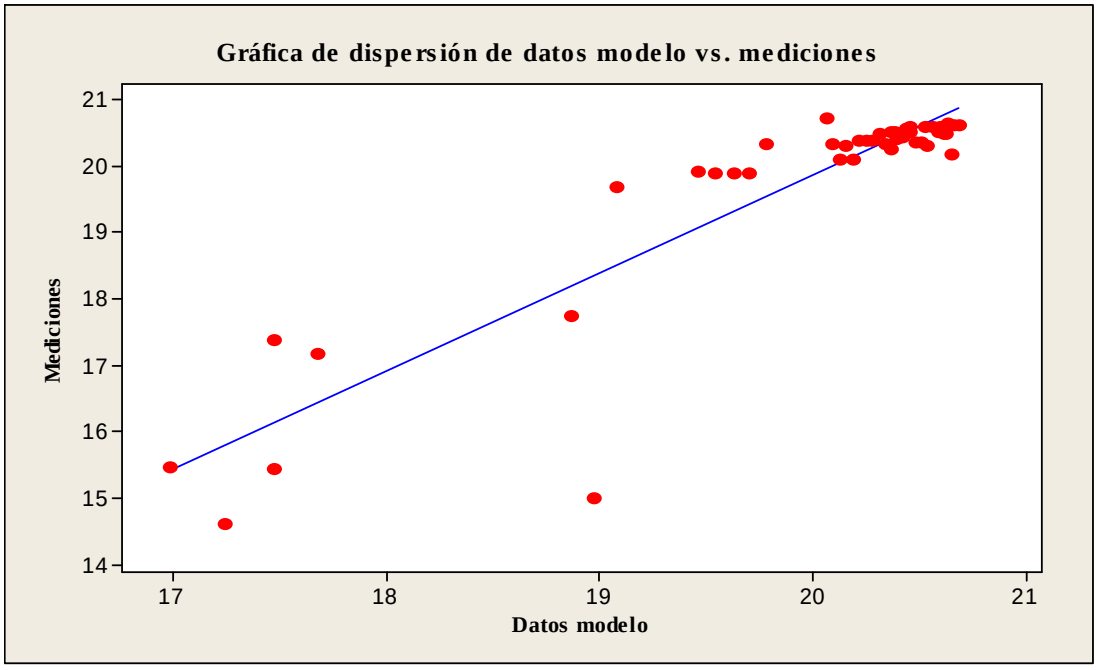


Fig. 9.16 Histograma de correlación entre mediciones in situ y simulaciones del modelo propuesto (Solano., San Martín, García 2009b)

9.10.2. Analizando la influencia por montañas

Se realizó una simulación similar a la del caso real, en esta ocasión tomando en cuenta los datos obtenidos en la fase 3 de este trabajo, con el objetivo de determinar el comportamiento del modelo ante las circunstancias de orografía del terreno. Un contraste de los datos se muestra a continuación.

Luminancia fondo del cielo, datos modelo Valor de referencia 2.474×10-4 Cd/m²		Luminancia fondo del cielo, mediciones in situ Valor de referencia 2.474×10-4 Cd/m²	
Punto	**Cd/m2**	**Punto**	**Cd/m2**
1	0,001644	**1**	0,00147715
2	0,001499	**2**	0,00120621
3	0,001131	**3**	0,00121737
4	0,00064	**4**	0,00081175
5	0,00071	**5**	0,00057204
6	0,00051	**6**	0,00081926
7	0,0008023	**7**	0,0007194
8	0,0007298	**8**	0,0008345
9	0,0006733	**9**	0,0005734
10	0,0007971	**10**	0,00078239
11	0,0007634	**11**	0,00078239
12	0,000586922	**12**	0,00078239
13	0,000726072	**13**	0,00070701
14	0,000942091	**14**	0,00081175
15	0,001266	**15**	0,0023342
16	0,00197	**16**	0,00123245
17	0,002354	**17**	0,00156897
18	0,002549337	**18**	0,00145324
19	0,00276392	**19**	0,00197832
20	0,001644	**20**	0,00147715

Tabla 9.6 Contraste de datos obtenidos por el modelo y mediciones in situ en relación a la orografía

		MEDICIONES	DATOS MODELO
MEDICIONES	Correlación de Pearson	1	0,775
	N	20	20
DATOS MODELO	Correlación de Pearson	0,775	1
	N	20	20
MEDICIONES	Correlación de Kendall	1,000	0,578
	N	20	20
DATOS MODELO	Correlación de Kendall	0,578	1,000
	N	20	20
MEDICIONES	Correlación de Spearman	1,000	0,766
	N	20	20
DATOS MODELO	Correlación de Spearman	0,766	1,000
	N	20	20

Tabla 9.7 Análisis estadístico de los datos de simulación vs mediciones con obstáculo orográfico

Los análisis muestran una buena correlación entre ambos datos, por lo que determinamos que la simulación se aproxima bastante a la realidad.

Analizando el histograma:

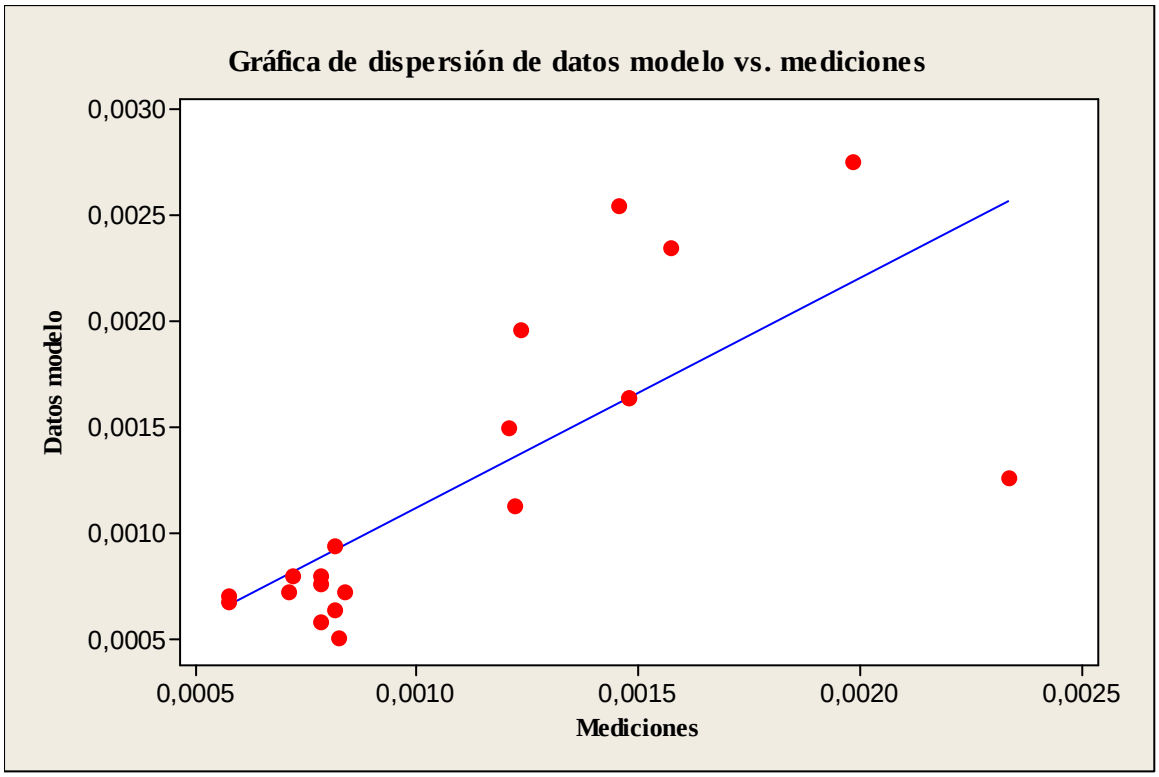


Fig. 9.17 Histograma de correlación entre mediciones in situ y simulaciones del modelo propuesto

El histograma también representa una buena aproximación de los datos arrojados por el modelo propuesto en relación a datos reales. Cabe señalar que se busco que los datos recogidos en ambiente de montaña estuvieran lejos de la influencia de otras variables -de la misma manera que en el apartado de análisis estadístico de este trabajo-.

9.10.3. Herramienta informática

Derivado de la propuesta realizada con la presente investigación, se creó una herramienta informática, que se encuentra en versión alfa –que representa la primera versión de las fases de desarrollo de todo software-, tomando en cuenta las características del modelo propuesto. De esta forma, el uso del modelo será más amigable y los datos se obtendrán de una manera más rápida y adecuada.

Algunos ejemplos de las pantallas utilizadas en el cálculo se muestran en la tabla siguiente.

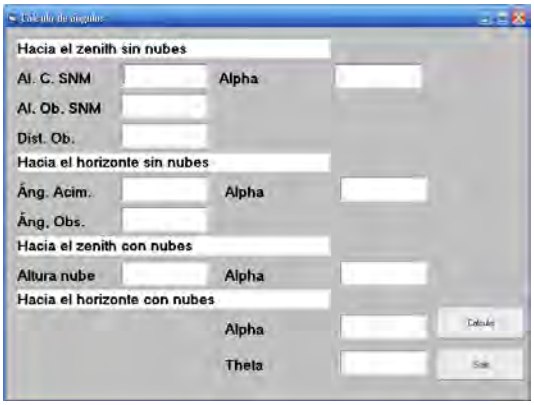
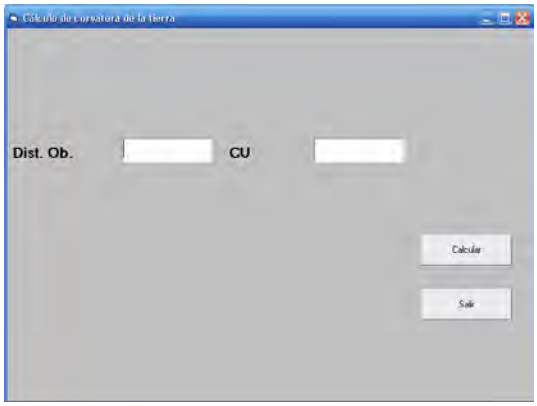
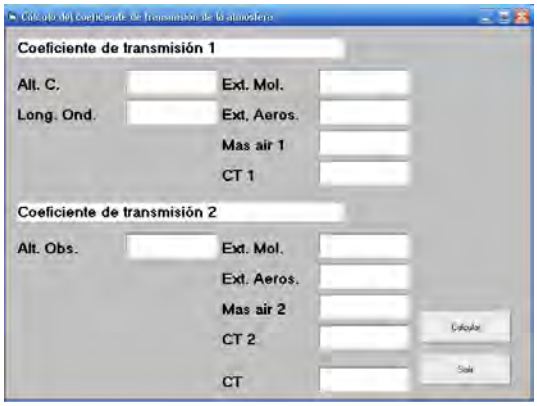
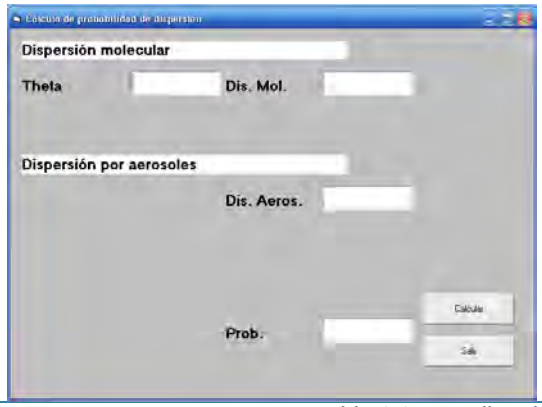
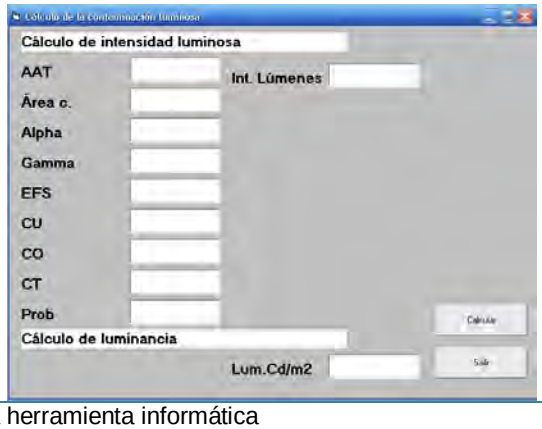
Plantilla de cálculo de ángulos	Plantilla de cálculo de EFS y FD
	
Plantilla de cálculo de curvatura de la tierra	**Plantilla de cálculo del coeficiente de transmisión de la atmósfera**
	
Plantilla de cálculo de probabilidad de dispersión	**Plantilla de cálculo de la contaminación lumínica**
	

Tabla 9.8 Pantallas de la herramienta informática

9.11. Conclusiones de la propuesta

Una aportación importante que se tuvo con el presente trabajo, fue la propuesta del modelo de análisis de la contaminación lumínica anteriormente descrito. El modelo presenta características que lo hacen de fácil utilización, abarcando los factores que involucran a la contaminación

lumínica y con una caracterización de los datos fácilmente interpretables. Se realizaron recorridos piloto y pruebas al modelo propuesto con el fin de correlacionar los datos arrojados con los datos encontrados en la recogida experimental de datos. El modelo propuesto nos da una aproximación de la contaminación lumínica que experimenta un observador alrededor del foco contaminante tomando en cuenta los factores que aumentan o disminuyen la contaminación lumínica.

En cuanto a aportaciones del modelo propuesto encontramos que cuenta con una corrección cuasi empírica si se presentan obstáculos orográficos, lo que permite establecer pautas del comportamiento de la contaminación lumínica ante tales circunstancias. Presenta una corrección por extinción por ozono si se realizan caracterizaciones en espacios y alturas donde se encuentre ese factor. Cuenta con una recomendación de utilización de fórmulas si se desea conocer la contaminación lumínica que experimenta el observador en condiciones climatológicas adversas.

Contempla una corrección por curvatura de la tierra, ya presentada antes como recomendación, pero no utilizada en modelos de tales características. Determina un análisis del foco contaminante, incluyendo un conteo cuantitativo de los elementos de iluminación artificial de los focos analizados, lo que lo diferencia de otros modelos que solo presentan datos empíricos en este aspecto.

Por último se representan los datos en luminancia y en MagArcsec^2, lo que permite que puedan ser tratados de acuerdo a la conveniencia de investigación. Por lo tanto, derivado de los anteriores argumentos:

- En las correlaciones de los recorridos piloto con los datos obtenidos in situ, encontramos claras tendencias entre ambos valores –analizando incluso el comportamiento de la contaminación lumínica de acuerdo al ángulo del observador y a la distancia del foco contaminante- ; esto nos permite concluir que el modelo propuesto si lleva a cabo un análisis de la contaminación lumínica, presentando datos fiables y manejables, y que por lo tanto la propuesta es satisfactoria.

- La herramienta informática derivada del modelo propuesto fue realizada con el objetivo de presentar el análisis más amigable. Encontramos que es útil en la medida que permite minimizar los tiempos de cálculo, permite realizar inferencias y definir pautas de ciertos focos ante ciertas circunstancias y aporta un mejor entendimiento del problema y su comportamiento.

CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES DE LA TESIS DOCTORAL

En este apartado se muestran las conclusiones que derivaron después del análisis presentado con el trabajo de investigación. También se determinan los objetivos cumplidos y las hipótesis comprobadas.

10.1. Conclusiones definitivas, contraste de hipótesis y cumplimiento de objetivos

El presente trabajo de tesis doctoral, tal y como se presentó esquemáticamente, ha tenido tres principales contribuciones al conocimiento del problema de carácter original.

En principio se mostraron las características de iluminación nocturna de tres diferentes espacios naturales, posteriormente se correlacionaron esas características con el objetivo de encontrar tendencias y realizar una especificación de los factores que determinan la contaminación lumínica; por último, se realizó una propuesta de modelo basándonos en dichos factores, con el objetivo de que la contaminación lumínica fuera caracterizada de una manera fiable y sencilla.

La credibilidad de cada una de las aportaciones fue demostrada por medio de revisiones bibliográficas, herramientas estadísticas y simulaciones de aplicación. Asimismo, a lo largo del desarrollo del trabajo se han ido demostrando conclusiones provisionales, por lo tanto las presentes conclusiones se encuentran planteadas de acuerdo a la contribución de las aportaciones mencionadas y de los planteamientos, incluyendo objetivos e hipótesis, que se tuvieron al inicio de trabajo

10.1.1. Conclusiones en base al planteamiento inicial del estudio y resultados obtenidos

El trazado inicial de esta investigación involucró la necesidad de plantearse una serie de objetivos que apoyaran el buen progreso del trabajo. De acuerdo al desarrollo que tuvo este trabajo, incluyendo los resultados y las conclusiones, podemos argumentar que dichos objetivos fueron cumplimentados. Se llevó a cabo la caracterización de la distribución de luminancias de la bóveda celeste nocturna, en su efecto a la variación de las condiciones nocturnas en espacios afectados por la contaminación lumínica, por las vías metodológicas que inicialmente se plantearon.

Los datos obtenidos por medio de la caracterización mencionada, se expresaron gráficamente en mapas lumínicos. Se llevaron a cabo correlaciones que determinaron los factores que caracterizan a la contaminación lumínica y se creó el modelo para evaluar la variación de condiciones nocturnas en espacios afectados por la contaminación lumínica. El modelo propuesto fue comprobado mediante la aplicación en situaciones reales, revisiones de expertos y publicaciones.

Por lo tanto, analizando dichos objetivos y recordando las hipótesis de trabajo en su contraste con los datos obtenidos, podemos concluir que:

1. Los factores que determinan la magnitud de la contaminación lumínica, expresado en valores de luminancia de la bóveda celeste, son los siguientes:

- Las características fotométricas que se encuentre en los focos contaminantes cercanos a la zona de estudio.
- La distancia que existe entre los focos contaminantes y la zona de estudio.
- La influencia de la humedad relativa en la transmisión de la luz de la atmósfera.
- Los obstáculos orográficos que se tengan entre el observador o zona de estudio, y el foco contaminante.
- La dispersión y la extinción que sufre la luz en su paso por la atmósfera y que es causada por aerosoles y moléculas en suspensión.

2. Ha sido posible obtener un modelo matemático que evalúa las condiciones de iluminación natural nocturna en espacios afectados por la contaminación lumínica, que engloba dichos factores y que permite el cálculo, simulación y predicción de la magnitud de la contaminación lumínica en un caso determinado.

Basándonos en la anterior disertación, podemos concluir que las hipótesis fueron comprobadas y los objetivos de la investigación conseguidos.

Agregando que se comprobó que la temperatura es un factor que no interviene en el aumento o disminuciones del fenómenos de la contaminación lumínica.

10.2. Aportaciones de carácter original

Las contribuciones del presente trabajo de tesis doctoral fueron mencionadas brevemente con anterioridad, en base a dichos planteamientos y a las conclusiones específicas podemos derivar que las aportaciones fundamentales fueron las siguientes:

- Se evidenciaron las características de iluminación artificial nocturna de tres diferentes espacios naturales analizados, incluyendo las gráficas de comportamiento y los mapas lumínicos. Esta metodología es un aporte importante para futuras investigaciones que se lleven a cabo en cualquiera de estos lugares o áreas con características similares.
- La recogida experimental permitió obtener una serie de datos que se correlacionaron entre sí. Este manejó aportó evidencias de las características que determinan al problema de la contaminación lumínica. Asimismo aporta la validación de los instrumentos utilizados.
- Se aporta la obtención de un modelo para la caracterización de las condiciones de iluminación nocturna en espacios afectados por la contaminación lumínica, con datos fiables y de uso sencillo.
- Se aporta la propuesta de una herramienta informática que incluye el desarrollo del modelo y con la cual se puede llevar a cabo un análisis más efectivo y rápido de la contaminación lumínica de espacios afectados. La herramienta actualmente se encuentra en estado alfa de desarrollo.

10.3. Propuestas de continuación

Todo trabajo de investigación de desarrolla con el principal objetivo de despejar incógnitas sobre el tema tratado, en este caso la contaminación lumínica, y establecer pautas para su entendimiento y tratamiento.

Asimismo se generan nuevas preguntas, ideas de continuación y propuestas a continuar. Atendiendo al presente trabajo podemos recomendar los siguientes desarrollos futuros:

- Realizar mediciones dentro de los focos contaminantes y correlacionarlos con los datos del modelo propuesto, esto con el fin de determinar si el modelo es utilizable para conocer la contaminación lumínica y su efecto en observadores dentro del foco contaminante.
- Desarrollar aun más la propuesta de corrección por orografía e incluir situaciones orográficas no solo entre la línea entre observador-ciudad. Determinar tanto la extinción como la dispersión que sufre la luz al impactar con la montaña u obstáculo orográfico y como contribuye su reflejo a la contaminación lumínica resultante, complementando los datos con mediciones in situ de lugares con las características orográficas adecuadas.
- Relacionar los datos arrojados por el modelo con datos biológicos fundamentados en estudios de migración y comportamiento de poblaciones animales y vegetales del lugar.

- ❖ Aumentar las aportaciones del modelo en cuestión de condiciones climatológicas adversas o singulares, incluyendo las recomendaciones establecidas, y correlacionado los datos arrojados con mediciones in situ.
- ❖ Caracterizar los focos contaminantes en base a su composición fotométrica.

10.4. Publicaciones derivadas de la tesis doctoral

A través del desarrollo de este trabajo de tesis doctoral, se llevaron a cabo divulgaciones y publicaciones en revistas indexadas con el objetivo de fomentar en el progreso de la ciencia y en el entendimiento del problema de la contaminación lumínica. Asimismo se buscó fundamentar la metodología y los análisis utilizados en la investigación por medio de la opinión de los investigadores relacionados, realizando ponencias en las cuales se exponían los progresos del trabajo efectuado. Estas aportaciones se muestran a continuación en orden cronológico:

Congresos internacionales:

1. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2010) Proposal model for the categorization of night sky brightness in natural spaces affected by light pollution. IN CIE (Ed.) *"Lighting Quality & Energy Efficiency" CIE2010* Viena.

2. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2010) Study In Light Pollution At The Natural Park Of Delta DEL EBRO, Spain. IN CIE (Ed.) *"Lighting Quality & Energy Efficiency" CIE2010.* Viena.

3. GARCÍA GIL, M. & SOLANO LAMPHAR, H. A. (2010) Quantification and assessment of the energy waste due to obstructive light, research methodology and analysis. IN CIE (Ed.) *"Lighting Quality & Energy Efficiency" CIE2010.* Viena.

4. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & FERRERO, L. (2009) Contaminación lumínica en espacios naturales (Investigación en el parque natural del delta del Ebro, conclusiones definitivas). IN CEI (Ed.) *XXXV Simposio nacional de iluminación, Comité Español de iluminación.* Pontevedra, España.

5. SOLANO LAMPHAR, H. A. & SAN MARTÍN PÁRAMO, R. (2009) Mathematical Model For The Measurement Of Light Pollution. IN DAW (Ed.) *2nd Bhartatiaya Vigyan Sammelan, Devi Ahilya Vishwavidyalaya.* Indore,India.

6. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, & R. GARCÍA GIL, M. (2009) Study In Light Pollution At The Natural Park Of Delta DEL EBRO, Spain. IN DAW (Ed.) *2nd Bhartatiaya Vigyan Sammelan, Devi Ahilya Vishwavidyalaya.* Indore, India.

7. SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & SOLANO LAMPHAR, 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.

8. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & FERRERO, L. (2008) Contaminación lumínica en espacios naturales (Investigación en el parque natural del delta del Ebro, primeras conclusiones). IN CEI (Ed.) *XXXIV Simposio nacional de iluminación, Comité español de iluminación.* Las palmas de gran canaria, España.

9. GARCÍA ALCARAZ, J. L., NORIEGA MORALES, S. A. & SOLANO LAMPHAR, H. A. (2007) Problemática en la justificación de tecnología avanzada para la manufactura. IN CIINDET (Ed.) *5to congreso industrial sobre innovación y desarrollo tecnológico.* Cuernavaca, Morelos, México.

10. SOLANO LAMPHAR, H. A. & REYES MARTÍNEZ, R. M. (2005) Ergoftalmología: Análisis de los Factores que Inciden en la Astenopía de los Trabajadores de Inspección Visual en la Industria Electrónica de Ciudad Juárez. IN SEMAC (Ed.) *VII Congreso Internacional de Ergonomía. Sociedad de Ergonomistas de México, A.C.* Monterrey, México.

Revistas indexadas:

11. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2010) Contaminació lumínica en espais naturals, investigació en el parc natural del delta de l'Ebre. *Revista del col.legi oficial d'Enginyers Industrials de Catalunya.* (En proceso de publicación).

12. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2009) Estudio Sobre Contaminación Lumínica en el Parque Natural del Delta del Ebro. *Ciencia y trabajo,* 34**,** 211-216.

13. GARCÍA ALCARAZ, J. L., NORIEGA MORALES, S. A. & SOLANO LAMPHAR, H. A. (2007) Problemática en la justificación de tecnología avanzada para la manufactura. *Revista de Ingeniería Industrial,* 2**,** 1-13.

14. SOLANO LAMPHAR, H. A. (2006) Ergoftalmología: Análisis de los Factores que Inciden en la Astenopía de los Trabajadores de Inspección Visual en la Industria Electrónica de Ciudad Juárez. *Ciencia y trabajo,* 21**,** 135-140.

Páginas web:

15. SOLANO LAMPHAR, H. A. (2010) www.contaminacionluminica.org.

Tesis:

16. SOLANO LAMPHAR, H. A. (2005) Ergoftalmología: Análisis de los Factores que Inciden en la Astenopía de los Trabajadores de Inspección Visual en la Industria Electrónica de Ciudad Juárez. . *Division De Estudios de Posgrado e investigacion.* Ciudad Juaréz, ITCJ.

Software:

17. SOLANO LAMPHAR, H. A. (2010) Herramienta informática para el cálculo de la contaminación lumínica “CALCOLUM”. Barcelona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LA CUARTA PARTE

1. ABRAMOWITZ & STEGUN (2006) Handbook of Mathematical Functions. IN UCLA (Ed.).

2. ALBERS, S. & DURISCOE, D. (2001) Modelling light pollution from population data and implications for national park service lands. *George Wright Forum,* 18**,** 56-68.

3. ANGSTRÖM, A. (1961) Radiation to Actinometric Receivers in Its Dependence on Aperture Conditions. *Tellus,* 13**,** 425 - 431.

4. BADDILEY, C. J. (2004) Light pollution in UK. . *British Astronomical Association, Campaign for Dark Skies.*

5. BESSEL, M. S. (1990) UBVRI passbands. *The Astronomical Society of the Pacific, Publications* 102**,** 1181.

6. GARSTANG, R. H. (1986) Model for artificial night-sky illumination. *Publications of the ASP,* 98**,** 364-375.

7. GREEN, D. W. E. (1992) Magnitude corrections for atmospheric extinction. *International Comet Quarterly,* 14**,** 55-59.

8. HAYES, D. S. & LATHAM, D. W. (1975) A rediscussion of the atmospheric extinction and the absolute spectral-energy distribution of VEGA. *Astrophysical Journal,* 197**,** 593-601.

9. HOUGHTON, J. T. (2002) *The physics of atmosphere,* Londres, Cambridge university press.

10. KASTEN, F. & YOUNG, A. T. (1989) Revised optical air mass tables and approximation fórmula. *Applied optics,* 28**,** 4735–4738.

11. KOCIFAJ, M. (2007) Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Applied optics,* 15**,** 3013-3022.

12. LENOBLE, J. (1985) *Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures*, A. Deepak Publishing.

13. MOHAN, V., UDDIN, W., SAGAR, R. & GUPTA, S. K. (1999) Atmospheric extinction at Devasthal, Naini Tal. *Bulletin of the Astronomical Society of India,* 27**,** 601.

14. PRAHL, S. A. (1988) Light Transport in Tissue. Texas, EUA, University of Texas at Austin.

15. SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & SOLANO LAMPHAR, 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.

16. SCHAEFER, B. E. (1987) *Sky and Telescope,* 73**,** 426.

17. SCHAEFER, B. E., BULDER, H. J. J. & BOURGEOIS, J. (1992) Lunar occultation visibility. *Icarus,* 100**,** 60-72.

18. 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.

19. SOLANO LAMPHAR, H. A. & SAN MARTÍN PÁRAMO, R. (2009b) Mathematical Model For The Measurement Of Light Pollution. IN DAW (Ed.) *2nd Bhartatiaya Vigyan Sammelan, Devi Ahilya Vishwavidyalaya.* Indore,India.

20. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2010c) Proposal model for the categorization of night sky brightness in natural spaces affected by light pollution. IN CIE (Ed.) *"Lighting Quality & Energy Efficiency" CIE2010* Viena.

21. STALIN, C. S., ANUPAMA, G. C., SAHU, D. K., PRABHU, T. P., BHATT, B. C., PARIHAR, P. S. & HEGDE, M. (2008) Night sky at the Indian Astronomical Observatory during 2000-2008. *Bulletin of the Astronomical Society of India,* 36**,** 111-127.

22. STOELINGA, M. T. & WARNER, T. T. (1999) Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event. *Journal of applied meteorology,* 38**,** 385-404.

23. WOLFRAM, S. (2010) *Wolfram Research.* [citado: 2 de febrero de 2010]; Disponible en: www.wolfram.com.

24. ZOTTI, G. (2007) Measuring Light Pollution with a Calibrated High Dynamic Range All-Sky Image Acquisition System. IN IDA (Ed.) *DARKSKY 2007: 7th European Symposium for the Protection of the Night Sky.* Bled, Slovenia.

Quinta Parte

Bibliografía y anexos

BIBLIOGRAFÍA

1. ABRAMOWITZ & STEGUN (2006) Handbook of Mathematical Functions. IN UCLA (Ed.).

2. ALBERS, S. & DURISCOE, D. (2001) Modelling light pollution from population data and implications for national park service lands. *George Wright Forum*, 18**,** 56-68.

3. ANGSTRÖM, A. (1961) Radiation to Actinometric Receivers in Its Dependence on Aperture Conditions. *Tellus*, 13**,** 425 - 431.

4. ANON. (1993) Declaration on the reduction of adverse environmental impacts on Astronomy. IN IAU (Ed.) *IAU/COSPAR/ICSU/UNESCO Meeting, Adverse environmental impacts on Astronomy: an esposition.* Paris.

5. ANON. (1995) *Urban Ecology, Living and working in harmony with the environment,* Bonn, Bundesministerium fur raumordnung, Bauwesen und stadtebau.

6. ANON. (1999) Night lights affect visual performance. Intermediair

7. ANON. (2004) Recomendaciones para la iluminación de instalaciones de exteriores o en recintos abiertos. . San Cristobal de la Laguna., Instituto de Astrofísica de Canarias.

8. ANTARAMIÁN, E. (2002) Contaminación de luz en Michoacan (Campaña para cielos oscuros). *Investigaciones geográficas UNAM,* 45**,** 77-85.

9. AUBÉ, M., FRANCHOMME-FOSSÉ, L., ROBERT-STAEHLER, P. & HOULE, V. (2005) Light Pollution Modelling and detection in a heterogeneous environment: Toward a night time aerosol optical depth retrieval. IN SPIE (Ed.) *SPIE2005.*

10. BADDILEY (2002) Skyglowmodelling. London, BAA.

11. BADDILEY, C. J. (2004) Light pollution in UK. . *British Astronomical Association, Campaign for Dark Skies.*

12. BADDILEY (2007) A model to show the differences in skyglow from types of luminaire designs, with a view to recovering rural dark skies. IN MARÍN, C. & JAFARI, J. (Eds.) *Starlight – A common heritage.International Conference in Defence of the Quality of the Night Sky and the Right to Observe the Stars.* Las Palmas de Gran Canaria, España.

13. BAKER, B. J. & RICHARDSON, J. M. L. (2006) The effect of artificial light on male breeding-season behaviour in green frogs, Rana clamitans melanota. *Canadian Journal of Zoology,* 84**,** 1528-1532.

14. BARUCH, J. E. F. (1998) Public Education to Preserve Dark Skies and Astronomical Windows with Eavesdropping and Robotic Telescopes. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

15. BELYAKOV, G. F., BAGDASAROV, A. A., KUZ'MINA, T. A. & BAGDASAROVA, O. V. (2005) A study and evaluation of the light distribution in the image plane of superwide-angle objectives for minivideo cameras with CCD arrays. *Journal of Optical Technology,* 72**,** 245-251.

16. BENN, C., R. & ELLISON, S. L. (1999) LA Palma Night-Sky Brightness. *New Astronomy Reviews,* 42**,** 503-507.

17. BERRY, R. L. (1976) Light pollution in Southern Ontario. *The journal of the royal astronomical society of Canada,* 70**,** 3.

18. BESSEL, M. S. (1990) UBVRI passbands. *The Astronomical Society of the Pacific, Publications* 102**,** 1181.

19. BIRD, B. L., BRANCH, C. L. & MILLER, D. L. (2003) Effects of coastal lighting on foraging behavior of beach mice. *Conservation Biology,* 18**,** 1435–1439.

20. BLANCO, C. (1994) Bill on Outdoor Lighting Pollution Introduced by the Italian Astronomical Society to the National Government. IN MCNALLY., D. (Ed.) *The vanishing universe: adverse environmental impacts on astronomy, Unesco.* Paris, France.

21. BRENNAN, D. (1994) The Edinburgh lighting vision (summary). IN SCHREUDER, D. A. (Ed.) *Urban sky glow, a worry for astronomy. CIE.* Viena, Austria.

22. BRUCATO, R. (1991) Sky preservation at Palomar Observatory. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 20.

23. BRUDERER, B., PETER, D. & STEURI, T. (1999) Behaviour of migrating birds exposed to x-band radar and a bright light beam. *Journal of Experimental Biology,* 202**,** 1015-1022.

24. BRUNI, D. (1993) City light pollution: its effect on astronomy. *I.A.P.P.P. Communications,* 53**,** 1-8.

25. CALTECH (2009) *Caltech astronomy* [citado: 4 de enero de 2009]; Disponible en: www.astro.caltech.edu.

26. CARRASCO, B. E., CARRAMINANA, A., SANCHEZ-SESMA, F. J. & LERMO, F. J. (1998) Protection of the Observatorio Astrofisico Guillermo Haro. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

27. CHALKIAS, C., PETRAKIS, M., PSILOGLOU, B. & LIANOU, M. (2006) Modeling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS. *Journal of Environmental Management,* 79**,** 57-63.

28. CHIARA, A. (2003) Sistemi di illuminazione naturale e artificiale e loro integrazione ai fini del comfort visivo e del risparmio energetico. *Università degli Studi di Napoli "Federico II".*

29. CHALKIAS, C. & KALOGIROU, S. (2007) Estimating Light Pollution in Suburban Areas with complex Topography. IN NUI (Ed.) *9th International Conference on Geocomputation.* National University of Ireland, Maynooth.

30. CHESTER, J. (1991) The impact of light pollution on amateur astronomy and public awareness of the night sky. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 109.

31. CINZANO, P. (1993) References on Light Pollution and Related Fields. Padova, Department of Astronomy, University of Padova

32. CINZANO, P., FALCHI, F. & ELVIDGE, C. D. (2001) The first world atlas of the artificial night sky brightness. Padova, Department of Astronomy, University of Padova.

33. CINZANO, P. (2002) Light pollution by luminaires in roadway lighting, . Padova, Department of Astronomy, University of Padova.

34. CINZANO, P. (2003) A laboratory for the photometry and radiometry of light pollution. *Memorie della Società Astronomica Italiana,* 3**,** 312-315.

35. CINZANO, P. (2004) Modelling light pollution from searchlights. Padova, Dipartimento di astronomia, universita di Padova, Istituto di scienza e tecnologia dell'Inquinamento luminoso.

36. CINZANO, P., FALCHI, F. & ELVIDGE, C. D. (2007) Recent progresses on a second world atlas of the night-sky brightness. Padova, Dipartimento di astronomia, Universita` di Padova.

37. COCKS, T., JENSSEN, T., STEWARD, A., WILSON, I. & SCHIELDS, T. (1999) The hymap airborne hyperspectral sensor: The system, calibration and performance. IN EARSEL (Ed.) *Workshop on Imaging Spectroscopy.* Zurich.

38. CONNER, D. (2001) Light pollution. *Leicester Mercury.* Leicester, Daily Mail.

39. CORDELL, F. M. (1993) Fun with lasers or street lamps I have known and hated. *I.A.P.P.P. Communications,* 51**,** 20-24.

40. COSTERO, R. (1991) Light Pollution at the Astronomical Observatories in Mexico. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 45.

41. CRAWFORD, D. L. & HUNTER, T. B. (1990) The battle against Light Pollution. *Sky and Telescope,* 1**,** 23-29.

42. CRAWFORD, D. L. (1991) Light Pollution-A problem for Us All *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 7-10.

43. CRAWFORD, D. L. (1994) Light Pollution: Theft of the night. IN IAU (Ed.) *IAU/COSPAR/ICSU/UNESCO Meeting, Adverse environmental impacts on Astronomy: an esposition.* Paris.

44. CRAWFORD, D. L. (1998) Light Pollution: The Problem, the Solutions. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

45. CUNNAN, J. M. L. (1991) The effect of public lighting on sky glow. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 77.

46. DAVIS, S., MIRICK, D. K. & STEVENS, R. G. (2001) Night shift work, light at night, and risk of breast cancer. *Journal of the national cancer institute,* 93**,** 1557-1562.

47. DI SORA, M. (1993) Light Pollution, problems and propositions (from Italy a resolutive participation). *Memorie della Società Astronomica Italiana,* 64**,** 173-177.

48. DOLSA, A. G. & ALBARRÁN, M. T. (1998) La problemática de la contaminación lumínica en la conservación de la biodiversidad. Barcelona, Departament de medi ambient, Generalitat de Catalunya.

49. ELVEY, C. T. & ROACH, F. E. (1937) A photoelectric study of the light from the night sky. *The Astrophysical Journal* 85**,** 213-241.

50. FERNÁNDEZ, D. (2000) Pilot program on the evaluation and reduction of light pollution in Catalonia. Barcelona, Universitat de Barcelona.

51. FERNÁNDEZ, D. (2001) La contaminación lumínica en Cataluña. Barcelona, Departament d'astronomia i meteorologia, Universitat de Barcelona.

52. FLETCHER, J. M. & CRAMPTON, D. (1973) An astronomical view of high-pressure sodium lamps. *Publications of the ASP,* 85**,** 1-3.

53. GAI, M., CAROLLO, D., DELBÒ, M., LATTANZI, M. G., MASSONE, G., BERTINETTO, F., MANA, G. & CESARE, S. (2001) Location accuracy limitations for CCD cameras. *Astronomy & Astrophysics* 367**,** 362-370.

54. GAL, G., LOEW, E. R., RUDSTAM, L. G. & MOHAMMADIAN, A. M. (1999) Light and diel vertical migration: spectral sensitivity and light avoidance by Mysis relicta. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,* 56**,** 311-322.

55. GÁMEZ, I. (2002) Análisis de viabilidad técnica del desarrollo de un sistema de medición lumínica. *Departamento de Ingeniería industrial.* Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya. .

56. GARCÍA GIL, M. & SOLANO LAMPHAR, H. A. (2010) Quantification and assessment of the energy waste due to obstructive light, research methodology and analysis. IN CIE (Ed.) *"Lighting Quality & Energy Efficiency" CIE2010.* Viena.

57. GARSTANG, R. H. (1984) Improved scattering formula for calculations of artificial night-sky illumination. *The Observatory,* 104**,** 196-197.

58. GARSTANG, R. H. (1984) Model for Artificial Night-Sky Illumination. *Bulletin of the American Astronomical Society,* 16**,** 904.

59. GARSTANG, R. H. (1985) Brightness of the Denver night sky glow by comparison with moonlight. *Announcer, American Association of Physics Teachers,* 15**,** 54.

60. GARSTANG, R. H. (1985) Visibility of stars in daylight. *Journal of the British Astronomical Association,* 95**,** 133.

61. GARSTANG, R. H. (1986) Model for artificial night-sky illumination. *Publications of the ASP,* 98**,** 364-375.

62. GARSTANG, R. H. (1988) Predictions of seasonal variations in night sky brightnesses. *The Observatory*, 108**,** 159-161.

63. GARSTANG, R. H. (1991) Light Pollution Modeling. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series*, 17**,** 56-69.

64. GARSTANG, R. H. (1992) Further light pollution calculations. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 24**,** 740.

65. GARSTANG, R. H. (1993) Light pollution and lighting technology. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 25**,** 1306.

66. GARSTANG, R. H. (2001) Night-time Brightness of Clouds over a City. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 33**,** 786.

67. GARSTANG, R. H. (2006) Brightness of Clouds at Night over a City *Bulletin of the American Astronomical Society*, 38.

68. GÓMEZ, J. (2004) Desarrollo de un nuevo modelo de visión del color basado en la fisiología del sistema visual. *Departamento de Óptica.* Universitat de Valencia.

69. GREEN, D. W. E. (1992) Magnitude corrections for atmospheric extinction. *International Comet Quarterly*, 14**,** 55-59.

70. GREEN, D. W. E. (1997) Some additional Thoughts on light pollution. *The Observatory*, 117**,** 229-231.

71. GREEN, D. W. E. (1998) Astronomers and light pollution. *Sky and Telescope*, 95**,** 10-11.

72. GRIFFIN, D. M. (1998) Light pollution: Efforts to bring back the night sky. Islas Virgenes, EUA, Department of planning and natural resources. Division of fish and wildlife light pollution.

73. GRIFT, B. H. & BOMERS, C. T. M. (1992) Assimilation lighting. Leidschendam, Ministerie van VROM, Bureau Adviseur Beroepen Milieubeheer.

74. HÄNEL, A. (2002) The situation of light pollution in Germany. Alemania, Museum am Schölerberg, natur und umwelt planetarium.

75. HAYES, D. S. & LATHAM, D. W. (1975) A rediscussion of the atmospheric extinction and the absolute spectral-energy distribution of VEGA. *Astrophysical Journal*, 197**,** 593-601.

76. HENDRY, A. (1984) Light Pollution: a status report. *Sky and Telescope,* 67**,** 504-507.

77. HERRANZ, C. (2007) Por una nueva cultura de la luz. *Revista profesiones,* 110**,** 54-55.

78. HERRANZ, C. (2002) El impacto ambiental de la iluminación nocturna artificial. *Gorosti,* 17**,** 27-44.

79. HOAG, A. A. (1972) Observatories and City Lights - One city Fights light Pollution. *Mercury,* 1**,** 2-3.

80. HOAG, A. A. (1976) City sky-glow monitoring at Kitt Peak.II. *Publications of the ASP,* 88**,** 207-208.

81. HOAG, A. A. (1985) Identification and protection of existing and potential observatory sites. International astronomical union.

82. HOAG, A. A. (1986) Identification and protection of existing and potential observatory sites. *XIX General Assembly of the International Astronomical Union.* New Delhi, India.

83. HOLLAN, J. (2002) Light pollution quantification. Brno, N. Copernicus Observatory and Planetarium in Brno.

84. HOLMES, R. W. (1997) The purpose of road lighting. *The Observatory*, 117**,** 25-30.

85. HORTS, F. P. (2001) ¿Quién nos ha robado la vía láctea? El problema de la contaminación lumínica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra,* 7**,** 2.

86. HOUGHTON, J. T. (2002) *The physics of atmosphere,* Londres, Cambridge university press.

87. HUNTER, T. & CRAWFORD, D. (1991) The economics of light pollution. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 89-96.

88. IAC (2002) Resumen de recomendaciones para la iluminación de instalaciones de exteriores o en recintos abiertos. San cristóbal de la laguna.

89. IDA. (2007) *The International Dark-Sky Association*. [citado: 12 de abril de 2007]; Disponible en: www.darksky.org.

90. IIZUKA, T. & ISOBE, S. (1998) A comparison of night sky brightness under ordinary urban lighting and during light-down periods in Kyoto City. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

91. IRWIN, J. & BRIDGES, T. (2007) Preserving the Starry Sky. Ontario, Canada, Deptartment of Physics, Engineering Physics, & Astronomy, Queen's University.

92. ISOBE, S. & KOSAI, H. (1998) Star Watching Observations to measure Night Sky Brightness. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

93. JIANG, S. Y. (1991) Environmental Conditions of Chinese Astronomical Observatories: past, present and future. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 33.

94. JOSEPH, J. H., KAUFMAN, Y. J. & MEKLER, Y. (1991) Urban light pollution: the effect of atmospheric aerosols on astronomical observations at night. *Applied optics,* 30**,** 3047-3058.

95. KALINOWSKI, J. K., ROOSEN, R. G. & BRANDT, J. C. (1995) The night sky brightness at McDonald Observatory. *Publications of the ASP,* 87**,** 869-876.

96. KASTEN, F. & YOUNG, A. T. (1989) Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied optics,* 28**,** 4735–4738.

97. KAWAKAMI, K. & ISOBE, S. (1998) A Study of Luminous Intensity Distributions of Lighting Lamps. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving the Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

98. KEYHOLE INC (2006) Google Earth versión 4.x.

99. KOCIFAJ, M. (2007) Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Applied optics,* 15**,** 3013-3022.

100. KOVALEVSKY, J. (1998) Environmental Disturbances of Astronomical Observations. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving The Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

101. KRISCIUNAS, K. & SCHAEFER, B. E. (1991) A model of the brightness of moonlight. *Publications of the ASP,* 103**,** 1033-1039.

102. LABOY, V. M. (2007) El problema de la contaminación lumínica. Quebradillas, Puerto Rico, Escuela superior Juan de Arizmendi.

103. LARKIN, R. P. & SZAFONI, R. E. (2008) Evidence for widely dispersed birds migrating together at night. *Integrative and Comparative Biology,* 48**,** 40-49.

104. LAURIN, P. (1996) *Photonics*. [citado: 17 de noviembre de 2006]; Disponible en: www.photonics.com.

105. LENOBLE, J. (1985) *Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures*, A. Deepak Publishing.

106. LEWIS, R. A. (1991) Light Pollution: "light" at the end of the tunnel? *Astronomy Now,* 4**,** 175.

107. LINDLEY, D. (1998) Keeping astronomers in the dark. *Nature,* 331**,** 205.

108. LMT. (2009) *LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin.* [citado : 6 de noviembre de 2006]; Available Disponible en: www.lmt-berlin.de.

109. LONGCORE, T. & RICH, C. (2004) Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environmen,* 2**,** 191-198.

110. LOUISTISSERAND, S., BÜCHER, A., KOUTCHMY, S. & LAMY, P. (1987) Night sky optical spectrum from a high altitude observatory. *Astronomy & Astrophysics Supplement Series,* 68**,** 539-543.

111. LUMETRIX. (2006) *Lumetrix.* [citado: 22 de septiembre de 2006]; Disponible en: www.lumetrix.com.

112. MADRID, J. A. (2009) Contaminación lumínica y salud humana, luz y cronodisrupción. *1ra jornada sobre contaminación lumínica en la región de Murcia.* Murcia, España.

113. MARTÍNEZ, M. (2001) Diseño de un colorímetro triestímulo a partir de una cámara CCD-RGB. *Departamento de óptica y optometría.* Barcelona, Universitat Politècnica de Cataluña.

114. MASSEY, P., GRONWALL, C. & PILACHOWSKI, C. A. (1990) The spectrum of the Kitt Peak Night Sky. *Publications of the ASP,* 102**,** 1046-1051.

115. MATTILA, K., VÄSÄINEN, P. & APPEN-SCHNUR, G. F. O. V. (1996) Sky brightness at the ESO La Silla Observatory 1978 to 1988, . *astronomy & Astrophysics Supplement Series,* 119**,** 153-170.

116. METEORED. (2007) *Página electrónica de Meteored.* [citado: 19 de mayo de 2007]; Disponible en: www.meteored.com.

117. MICROSOFT (2007) Microsoft Office 2007.

118. MINITAB INC (2007) Minitab Statistical Software.

119. MITCHELL, A. C., WALL, J. E., MURRAY, J. G. & MORGAN, C. G. (2002) Direct modulation of the effective sensitivity of a CCD detector: a new approach to time-resolved fluorescence imaging. *Journal of Microscopy,* 206**,** 225 - 232.

120. MOHAN, V., UDDIN, W., SAGAR, R. & GUPTA, S. K. (1999) Atmospheric extinction at Devasthal, Naini Tal. *Bulletin of the Astronomical Society of India,* 27**,** 601.

121. MOORE, M. V., PIERCE, S. M., WALSH, H. M., KVALVIK, S. K. & LIM, J. D. (2000) Urban light pollution alters the diel vertical migration of Daphnia. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie,* 27**,** 1-4.

122. MURDIN, P. & SANCHEZ, F. (1987) Protection of the observatories of the Canary Islands. *Identification, optimization, and protection of optical telescope sites***,** 203-206.

123. MURDIN, P. (1992) Protection of observatories: the legal avenues. *The protection of astronomical and geophysical sites***,** 159-207.

124. MURDIN, P. (1994) The Aims of Astronomy in Science and the Humanities: Why Astronomy Must Be Protected. IN IAU (Ed.) *IAU/COSPAR/ICSU/UNESCO Meeting, Adverse environmental impacts on Astronomy: an esposition.* Paris.

125. MUSKOKA HERITAGE FOUNDATION. (2008) *Ecology of the night.* [citado: 3 de julio de 2008]; Disponible en: www.muskokaheritage.org/ecology-night/.

126. NARISADA, K. & SCHREUDER, D. (2004) *Light pollution hand book,* Springer.

127. NAWAR, S., MORCOS, A. B., METWALLY, Z. & OSMAN, A. I. I. (1998) Light Pollution and Night Sky Brightness over the Entire Sky at Kottamia Observatory Site. IN SYUZO, I. & H., T. (Eds.) *Preserving the Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

128. NCBI. (2006) *The National Center for Biotechnology Information.* [citado: 4 de octubre de 2006 a 13 de octubre de 2006]; Disponible en: www.ncbi.nlm.nih.gov.

129. NIXON, D. (2009) *Light pollution Simulator*. [citado: 8 de diciembre de 2009]; Disponible en: www.need-less.org.

130. NRAO (2009) *National Radio Astronomy Observatory*. [citado: 7 de ocrubre de 2008]; Disponible en: www.nrao.edu/.

131. OPTE-E-MA. (2006) *OPTE-E-MA Engineering GmbH.* [citado: 8 de octubre de 2006 a 12 de abril de 2007]; Disponible en: www.opteema.de.

132. ORELLANA, D. (2006) Determinación de la contaminación lumínica de los cielos de la Serena y Coquimbo. La Serena, Chile, Red de estudiantes de la serena.

133. OSTERBROCK, D. E., WALKER, M. F. & KOSKI, A. T. (1976) The spectrum of light pollution at Mount Hamilton. *Publications of the ASP,* 88**,** 349-352.

134. OSTERBROCK, D. E. & MARTEL, A. (1992) Sky spectra at a light-polluted site and the use of atomic and OH sky emission lines for wavelength calibration. *The Astronomical Society of the Pacific, Publications* 104**,** 76-82.

135. PERCY, J. R. (1998) Preserving the Astronomical Windows by/for Education and Culture. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving the Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

136. PHOTO RESEARCH (2006) *Photo Research, Inc*. [citado: 7 de agosto de 2006 a 18 de abril de 2007]; Disponible en: www.photoresearch.com.

137. PIKE, R. (1976) A Simple Computer Model for the Growth of Light Pollution. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada,* 70**,** 116-126.

138. PRAHL, S. A. (1988) Light Transport in Tissue. Texas, EUA, University of Texas at Austin.

139. PUKKALA, E., OJAMO, M., RUDANKO, S. L., STEVENS, R. G. & VERKASALO, P. K. (2006) Does Incidence of Breast Cancer and Prostate Cancer Decrease with Increasing Degree of Visual Impairment. *Cancer Causes Control,* 17**,** 573–576.

140. QUERCI, F. R. & QUERCI, M. (1998) A Method for Searching Potential Observing Sites. IN SYUZO, I. & TOMOHIRO, H. (Eds.) *Preserving the Astronomical Windows, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union.* Kyoto, Japan.

141. RADIANT IMAGING. (2007) *Radian imaging, Inc.* [citado: 7 de octubre de 2006 a 9 de mayo de 2007]; Disponible en: www.radiantimaging.com.

142. RAEVEL, P. & LAMIOT, F. (1998) Incidences de l'éclairage artificiel des infrastructures routières sur les milieux naturels Nord-Pas-de-Calais, Francia, Direction environnement, énergie et déchets.

143. RAINE, H., BORG, J. J., RAINE, A., BAIRNER, S. & CARDONA, M. B. (2007) Light pollution and its effect on Yelkouan Shearwaters in Malta; causes and solutions. Malta, Bird Life Malta.

144. RASC (2009) *RASC Kingston Centre - Responsible Lighting*. [citado: 10 de septiembre de 2009]; Disponible en: http://kingston.rasc.ca/Committees/lighting.php.

145. RICH, C. & LONGCORE, T. (2006) *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*, Washington, EUA, Island Press.

146. RIEGEL, K. W. (1973) Light Pollution: Outdoor lighting is a growing threat to astronomy. *Science,* 179**,** 1285 - 1291.

147. ROBINSON, W. T. (1991) Outdoor lighting in Tucson: A photo record *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 18.

148. RODIL, F. (2007) Mapa lumínico del territorio de México. México, UNAM.

149. RODIL, F. (2008) *Fotografía astronómica de Florencio Rodil Posada.* [citado: 2 de febrero de 2010]; Disponible en: http://florencior.fotoastronomia.net/.

150. ROL DE LAMA, A. & MADRID, J. A. (2009) Contaminación lumínica y salud: el lado oscuro de la luz. *1ra jornada sobre contaminación lumínica en la región de Murcia.* Murcia, España.

151. RUBIÑO, M., CRUZ, A., RIVAS, M. J. & HITA, E. (1992) El estereoluminancímetro: Nuevo instrumento para la medición de los ambientes luminosos. . *Optica pura y aplicada,* 25**,** 1-15.

152. SAN MARTÍN, R. (2003) Contaminación lumínica en España. *Revista de la Dirección Conservación de la Energía,* 1**,** 12-14.

153. SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & SOLANO LAMPHAR, 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.

154. SCHAEFER, B. E. (1987) *Sky and Telescope,* 73**,** 426.

155. SCHAEFER, B. E., BULDER, H. J. J. & BOURGEOIS, J. (1992) Lunar occultation visibility. *Icarus,* 100**,** 60-72.

156. SCHERNHAMMER, E. S., LADEN, F., SPEIZER, F. E., WILLETT, W. C., HUNTER, D. J., KAWACHI, I. & COLDITZ, G. A. (2001) Rotating night shifts and risk of breast cancer in women participating in the nurses' health study. *Journal of the national cancer institute,* 93**,** 1563-1568.

157. SCHNEEBERGER, T. J., WORDEN, S. P. & BECKERS, J. M. (1979) The night sky conditions at the Sacramento Peak Observatory. I - Sky brightness. *Publications of the ASP,* 91**,** 530-532.

158. SCHREUDER, D. (1991) Lighting near astronomical observatories. Viena, Austria, CIE, Technical Committee.

159. 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.

160. SIERRA, C. (2002) Aplicaciones luminotécnicas de cámaras digitales. *Departamento de Proyectos de Ingeniería.* Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

161. SMARTDRAW (2009) Smart draw Software.

162. SMITH, F. G. (1982a) Identification and protection of existing and potential observatory sites. *Transactions of the International Astronomical Union,* 18**,** 667.

163. SMITH, F. G. (1982b) Identification and protection of existing and potential observatory sites. IN WEST, R. M. (Ed.) *XVIII General Assembly of the International Astronomical Union* Patras, Grecia.

164. SNL. *Starry Night Lights.* 2009 [citado: 2 de octubre de 2009]; Disponible en: www.starrynightlights.com.

165. SNYDER, D. L., HELSTROM, C. W., LANTERMAN, A. D., FAISAL, M. & WHITE, R. L. (1995) Compensation for readout noise in CCD images. *Journal of the Optical Society of America* 12**,** 272-283.

166. SOLANO LAMPHAR, H. A. (2005a) Ergoftalmología: Análisis de los Factores que Inciden en la Astenopía de los Trabajadores de Inspección Visual en la Industria Electrónica de Ciudad Juárez. *.Division De Estudios de Posgrado e investigacion.* Ciudad Juaréz, ITCJ.

167. SOLANO LAMPHAR, H. A. & REYES MARTÍNEZ, R. M. (2005b) Ergoftalmología: Análisis de los Factores que Inciden en la Astenopía de los Trabajadores de Inspección Visual en la Industria Electrónica de Ciudad Juárez. IN SEMAC (Ed.) *VII Congreso Internacional de Ergonomía. Sociedad de Ergonomistas de México, A.C.* Monterrey, México.

168. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & FERRERO, L. (2008) Contaminación lumínica en espacios naturales (Investigación en el parque natural del delta del

Ebro, primeras conclusiones). IN CEI (Ed.) *XXXIV Simposio nacional de iluminación, Comité español de iluminación.* Las palmas de gran canaria, España.

169. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R., GARCÍA GIL, M. & FERRERO, L. (2009) Contaminación lumínica en espacios naturales (Investigación en el parque natural del delta del Ebro, conclusiones definitivas). IN CEI (Ed.) *XXXV Simposio nacional de iluminación, Comité Español de iluminación.* Pontevedra, España.

170. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2009a) Estudio Sobre Contaminación Lumínica en el Parque Natural del Delta del Ebro. *Ciencia y trabajo,* 34**,** 211-216.

171. SOLANO LAMPHAR, H. A. & SAN MARTÍN PÁRAMO, R. (2009b) Mathematical Model For The Measurement Of Light Pollution. IN DAW (Ed.) *2nd Bhartatiaya Vigyan Sammelan, Devi Ahilya Vishwavidyalaya.* Indore,India.

172. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2010a) Study In Light Pollution At The Natural Park Of Delta DEL EBRO, Spain. IN CIE (Ed.) *"Lighting Quality & Energy Efficiency" CIE2010.* Viena.

173. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2010b) Contaminació lumínica en espais naturals, investigació en el parc natural del delta de l'Ebre. *Revista del col.legi oficial d'Enginyers Industrials de Catalunya.* (En proceso de publicación).

174. SOLANO LAMPHAR, H. A., SAN MARTÍN PÁRAMO, R. & GARCÍA GIL, M. (2010c) Proposal model for the categorization of night sky brightness in natural spaces affected by light pollution. IN CIE (Ed.) *"Lighting Quality & Energy Efficiency" CIE2010* Viena.

175. SPERLING, N. (1991) The disappearance of darkness. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 101-108.

176. STALIN, C. S., ANUPAMA, G. C., SAHU, D. K., PRABHU, T. P., BHATT, B. C., PARIHAR, P. S. & HEGDE, M. (2008) Night sky at the Indian Astronomical Observatory during 2000-2008. *Bulletin of the Astronomical Society of India,* 36**,** 111-127.

177. STOELINGA, M. T. & WARNER, T. T. (1999) Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event. *Journal of applied meteorology,* 38**,** 385-404.

178. STARRYNIGHTLIGHTS. (2006) *Starry Night Lights*. [citado: 12 de noviembre de 2006]; Disponible en: www.starrynightlights.com.

179. STROBEL, N. (2010) *Astronomy Notes.* [citado: 5 de diciembre de 2009]; Disponible en: www.astronomynotes.com.

180. SULLIVAN, W. T. (1991) Earth at Night: An image of the Nighttime Earth Based on Cloud-free Satellite Photographs. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 11-17.

181. TANNER, A. (1991) Light Trespass. *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris, ASP Conference Series,* 17**,** 85-88.

182. TAVOOSI, H., DARVISHZADEH, R., SHAKIBA, A. & MIRBAGHERI, B. (2009) modelling light pollution in suburbs using remote sensing and gis *The seventh International Conference on Urban Climate.* Yokohama, Japan.

183. TECHNOTEAM. (2007) *TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH.* [citado: 5 de septiembre de 2006 a 19 de abril de 2007]; Disponible en: www.technoteam.de.

184. THOMAS, R. W. L., MODALI, S. B. & ROOSEN, R. G. (1973) Estimates of the light pollution effect for realistic atmospheres. *Bulletin of the American Astronomical Society,* 5**,** 391.

185. THOMSON REUTERS (2009) EndNote X3.0.1 para Windows.

186. TREANOR, P. J. & SALPETER, E. (1972) A Portable Night-Sky Photometer. *The Observatory,* 92**,** 96-99.

187. TREANOR, P. J. (1973) A simple propagation law for artificial night-sky illumination. *The Observatory,* 93**,** 117-120.

188. TREANOR, P. J. (1974) Artificial night sky brightness in Italy. Padova, OAN.

189. TRITTON, K. P. (1997) Astronomical Requirements for limiting lighting pollution. *The Observatory,* 117**,** 10.

190. UNIHEDRON. (2007) *Unihedron.* [citado: 22 de mayo de 2007]; Disponible en: www.unihedron.com.

191. UPGREN, A. R. (1992) Night sky brightness from visual observations II. A visual photometer. *The Journal of the American Association of Variable Star Observers,* 20**,** 244-247.

192. UPGREN, A. R. (1996) Dissecting light pollution. *Sky and Telescope,* 92**,** 44-46.

193. VAN BERGEM-JANSEN, P. M., VOS, J. & ALFERDINCK, J. W. A. M. (1996) Nuisance from tennis-court Lighting experienced by surrounding residents. Amsterdam, Holanda, Nr TM.

194. VAN DER BERGH, S. (1987) Identification and protection of existing and potential observatory sites, International astronomical union.

195. VAN DER BERGH, S. (1988) Identification and protection of existing and potential observatory sites. IN MCNALLY, D. (Ed.) *XX General Assembly of the International Astronomical Union.* Baltimore, EUA.

196. VAN TIGGELEN, B. A. (1992) Multiple scattering and localization of light. Amsterdam, Holanda, University of Amsterdam.

197. VARELA, A. M., MUÑOZ-TUÑÓN, C., FUENSALIDA, J. J., GARCÍA-LORENZO, B. & EFF-DARWICH, A. (2005) Calima anticiclónica y mar de nubes: implicaciones en los observatorios de canarias. *XI Congreso nacional de teledetección.* Tenerife, España.

198. VISTA (2007) *Vista Electronics, Inc.* [citado: 16 de noviembre de 2007]; Disponible en: www.vistaelectronics.com.

199. WALKER, C. et al (2003) Determinación de la Contaminación Lumínica en el cielo de Tucsón, Arizona. Tucson, EUA, Departamento de ciencias de la preparatoria Tucson high, La secundaria vail y el programa de educación de NOAO.

200. WALKER, M. F. (1970) Light pollution model. *Publications of the ASP,* 82**,** 672.

201. WALKER, M. F. (1973) Light pollution in California and Arizona *Publications of the ASP,* 85**,** 508-519.

202. WALKER, M. F. (1976) Identification and protection of existing and potential observatory sites. International astronomical union.

203. WALKER, M. F. (1977a) Identification and protection of existing and potential observatory sites. IN MULLER, E. A. & JAPPEL, A. (Eds.) *XVI General Assembly of the International Astronomical Union.* Grenoble, Francia.

204. WALKER, M. F. (1977b) The effects of urban lighting on the brightness of the night sky. *Publications of the ASP*, 89**,** 405-409.

205. WALKER, M. F. & CAYREL, R. (1979) Identification and protection of existing and potential observatory sites. International astronomical union.

206. WALKER, M. F. (1984) High quality astronomical sites around the world. IN ARDEBERG, A. & WOLTIER, L. (Eds.) *Site Testing for Future Large Telescopes.* La silla, Chile.

207. WIENOLD, J. & CHRISTOFFERSEN, J. (2006) Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings* 38**,** 743-757

208. WOLFRAM, S. (2009) Wolfram Research: Mathematica, Technical and Scientific Software.

209. WOLFRAM, S. (2010) *Wolfram Research*. [citado: 2 de febrero de 2010]; Disponible en: www.wolfram.com.

210. World Wildlife Fund (2010). *My earth hour*. [citado: 2 de abril de 2010]; Disponible en: www.myearthhour.org.

211. WU, C.-H. & ANDERSON, J. M. M. (1997) Novel deblurring algorithms for images captured with CCD cameras. *Journal of the Optical Society of America,* 14**,** 1421-1430.

212. XU, G. (2007) Double-layer film structure filming glass without light pollution. Guangzhou, China, Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences.

213. ZOTTI, G. (2007) Measuring Light Pollution with a Calibrated High Dynamic Range All-Sky Image Acquisition System. IN IDA (Ed.) *DARKSKY 2007: 7th European Symposium for the Protection of the Night Sky.* Bled, Slovenia.

ANEXOS

ANEXO I Formato de encuesta sobre alumbrado público

ANEXO II Estudi sobre la influència de la claror nocturna al Parc Natural del Delta de l'Ebre

ANEXO III Estudio sobre la influencia de la contaminación lumínica en el área del Mar de Cortez

ANEXO IV Estudi sobre la influència de la claror nocturna al Val d'Aran

ANEXO V Autorización para el estudio en el parque natural de Delta del Ebro

ANEXO VI Mapa del delta del Ebro utilizando la tipología de colores de cinzano falchi & elvidge

ANEXO VII Selección de mediciones en parque natural del delta del Ebro utilizando luminancímetro

ANEXO VIII Selección de mediciones en parque natural del delta del Ebro utilizando el sqm

ANEXO IX Selección de mediciones en el parque natural del mar de Cortez utilizando el sqm

ANEXO X Selección de mediciones hacia el horizonte, a 20 grados de altitud

ANEXO XI Selección de mediciones hacia el horizonte, a 20 grados de altitud

ANEXO XII Método RAMAL-UPC, metodología de trabajo

ANEXO XIII Poster: Study in light pollution at the natural park of Delta del Ebro, Spain.

ANEXO XIV Poster: Quantification and assessment of the energy waste due to obstructive light

ANEXO XV Poster: Proposal model for the categorization of night sky brightness in natural spaces affected by light pollution

ANEXO XVI Características de los instrumentos utilizados en el desarrollo de la investigación

ANEXO XVII Características del software utilizado en el desarrollo de la investigación

ANEXO XVIIl. Esquema completo del modelo

ANEXO XIX. Nomenclatura de fórmulas

ANEXO XX. Gráfica climatológica perteneciente a la estación de Amposta en Delebre de marzo de 2009

ANEXO I.

Formato de encuesta sobre alumbrado público

ENQUESTA SOBRE ENLLUMENAT PÚBLIC

Sol·licitem la seva COL·LABORACIÓ a malgrat que som conscients del temps i esforços que representa per a vostès.

Tot i això, les dades que sol·licitem són necessàries per poder establir un diagnòstic referit CONTAMINACIÓ LUMÍNICA.

Els resultats del diagnòstic servirà per orientar l'

"Estudi del medi nocturn al parc"

per veure com influeix la variació de la foscor natural del cel, a la vida de la fauna del parc.

Els agrairíem que ens subministressin la màxima informació que puguin disposar fàcilment. Si disposen d'informació en formats diferents als que els hi proposem, nosaltres mateixos efectuaríem la transformació.

De totes formes, si no fos possible donar la informació amb exactitud, una estimació basada a la seva experiència, podria ser de gran ajuda.

Esperem en futurs contactes directes poder aclarir qualsevol dubte o dificultat que pugui presentar-se.

MOLTES GRÀCIES PER LA SEVA COL·LABORACIÓ

ANEXO II.

Estudi sobre la influència de la claror nocturna al Parc Natural del Delta de l'Ebre

DADES GENERALS DEL MUNICIPI

Si us plau contesteu les preguntes amb la major exactitud possible. En l'apartat de tipologia de lluminàries s'adjunten unes fotografies que fan referència a tipus i no a models, ompliu l'enquesta classificant les lluminàries de la vostra població tenint en compte que les característiques constructives siguin similars a les de les fotografies. El més interessant a conèixer és la distribució de llum per sobre de l'horitzontal.

CARACTERÍSTIQUES DE LA POBLACIÓ:

		Exacte	Estimat
- Casc urbà del municipi	1.800.000 m^2		X
- Nombre d'habitants	20.965 Hab.	X	
- Nº habitants en temporada turística	22.000 Hab.		X
- Tipologia de carrers:			
·Carrers d'amplada < 5m	4.5 **%**		X
·Carrers d'amplada >5m i <10m	69 **%**		X
·Carrers d'amplada > 10 m	26.5 **%**		X
- Creixement vegetatiu de la població	4 **%**		X
- Activitats econòmiques principals	Serveis		

CARACTERÍSTIQUES DE LES INSTAL·LACIONS D'ENLLUMENAT PÚBLIC:

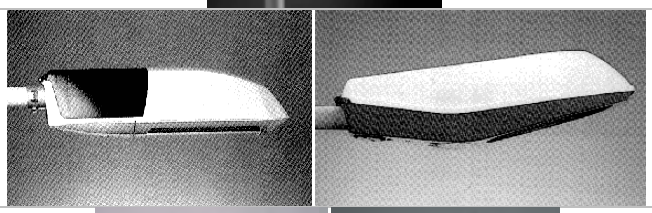
Quadres de Maniobra

		Exacte	Estimat
- Tipus de regulació de funcionament			
· Doble nivell	**30 %**		X
· Apagada alternativa	**0 %**	X	
· Regulador - estabilitzador	**17 %**		X
- quadres amb regulació:	**37 %**		X
- potència total amb regulació	**47 %**		X

Tipologia de Làmpades

		Exacte	Estimat
- làmpades d'incandescència	0 **%**	X	
- potència d'incandescència	0 **%**	X	
- làmpades de Vapor de Mercuri	48%		X
- potència de Vapor de Mercuri	48,70%		X
- làmpades de Vapor de Sodi	45,80%		X
- potència de Vapor de Sodi	47,50%		X
- làmpades de altres tipus	6,20%		X
- potència de altres tipus	3,80%		X
- Total de làmpades instal·lades	3.492		X
- Potència total instal·lada	662385		X

Tipus de lluminàries

Tipus de lluminàries (Exemples)	Descripció	% Instal·lat del total
	Boles sense protecció i similars	6,40
	Boles amb casquet opac	2,68
	Lluminàries ornamentals i similars	2,22
	Lluminàries sense cubeta difusora	11,99
	Lluminàries viaries amb cubeta esfèrica	
	Lluminàries viaries amb cubeta plana	76,11
	Projectors	0.60

ANEXO III.

Estudio sobre la influencia de la contaminación lumínica en el área del Mar de Cortez

DATOS GENERALES DEL MUNICIPIO

Por favor conteste las preguntas con la mayor exactitud posible. En el apartado de tipología de luminarias se adjuntan unas fotografías que hacen referencia a tipos y no a modelos, amplíe la encuesta clasificando las luminarias de su población teniendo en cuenta que les características constructivas sean similares a las de las fotografías. Lo más interesante a conocer es la distribución de luz por sobre la horizontal.

CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN:

		Exacto	Estimado
- Casco urbano del municipio	43 Km^2		X
- Nombre de habitantes	197,000 Hab.		X
- Nº habitantes en temporada turística	212,000 Hab.		X
- Tipología de calles:			
·Calles de ancho < 5m	7 **%**		X
·Calles de ancho >5m i <10m	34 **%**		X
·Calles de ancho > 10 m	59 **%**		X
- Crecimiento vegetativo de la población	5 **%**		X
- Actividades económicas principales	Agricultura, industria, comercio		

CARACTERÍSTICAS DE LES INSTALACIONES DE ALUMBRADO PÚBLICO:

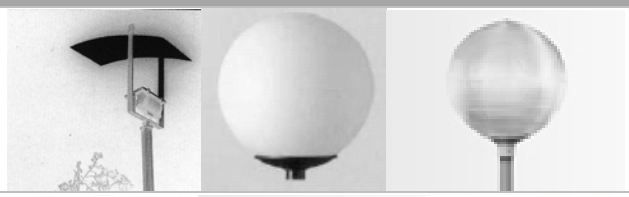
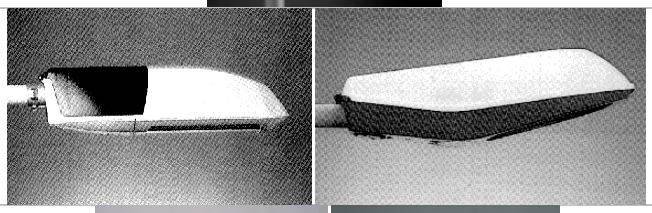
Cuadros de maniobra

		Exacto	Estimado
- Tipos de regulación de funcionamiento			
· Doble nivel	**%**		
· Apagada alternativa	**%**		
· Regulador - estabilizador	**%**		
- cuadros con regulación:	**%**		
- potencia total con regulación	**%**		

Tipología de Lámparas

		Exacte	Estimat
- làmpades d'incandescència	9,5 **%**		
- potència d'incandescència	17 **%**		
- làmpades de Vapor de Mercuri	0 **%**		
- potència de Vapor de Mercuri	0 **%**		
- làmpades de Vapor de Sodi	90,5 **%**		
- potència de Vapor de Sodi	83 **%**		
- làmpades de altres tipus	0 **%**		
- potència de altres tipus	0 **%**		
- Total de làmpades instal·lades	Ns/Nc Nº		
- Potència total instal·lada	1,987,000 kW		

Tipos de luminarias

Tipos de luminarias (Ejemplos)	Descripción	% Instalado del total
	Boles sin protección y similares	4
	Boles con casquete opaco	
	Luminarias ornamentales y similares	3
	Luminarias sin cubeta difusora	
	Luminarias viarias con cubeta esférica	77
	Luminarias viarias con cubeta plana	9
	Proyectores	7

ANEXO IV.

Estudi sobre la influència de la claror nocturna al *Val* d'*Aran*

DADES GENERALS DEL MUNICIPI

Si us plau contesteu les preguntes amb la major exactitud possible. En l'apartat de tipologia de lluminàries s'adjunten unes fotografies que fan referència a tipus i no a models, ompliu l'enquesta classificant les lluminàries de la vostra població tenint en compte que les característiques constructives siguin similars a les de les fotografies. El més interessant a conèixer és la distribució de llum per sobre de l'horitzontal.

CARACTERÍSTIQUES DE LA POBLACIÓ:

		Exacte	Estimat
- Casc urbà del municipi	148,07 m^2		X
- Nombre d'habitants	430 Hab.		X
- Nº habitants en temporada turística	500 Hab.		X
- Tipologia de carrers:			
·Carrers d'amplada < 5m	23 **%**		X
·Carrers d'amplada >5m i <10m	53 **%**		X
·Carrers d'amplada > 10 m	24 **%**		X
- Creixement vegetatiu de la població	3 **%**		X
- Activitats econòmiques principals	Turismo de montaña, Ganadería, explotación forestal		

CARACTERÍSTIQUES DE LES INSTAL·LACIONS D'ENLLUMENAT PÚBLIC:

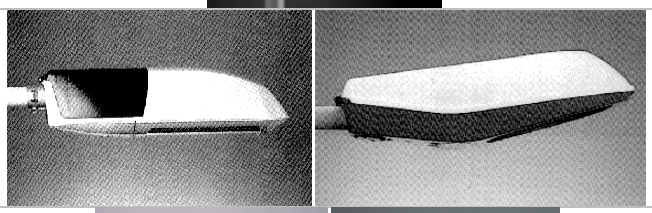
Quadres de Maniobra

		Exacte	Estimat
- Tipus de regulació de funcionament			
· Doble nivell	**%**		
· Apagada alternativa	**%**		
· Regulador - estabilitzador	**%**		
- quadres amb regulació:	**%**		
- potència total amb regulació	**%**		

Tipologia de Làmpades

		Exacte	Estimat
- làmpades d'incandescència	7,4 **%**		X
- potència d'incandescència	9,4 **%**		X
- làmpades de Vapor de Mercuri	14,7 **%**		X
- potència de Vapor de Mercuri	22 **%**		X
- làmpades de Vapor de Sodi	70,6 **%**		X
- potència de Vapor de Sodi	45,2 **%**		X
- làmpades de altres tipus	7,3 **%**		X
- potència de altres tipus	23,4 **%**		X
- Total de làmpades instal·lades	68 Nº		X
- Potència total instal·lada	8525 kW		X

Tipus de lluminàries

Tipus de lluminàries (Exemples)	Descripció	% Instal·lat del total
	Boles sense protecció i similars	2
	Boles amb casquet opac	
	Lluminàries ornamentals i similars	63
	Lluminàries sense cubeta difusora	7
	Lluminàries viaries amb cubeta esfèrica	
	Lluminàries viaries amb cubeta plana	23
	Projectors	5

ANEXO V.

Autorización para el estudio en el parque natural de Delta del Ebro

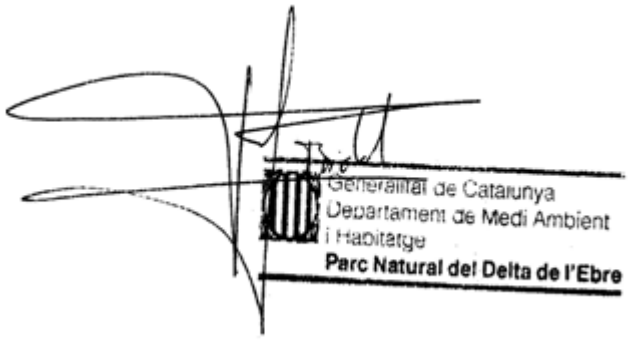
Generalitat de Catalunya
Departament de Medi Ambient i Habitatge
Direcció general del medi natural
Parc natural del Delta de l'Ebre

Francesc Vidal i Esquerré, director del Parc natural del Delta de l'Ebre

AUTORITZO:

Al Senyor Héctor Antonio Solano Lamphar amb DNI X7510394-C de la Universitat Politècnica de Catalunya, a accedir por la nit a tot el Delta, per tal de realitzar el projecte d'investigació "Model per avaluar la variació de condicions nocturnes en espais naturals afectats per la contaminació lluminosa com eina de suport a investigacions en la biodiversitat" del 3 d'octubre de 2007 fins al 15 de maig de 2009.

El director

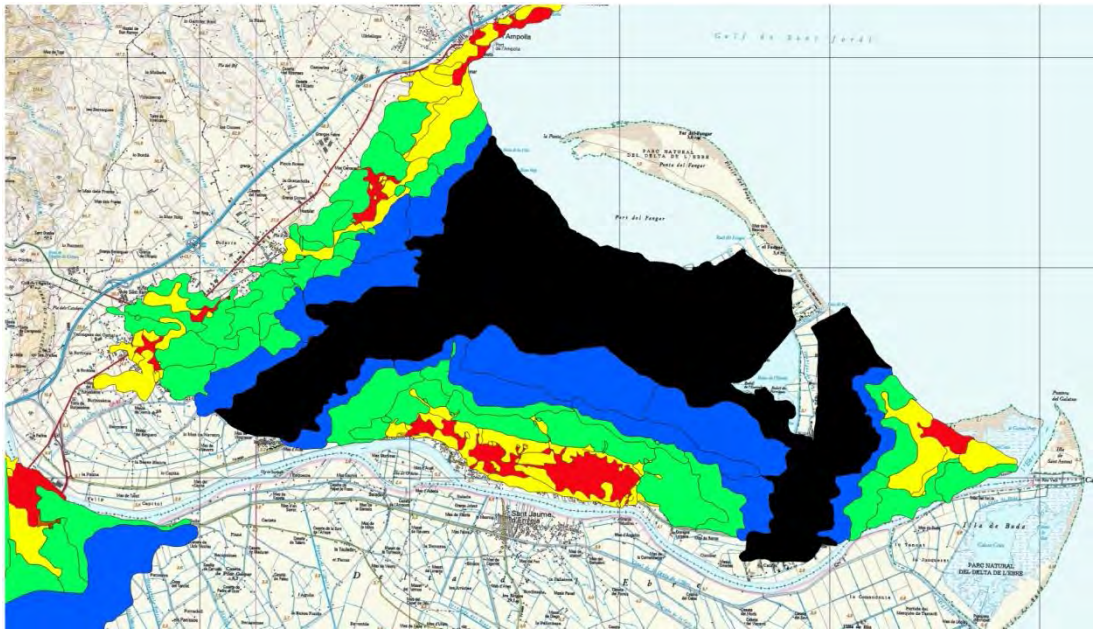


Francesc Vidal i Esquerré

Deltebre, 2 d`octubre de 2007

ANEXO VI.

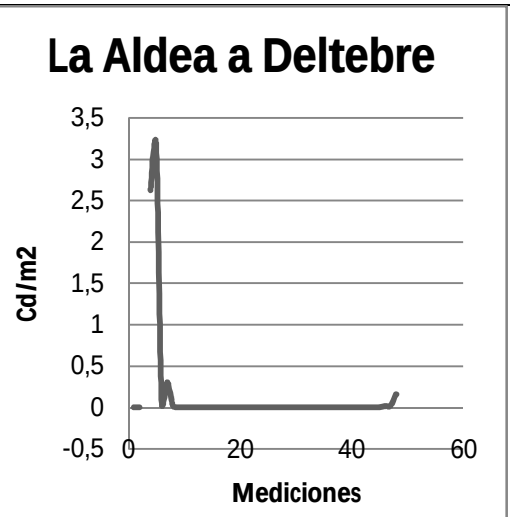
Mapa del delta del Ebro utilizando la tipología de colores de cinzano falchi & elvidge



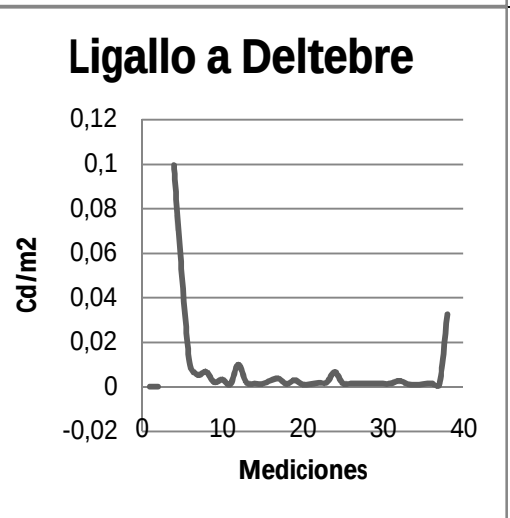
ANEXO VII.

Selección de mediciones en parque natural del delta del Ebro utilizando luminancímetro

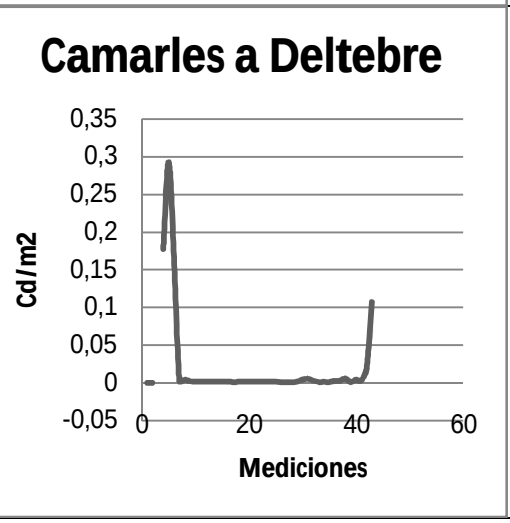
La aldea a Deltebre		
2,625	0,0020375	0,0020375
3,175	0,0019	0,001925
0,0435	0,0019375	0,0011875
0,30375	0,00215	0,0021625
0,02225	0,0018375	0,0021125
0,0025	0,001775	0,002025
0,0020625	0,0020625	0,0018625
0,0015125	0,0019625	0,002125
0,0021375	0,002025	0,0021125
0,00275	0,0021375	0,002275
0,001625	0,0012375	0,0021625
0,001125	0,0019375	0,0021875
0,001775	0,002	0,019
0,001475	0,0021	0,02125
0,001825	0,0019875	0,1625



Lligallo a Deltebre		
0,099625	0,002875	0,0015375
0,05	0,00375	0,0014625
0,0096	0,001275	0,0014
0,005275	0,0030625	0,001525
0,006825	0,0010375	0,002775
0,0020625	0,00125	0,00135
0,0033875	0,0018125	0,0009625
0,0011125	0,002025	0,0013125
0,01	0,00675	0,0016625
0,0020125	0,0015375	0,0010125
0,0013875	0,001525	0,032625
0,0013625	0,001625	



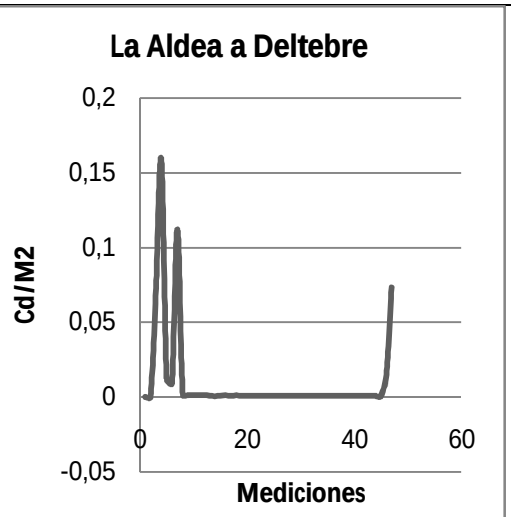
Camarles a Deltebre		
0,1775	0,0015875	0,00305
0,2925	0,00175	0,0012375
0,16625	0,00165	0,0014125
0,00275	0,001525	0,0010875
0,00425	0,0017375	0,002775
0,002125	0,002025	0,002625
0,0015	0,0017625	0,0056625
0,00155	0,0014625	0,0009875
0,00175	0,001	0,0041375
0,001625	0,001125	0,0030375
0,00155	0,0011875	0,019125
0,001375	0,001525	0,10725
0,0018125	0,004125	
0,0009375	0,005525	



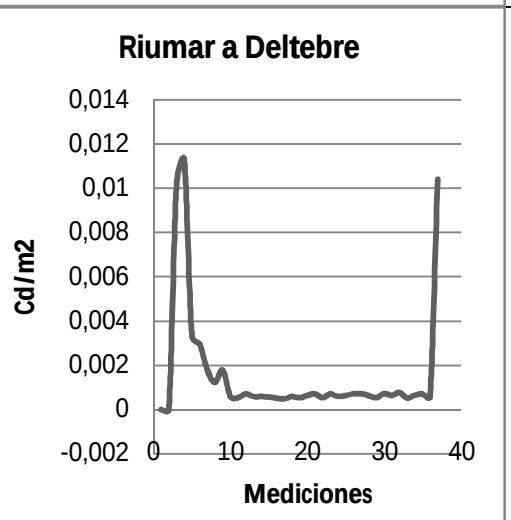
ANEXO VIII.

Selección de mediciones en parque natural del delta del Ebro utilizando el sqm

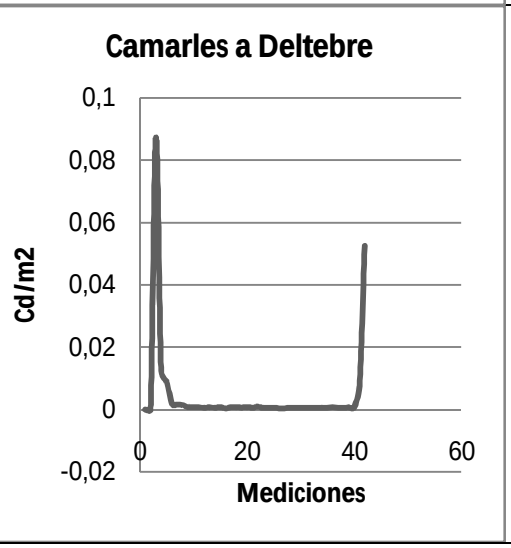
La aldea a Deltebre		
0,07268148	0,00101257	0,00062723
0,15900975	0,00078239	0,00062723
0,01228637	0,00078239	0,00094934
0,00890069	0,00078239	0,00062148
0,11205307	0,00070701	0,00070701
0,00147715	0,00081175	0,00070701
0,00120621	0,00087382	0,00063889
0,00121737	0,00075409	0,000669
0,00122864	0,00074033	0,00063889
0,00122864	0,00068774	0,00063889
0,00081175	0,00079694	0,00065679
0,00057204	0,00079694	0,00068774
0,00081926	0,00084222	0,00068774
0,00102194	0,0006448	0,01504609
0,0008345	0,00070053	0,07335399



Riumar a Deltebre		
0,01021936	0,00057733	0,00071355
0,01130899	0,00052653	0,0006448
0,00332218	0,00048465	0,00053632
0,00297457	0,0005935	0,00072681
0,00179235	0,00053632	0,0006448
0,00122864	0,0006448	0,00077522
0,00179235	0,00071355	0,00052653
0,0005935	0,00053632	0,0006448
0,00054128	0,00071355	0,00071355
0,00071355	0,0005935	0,00058267
0,0005935	0,0006448	0,01040935
0,0005935	0,00071355	



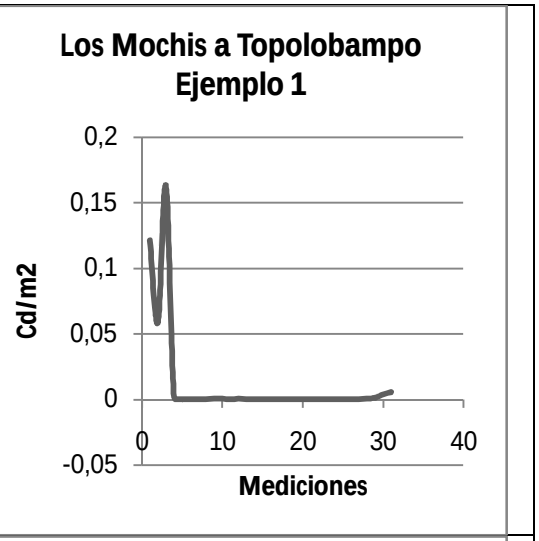
Camarles a Deltebre		
0,08738236	0,00072681	0,00063889
0,01228637	0,00087382	0,00048465
0,00890069	0,00065679	0,00058267
0,00177592	0,00087382	0,00048465
0,00161966	0,0005935	0,00065679
0,0014636	0,00096699	0,00070701
0,00078239	0,00048465	0,0006448
0,00087382	0,00058267	0,0005314
0,00081175	0,00057733	0,00071355
0,00058267	0,00043795	0,00072015
0,00078963	0,0004758	0,00754091
0,0005935	0,0006448	0,05265308
0,00078963	0,00058267	
0,00043795	0,0005935	



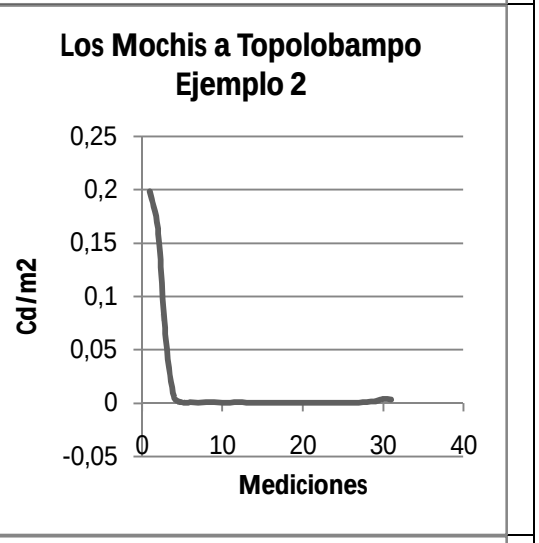
ANEXO IX.

Selección de mediciones en el parque natural del mar de Cortez utilizando el SQM

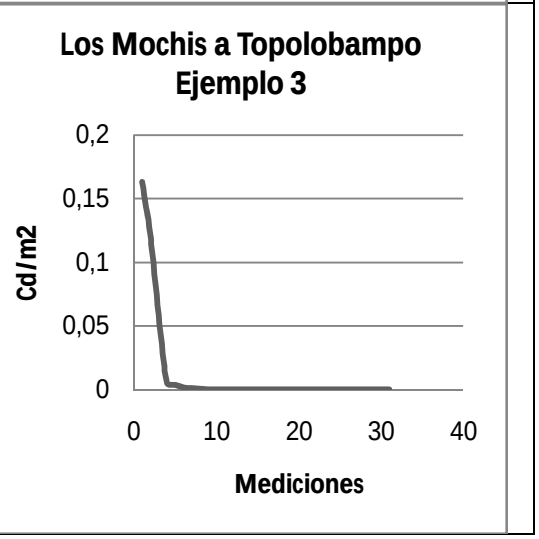
Los Mochis a Topolobampo		
0,12173733	0,00044609	0,0003202
0,05880629	0,00027633	0,00037104
0,16346461	0,00020769	0,00023628
0,00180894	0,0003202	0,00025907
0,00028935	0,00024067	0,00024515
0,00035109	0,0002867	0,00071355
0,00026147	0,00022984	0,00121737
0,00028935	0,00028407	0,00374476
0,00037794	0,0002497	0,00556447
0,00045022	0,00021156	0,0003202
0,00027633	0,00026147	0,00037104



Los Mochis a Topolobampo		
0,19834614	0,00070701	0,00028407
0,16346461	0,00020962	0,00034788
0,05935041	0,00021748	0,00028407
0,00551345	0,0002429	0,0002567
0,0003202	0,00022984	0,00028407
0,00038497	0,00025907	0,00089007
0,00028407	0,00019294	0,00133482
0,00038144	0,0003202	0,00367641
0,00036764	0,00023628	0,00302987
0,00034788	0,00028407	
0,00030299	0,00031727	



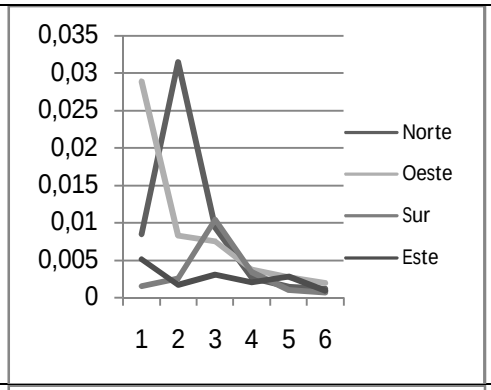
Los Mochis a Topolobampo		
0,16346461	0,00037104	0,00026147
0,12173733	0,00035109	0,00025907
0,05880629	0,0003202	0,0002497
0,00556447	0,0003202	0,00024515
0,00374476	0,00028935	0,00024067
0,00180894	0,00028935	0,00023628
0,00121737	0,0002867	0,00022984
0,00071355	0,00028407	0,00021156
0,00045022	0,00027633	0,00020769
0,00044609	0,00027633	0,00026147
0,00037794	0,00026147	
0,05880629	0,0003202	



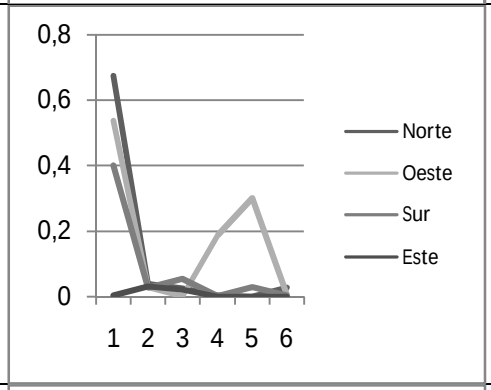
ANEXO X.

Selección de mediciones hacia el horizonte, a 20 grados de altitud

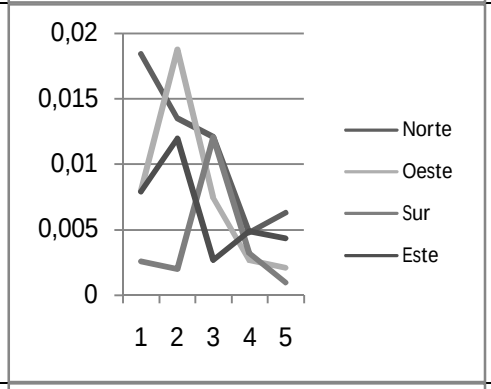
Norte	Oeste	Sur	Este
0,00850009	0,02893502	0,00150461	0,00507486
0,03143574	0,00834495	0,00252013	0,00164977
0,00932017	0,00754091	0,01040935	0,0030579
0,0026389	0,00374476	0,00338395	0,00202034
0,00149082	0,00276327	0,00099409	0,00276327
0,00121737	0,00198346	0,00065679	0,00089007



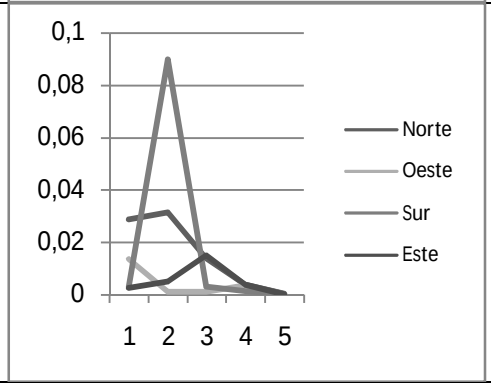
Norte	Oeste	Sur	Este
0,675	0,5375	0,4	0,00375
0,04	0,02875	0,0275	0,03
0,02625	0,00125	0,05375	0,02125
0,00375	0,1875	0,00125	0,000125
0,000375	0,3	0,02875	0,000125
0,0275	0,005	0,00375	0,000125



Norte	Oeste	Sur	Este
0,01842569	0,00796937	0,00259074	0,0078963
0,01347174	0,01876825	0,00198346	0,01195154
0,01206212	0,00740327	0,01206212	0,00268797
0,00475799	0,00268797	0,00323165	0,00489129
0,00627226	0,00209616	0,00097594	0,00433934



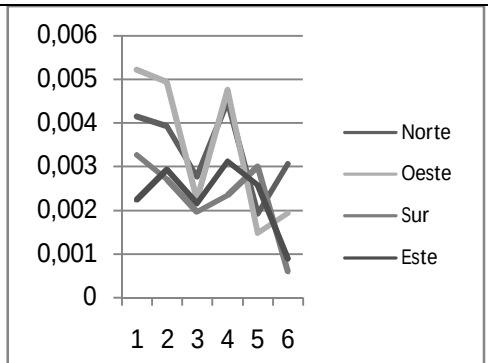
Norte	Oeste	Sur	Este
0,02875	0,01375	0,003	0,0025
0,0315	0,00125	0,09	0,005
0,01375	0,00125	0,003125	0,015
0,00375	0,00375	0,00125	0,00375
0,000375	0,00025	0,000125	0,000125



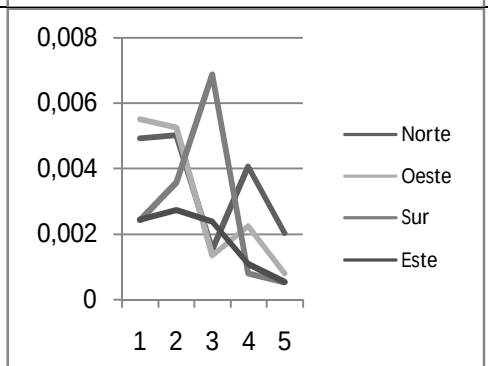
ANEXO XI.

Selección de mediciones hacia el horizonte, a 30 grados de altitud

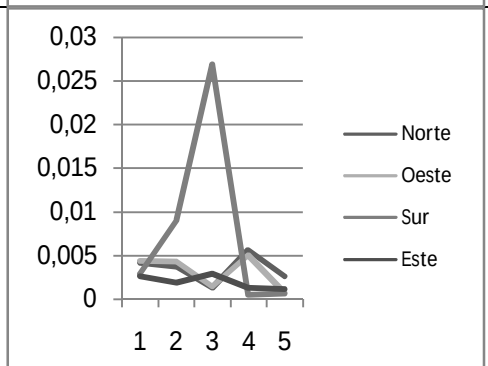
Norte	Oeste	Sur	Este
0,00414403	0,00521704	0,00326155	0,00223575
0,00392124	0,00493655	0,00271284	0,00292028
0,00276327	0,00223575	0,00196528	0,00215488
0,00450218	0,00475799	0,00234112	0,00311475
0,00191171	0,00147715	0,00300209	0,00256699
0,00305790	0,00192941	0,000599	0,00089007



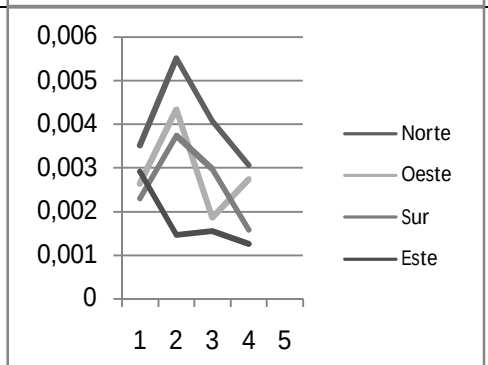
Norte	Oeste	Sur	Este
0,00493655	0,00551345	0,00242898	0,00245145
0,00502833	0,00526531	0,00357622	0,00273794
0,00151853	0,00133482	0,00687739	0,00238465
0,0040684	0,00223575	0,00079694	0,00108999
0,00202034	0,00078963	0,00052653	0,00053632



Norte	Oeste	Sur	Este
0,00414404	0,00437949	0,00292028	0,00261471
0,00367641	0,00429956	0,00898305	0,00185962
0,00127475	0,00141066	0,02687966	0,0028935
0,00561596	0,00507486	0,00046283	0,00128654
0,00259074	0,00068774	0,0005935	0,00115192



Norte	Oeste	Sur	Este
0,00351094	0,0026389	0,00229839	0,00292028
0,00551345	0,00433934	0,00374476	0,0014636
0,0040684	0,00185962	0,00297457	0,00156107
0,0030579	0,00273794	0,00157552	0,00126306



ANEXO XII.

Método RAMAL-UPC, metodología de trabajo

Trabajo de campo

En el método RAMAL-UPC, el trabajo de campo es lo más importante, y de gran relevancia para lograr obtener el máximo de exactitud posible en las simulaciones realizadas (de las que se hablará posteriormente), y que son el núcleo del trabajo. Esta recopilación de datos consiste en recorrer diferentes veces las calles del foco contaminante, tanto durante el día como durante la noche. En esta recogida de datos se utiliza un luxómetro, un luminancímetro y una cámara digital. La metodología para realizar el cálculo es la siguiente:

1. Catalogar las características urbanísticas de la zona de estudio (normalmente calles)

- Tipo de calle: Aquí se determina el uso de la vía que marcará el nivel de iluminación que debería tener. Por esto se ha desarrollado la siguiente tabla, que relaciona un código numérico, con un tipo de vía, y un nivel de iluminación recomendado por el CIE.

Código	Tipo de vía	Iluminación recomendada (lux)
1	Autopista o autovías	15-20
2	Carreteras generales por vías urbanas muy transitadas	15-20
3	Vías de la ciudad de gran tránsito y uso de peatones	15-20
4	Vías urbanas bastante transitadas	10-15
5	Vías urbanas poco transitadas	10
6	Vías en zonas residenciales muy poco transitadas	5-10

- Longitud %[m]: Largo en metros del caso a estudiar.

- Anchura %[m]: Amplitud de la vía pública. Incluye aceras, viales, etc...

- Altura de los edificios %[m]: Altura media de los edificios que delimitan la vía. (casas, oficinas, fábricas...)

- Separación de los edificios con la vía pública %[m]: La separación (normalmente debido a jardines particulares) de la fachada de los edificios con las aceras (o calzada directamente en caso de que no existan), y que aumenten la anchura real del caso a estudiar.

- Tipo de fachada izquierda: Para determinar el factor de reflexión de cada una de las fachadas de las vías, que nos serán de utilidad posteriormente para la simulación, hemos catalogado una serie de casos tipos determinados y analizados en la población, que nos ha resultado con las siguientes relaciones:

Tipo de fachada	Factor de reflexión
No existe	0
Vista abierta	0,2
Gris, estucado	0,3
Suave estucado	0,5
Pintura blanca	0,6
Mabre blanco	0,7

- Tipo de fachada derecha: Igual que la izquierda

- Porcentaje de ocupación: Este parámetro determina que tan ocupada está la vía pública por edificios. Es decir, si por ejemplo estamos a una calle del casco antiguo, normalmente el porcentaje será muy alto pues el espacio está prácticamente ocupado a su totalidad, dando la sensación de una habitación, en la cual el techo es el cielo. Aún así, en una zona residencial de viviendas unifamiliares, debido a la separación entre fachadas, jardines, etc., el porcentaje será más bajo. Se consideran 3 estados de ocupación:

Código	Nivel de ocupación	Porcentaje
1	Bajo	0 %
2	Medio	50 %
3	Alto	100 %

2. Definir el alumbrado instalado en cada caso

-Número de farolas: Puntos de luz existentes en cada caso estudiado.
-Disposición: Distribución del alumbrado. Se consideran las siguientes posibilidades:

Disposición de los puntos de luz
Tresbolillo
Lateral
Central
Bilateral
Singular

- Separación %[m]: De los puntos de luz o farolas. En metros. En el caso de tresbolillo se tendrá en cuenta un paso para calcular su separación.

- Altura %[m]: Altura del punto de luz.

- Tipo de luminaria: Clasificación de luminaria, según su distribución lumínica. La clasificación se recomienda realizar mediante el criterio desarrollado en el Plan piloto de Evaluación y Reducción de Contaminación Lumínica en Catalunya, con alguna corrección, según las instalaciones existentes en el foco contaminante.

-Tipo de lámpara: Tipo que tiene instalada cada punto de luz.

	Lámpara
1	Vapor de Mercurio
2	Vapor de Sodio a Baja Presión
3	Vapor de Sodio a Alta Presión
4	Fluorescente
5	Halogenuros
6	Incandescencia
7	Mescla

- Potencia de la lámpara: Wats instalados en las lámparas.

- Flujo lumínico de la lámpara: Flujo lumínico nominal de la lámpara estudiada.

-Nivel de alumbrado privado: Determinación del nivel de alumbrado privado. Este, se ha clasificado así:

Nivel de iluminación privada	Definición	**Influencia a la C. L. A-B**	**Influencia a la C. L. C-D**	**Influencia a la C.L. E-F**
Muy baja	Ventanas y particulares	5 %	10 %	15 %
Baja	Anterior mas iluminación particular decorativa	10 %	15 %	20 %
Media	Anteriores mas carteles comerciales,	15 %	25 %	40 %
Alto	Anteriores mas iluminación de grandes áreas	Singular	Singular	Singular
Muy alto	Anterior desmesurada	Singular	Singular	Singular

3. Determinar nivel de alumbrado público y privado y la iluminación media a la vía.

- Iluminación media actual: Medida de la iluminación media en la vía pública, y catalogada según la tabla siguiente:

Ítem	Intervalo de nivel de iluminación (lux)
A	0-5
B	5-10
C	10-15
D	15-25
E	25-35
F	35-50
G	50-100
H	100-...

Simulación de casos tipo

Las simulaciones consisten en introducir la tipología de cada una de las calles o casos tipos, en un programa de cálculo de iluminación, concretamente en un módulo de interiores, para poder tener en cuenta las reflexiones del suelo, y fachadas de los edificios, es decir, como afectan las características urbanísticas en el flujo lumínico que escapa al cielo, puede usarse cualquier programa de calculo que cumpla dichas características. Paso a paso, la metodología utilizada en las simulaciones es la siguiente:

1. Determinación de la zona de análisis: Se debe dividir el caso tipo a estudiar en una porción de estudio. Esta representará generalmente una luminaria o dos de la vía pública. Lo que se intenta es simplificar el estudio mediante divisiones del caso, para que se pueda aplicar posteriormente a toda la calle, por la simetría del mismo.

2. Situación de la malla de estudio: Representar la vía a estudiar en un habitáculo, en el cual:
   - La tierra: Es la vía pública y zonas ajardinadas o no edificadas que no pertenecen a la misma.
   - El techo: Es el cielo que absorbe la luz que le llega, puesto que se considera luz que escapa en forma de contaminación lumínica.
   - Las paredes izquierda y derecha: Son las fachadas de los edificios, de los cuales conocemos sus factores de reflexión.
   - Las paredes posteriores y frontales: Se consideran que transmiten con transparencia, puesto que la luz que pasa por estas, va a otra porción de vía, y a la inversa (por esta razón, a pesar de realizar sólo el análisis en una porción de la vía, se considera toda para el cálculo).

3. Situación de los elementos de alumbrado: Implantar el alumbrado inventariado al caso tipo, mediante disposición dentro del habitáculo de interior, de luminarias de exterior (según la tipología determinada A,B,C...) con el flujo lumínico correspondiente, y fluorescentes de cierre opaco que podríamos considerar de distribución lambertiana, para la representación de alumbrado privado, tal y como se ha explicado anteriormente (rótulos, ventanas, escaparates, entre otros).

4. Primeros resultados: Se ejecuta el programa y como resultado nos muestra unos niveles de iluminación para cada una de las mallas. Con esta información se puede determinar el flujo lumínico que llega a cada uno de los elementos físicos reales, relacionados con las mallas (tierra, fachadas, cielo...) Los parámetros más importantes que podemos extraer son:

   - Emisión de Flujo Superior (EFS) Como el flujo lumínico que escapa a las características urbanísticas de una calle o zona, proviniendo de las instalaciones de alumbrado, tanto públicas como privadas. Podemos concluir que el flujo calculado a la parte superior del habitáculo o techo, es la Contaminación Lumínica que emite esta porción de la calle.
   - Luz intrusa: Flujo lumínico que va a las paredes o fachadas de los edificios, y es susceptible de molestar a la vida privada doméstica de las personas por intrusión en ventanas.
   - Luz a vía pública: La que realmente se aprovechable por su uso inicial. El de iluminar la calle.

5. Resultados en profundidad: Con la simulación de más casos basados en el original, podemos extraer más resultados, muy útiles. Las simulaciones realizadas en total son:
   -Simulación del caso original
   -Simulación del caso original considerando coeficientes de reflexión de todas las superficies (para determinar la cantidad de flujo directo a las mallas de estudio y el reflejado)
   -Simulación del caso original sin considerar el alumbrado privado (por determinar la aportación en cada caso del alumbrado privado)
   -Simulación del caso original sin considerar el alumbrado privado y con los coeficientes de reflexión (para considerar la aportación del alumbrado privado directo y reflejado.)

   De todas estas cuatro simulaciones que se deben realizar por cada caso tipo, se pueden extraer cada una de las tres variables, anteriormente expuestas, divididas según su aportación directa o reflejada, o debidas a alumbrado público y privado.

ANEXO XIII.

Poster: Study in light pollution at the natural park of Delta del Ebro, Spain

Study in light pollution at the natural park of delta del ebro, spain

Solano Lamphar, Héctor[1,2], San Martín Páramo, Ramón[1],
García Gil, Manuel[1]
[1]Department of light studies, Polytechnic University of Catalonia. [2]CONACyT

Introduction

The increase of the luminous intensity of light in natural spaces, as a direct consequence from urbanizations or the glare of the sky, affects the biological processes of living organisms. Essentially, on those that have nightlife habits as a migration, nutrition, reproduction, social interaction and others. This affirmation has been proved since the first studies of insects, lepidoptera and birds made by Dolsa and Albarrán (1998); and by Raevel and Lamiot with a summary of artificial night lightning issues in different species of France, mainly: amphibious, eels, fishes and birds.
This research presents the investigation made in the natural park of Delta of Ebro, with the objective to determine the existent lightning conditions and its affectations to the park.

Approach to the study

❖**Definition**
This study had diverse objectives: to measure and qualify the lightning conditions of the natural park, to study the factors than could determine variations in the measurements and to make correlations between the data to find tendencies.
❖**Field of study**
Natural Park of Delta of Ebro, with an extension of 320 square kilometres, contents a diverse population of birds, fishes and vegetable species (325 of 600 European species of birds were found in this park) and a big part of its surface is being used as a rice plantation.

Fig.1 Bird population at the Natural Park

❖**Initial organization and research stages**
The initial hypotheses were the following. The lightning factors that can define the night conditions are: Sky luminance at the zenith, illuminance at the field, illuminance at vertical levels and the existent of punctual or high luminance at the horizon. These named factors could affect the natural conditions of the park. The lighting conditions would depend on: Artificial system lighting situation and atmospheric condition.

Applied methodology

After theory and bibliographic study of the issues it was necessary to establish the following approaches:
❖**Measurement space as a closed dome form**
Constituted by a volume as dome form. The measures would make reference to: luminance of the sky, illuminance of the ground, specific luminance in the horizon.
❖**Measurement devices**
The main instruments were: Sky quality meter, luminancimeter, luxometer. And as complementary devices: photographic camera, compass, weather thermometer and GPS.
❖**Determination of the points of study**
The final sketch is based in parallel rectilinear ways with a distance of 500 meters between each other, an over which the measures were made every 200 meters.

The work field and compilation of data were:
❖**Identification of pollutant focuses**
There were three stages of identification: localization through the surveillance of the field, verification of the grade of pollution influence applying Walker's law and selection of the significant values.
❖**Work field**
The work field done at that moment were: night recognition routes and measurements. On this points, traced by GPS, the measurement of luminance and illuminance, also sky quality were made.

Results

After the work field was made, the method would be refined, and the first tendencies can be obtained. In which, the relation between pollutant focuses (normally, in this case, cities and small towns) and the light pollution can be perceived clearly.
❖**Obtained measurements**
This is an example of the data in numeric format and extrapoled to Cd/m² and Luxes. It corresponds to a track field between La aldea – Deltebre (two towns of the park).

Sky quality measurements		Illuminance in ground	
Reference valour 2.474×10-4 Cd/m²		Reference valour 5×10-5 Luxes	
Point	Cd/m2	Point	Lux
1	0,07268148	1	8,24668072
2	0,15900975	2	9,97455668
3	0,01228637	3	0,13665928
4	0,00890069	4	0,95425877
5	0,11205307	5	0,00699004
6	0,00147715	6	0,0007854
7	0,00120621	7	0,00064795

Table 1 Measurements example

The data of table 1 corresponds to one part of the track field between La Aldea and Deltebre, approximately of 9 km. None of the measures that have been taken got enough parameters to be compared with a natural dark sky (21.6 mg/arcseg o 2.474×10-4 cd/m²).

Results cont.

The exposed data are the zenith of the sky and the illuminace measured at ground level, over a surface of reflectance of 0.8, respectively.

Fig. 2 Example of system of measurement

❖**Sky quality maps**
Data obtained represented in the map:

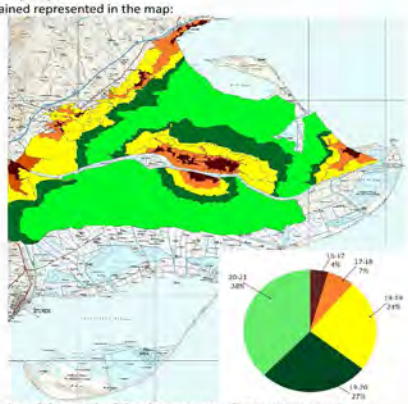


Fig. 3 Lighting of the zenith of the sky map, according to MagArcsec2

In the representation of level based on the sky quality, the affectation of this value can be seen clearly depended on the surrounding towns, that is to say the pollutant focuses. In the same way, a raise of the value of the measures can be noticed and also in the residual latent value. This avoids to get 21.6 Mag/arcsec2 (2.474×10-4 Cd/m²) necessaries for natural dark night.
❖**Quantification of EFS /GRE and affectation of the place of study**
The emission of superior flux and the relative grade of emission (EFS/GRE) were quantified, used the model RAMAL-UPC developed by the department of light studies of the Polytechnic University of Catalonia to determine the grade in which a light installation contributes to the resultant light pollution.
❖**Correlations of data**
The evaluation in this stage was made by an analysis of the data with a lineal regression model. In this case the models of Pearson, Spearman and Kendall were used to correlate. Some correlations had been made between lighting data, meteorological conditions, instruments used, RAMAL-UPC index and to analyze the Light pollution behaviour at different distances.

Conclusions

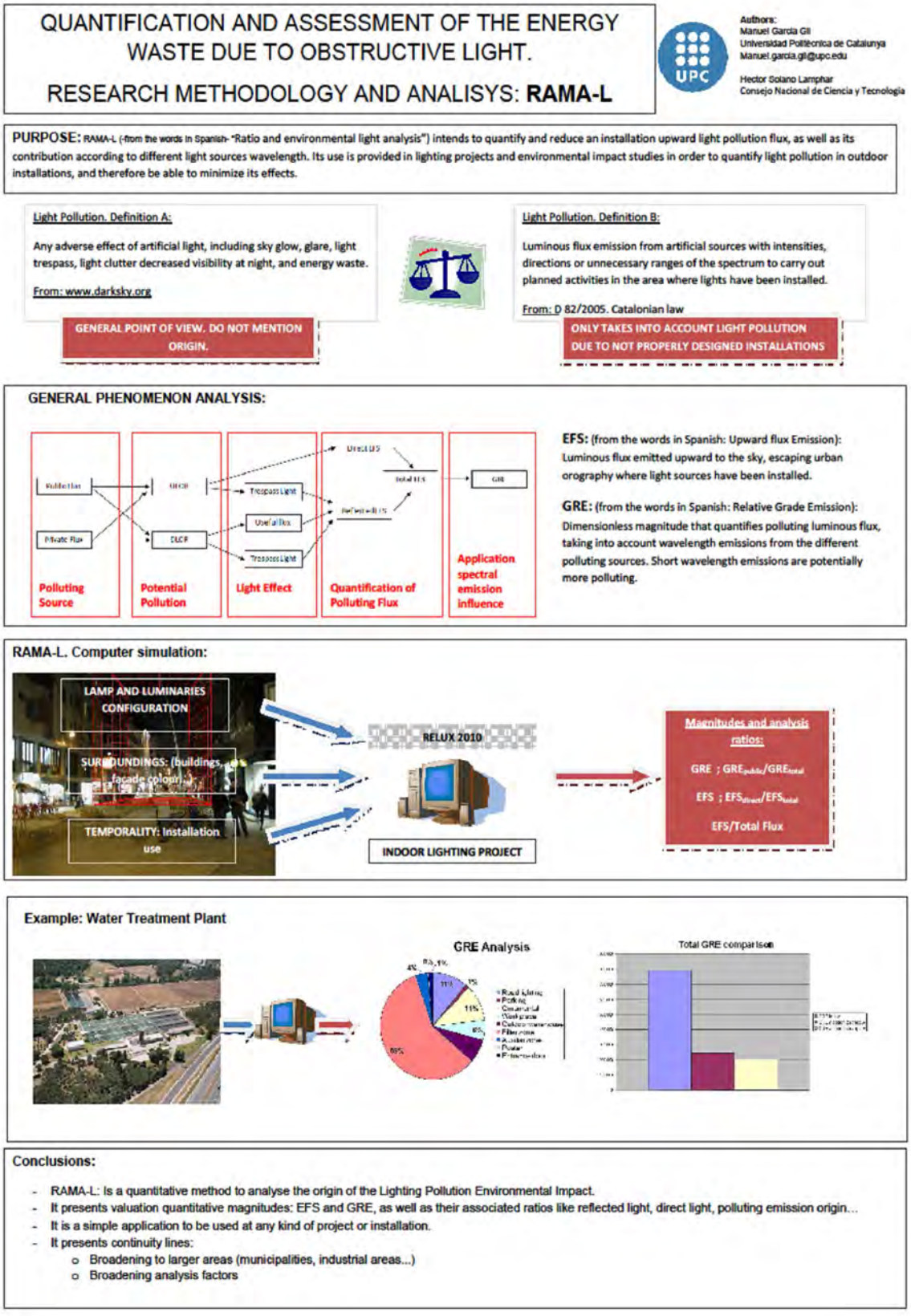
Before the work field study was finished and the correlations between lighting data and conditions inherent of the park were made, we could conclude that:
•The park doesn't have a natural dark sky
•The increase of the light pollution is related to the augment of the relative humidity and the temperature in the studied environment.
•The light pollution changes depending on the distance between the observer and the contaminating focus.
•The utilization of Walker's law was valid for the quantification of pollutant focuses.
•The correlation that was done between the data obtained from the two instruments (luminancemeter and SQM) was useful, at the end to realize that the results of both instruments presented similar characteristics.
•The rate of GRE data decreases with distance. Also GRE data indicates that the urbanizations affect directly to the park as a homogenous contamination.
•The biologist supposed that the migration of birds in the park is varying. There is an intense luminance in the horizon which could be an origin of disorientation in the birds, but we couldn't prove it.

References

1. Dolsa A. G. and M. T. Albarrán 1998 La problemática de la contaminación lumínica en la conservación de la biodiversidad. Sesión de trabajo sobre la Contaminación Lumínica. Barcelona, España. 29/07, 1998.
2. Raevel P. and F. Lamiot 1998. Incidences de l'éclairage artificiel des infrastructures routières sur les milieux naturels. 3ème Congrès Routes & Faune sauvage. Strasbourg, France. 30/09-2/10, 1998.
3. Walker M.F. 1970. Light pollution model. Pub. A.S.P. 82: 672.

ANEXO XIV.

Poster: Quantification and assessment of the energy waste due to obstructive light



ANEXO XV.

Poster: Proposal model for the categorization of night sky brightness in natural spaces affected by light pollution

Proposal model for the categorization of night sky brightness in natural spaces affected by light pollution

Solano Lamphar, Héctor [1,2], San Martín Páramo, Ramón[1], García Gil, Manuel[1]
[1]Department of light studies, Polytechnic University of Catalonia. [2]CONACyT

Introduction

The present work has been projected with the main objective to develop a proposal model that shows the variability of the night conditions of light in affected places by the light pollution. This model works as a support tool for ecological light pollution researches. The investigation required measures of the light pollution pursuing the development of a model.

Main light pollution models

The first model completed with the objective of light pollution categorization was proposed by Walker (1973) as a empirical equation. Treanor (1973) took the Walker's law and improved it, introducing factors related to the scattering of light in atmosphere. Three years later, Berry (1976) took the Treanor's model and made some changes in the equation to determine the contamination produced from the light of small cities. Some years later appeared a new model developed by Garstang (1986), generalizing the city as a uniform disk rather than a point source. The model used an atmospheric scale taking into account the aerosols and the suspension molecules in the air. Baddiley (2002) introduced a model also taking into account scattering by air molecules and aerosol particles. Aube (2006) introduced a second generation model for the measurement of light pollution (Aube 2006). The developed model implies in situ light pollution measurements in order to determine the aerosol optical depth at night using an iterative method employing these measurements. Kocifaj (2007) developed a complete mathematical model for the measurement of light pollution. The model is applicable in the calculation of spectral and integral radiance or luminance under arbitrary atmospheric conditions (Cloudy skies inclusive). Some parts of the present work, are based in Kocifaj's, Garnstang's and Baddiley,s Models.

Methodology

For the development of the model it was necessary the determination and the examination of the factors that affect directly in the increase or the decrease of the light pollution: This research took along the periods between 2006 and 2009, covering different areas in the Delta of Ebro Natural Park in Tarragona, Spain; Aiguastortes Natural Park in Val of Aran, Lleida, Spain; and the region covered between Los Mochis and Topolobampo harbour in Sinaloa, Mexico. The recollected information consisted of: measurements of the light in the zenith of night sky, precise measurements of the horizon and measurements of the ground illuminance. When all factors were validated, the field information processed and the existing models were checked; the development of the model started

Proposal Model

Every part of the equation is explained separately. For space purposes, every variable is explained at the end.

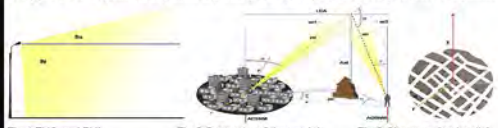


Fig.1 FHS and FHI Fig.2 Geometry of the model Fig.3 City as a circular disk

•luminous flux

The proposal model at first involves an analysis of the contaminant focuses into the studied area. The analysis is made by a model developed in the department of light studies of the Polytechnic University of Catalonia – RAMA-L-. Whit the help of this model, in a computer simulation, we obtained the flux in the direction of our needing, taking into account lamp and luminaries configuration, the reflection of the surroundings and temporality of instalation. Therefore the luminous flux is modelled according the first Lambert Law.

$$FD = \frac{EFSxds1Cos\alpha}{pa^2} \quad (1)$$

$$EFS = FTI\ x\ FHSmedio + FTI\ x\ (FHI\ medio\ x\ fr) \quad (2)$$

The angle alpha (α) is obtained taking into account the geometry of the model. According to Kocifaj (2007)

$$\alpha = ArcCos((1 + Tan^2\gamma) + \frac{po}{Aat}\ x\left(\frac{po}{Aat} - 2Tany\ x\ cos\eta\right))^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

•Geometrical characteristics of the pollutant focus

The city is represented as an infinitesimal circular disc of uniform brightness. According to Garstang (1986).

$$AC = \iint \frac{1}{\pi r^2} dxdy \quad (4)$$

•Coefficient of the atmosphere transmission

Light transmission in the atmosphere depends on the optical properties that are between the emitter and the receiver – in our case between the city and the limit height of atmosphere, and the named atmosphere and the observer-. The coefficient of the atmosphere transmission is obtained, according to the Beer-Lambert-Bouguer law, through the following equation.

$$CT = exp^{-xK} \quad (5)$$

Here we obtained the airmass (x) by the equation of Kasteng y Young (1989).

$$x = \frac{1}{cos\alpha + 0.50572(96.07995 - \alpha)^{-1.6364}} \quad (6)$$

There are three factors used in the calculus of the optical depth (k): Molecular absorption mainly by ozone, Rayleigh scattering coefficient and aerosol dispersion coefficient.

$$K\lambda = Aray + Aaer + Aoz \quad (7)$$

It is important to note that the ozone is located at an altitude over 10 Km. It is not affecting light pollution. Rayleigh scattering determines the scattering of light by smaller particles than the wavelength of light:

$$Aray = 9.4977\ x\ 10^{-3}\left(\frac{1}{\lambda}\right)^4 c^2\ x\ (1 - exp\left(-\frac{h}{7.996}\right)) \quad (8)$$

$$c = 0.23465 + \frac{(1.076\ x\ 10^2)}{146 - (1/\lambda^2)} + \frac{(0.93161)}{41 - (1/\lambda^2)} \quad (9)$$

The aerosols are fine solid particles or liquid droplets suspended in a gas, in a minor height.

$$Aaer = Aoi^{-\delta}(1 - exp\left(-\frac{h}{H}\right)) \quad (10)$$

Where (Ao) the optical thickness of aerosols for a micron wavelength. It depends on the total content of particles and their efficiency in the absorption and dispersion of the light. Normally is used a constant of 0.087. (Bessel, 1990; Mohan et al, 1999; Stalin et al 2008). Is recommended to use a value of 1.3 for δ. (Angstrom, 1961; Schaefer, 1992; Daniel W. E. Green, 1992).Usually is took height scale H=1.5 km as standard. According to Baddiley (2002)1-exp is the scattering into the path. Then, the transmission coefficient is:

$$CT = exp^{-XK} = C1 + C2 = exp^{-X1(Aray + Aaer)} + exp^{-X2(Aray + Aaer)} \quad (11)$$

•Scattering probability

According to Kocifaj (2007) and Baddiley (2002) is necessary to take into account the probability that a photon, originally emitted in the city to as1 will be scattered into as2 and to the observer, also named the phase functions. Then following Kocifaj (2007):

$$FF = \frac{1}{4\pi}\left((Aray\ x\ Albm\ x\ FFm) + (Aaer\ x\ Alba\ x\ FFa)\right) \quad (12)$$

Proposal Model cont.

$$FFm = \left(\frac{3}{4}\right)(1 + cos^2\theta) \quad (13)$$

$$FFa = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g^2 cos\theta)^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

$$\theta = Arccos\left(\frac{1}{2}\left(\frac{po^2}{Aat^2} cosycos\alpha - \frac{cos\alpha}{cosy} - \frac{cosy}{cos\alpha}\right)\right) \quad (15)$$

For numerical simulations, we can take a value of g=0.90,Alba=0.85,Albm=1, (Kocifaj 2007)

•Correction for curved earth geometry

Taking into account the earth geometry according Albers and Duriscoe (2001).

$$CU = exp^{-h/A} \quad (16)$$

•Correction for topography obstacle

$$Co = Aobst\ x\ exp(-\left((-PO + Dobst)\ x\ \frac{Aobst}{Aat\ x\ 1000}\right)) \quad (17)$$

•Correction for cloudy skies

Adding a equation for the contribution of a cloud to total intensity, developed by Kocifaj (2007).

$$In = \frac{Ac\ x\ CRN}{\pi(An)^2} EFS\ x\ Cos^5\alpha\ x\ CTn \quad (18)$$

•Proposal model

In base of the past equations, the photometric principles and taking into account the developed in the model of Kocifaj (2007) to make the integration in height, we have:

$$IOn = In + \frac{Ac}{Cosy}\int_{Co}^{Aat} (EFSxCos^3\alpha\ x\ Aat^{-2}x\ C1C2\ x\ FF)dAat \quad (19)$$

It is important to note that with the equation 19 we have intensity. It is necessary to make the double integration for the contribution of the light source –no necessary if we take the source as a point- It is also necessary to make an integration for the spectral band, according to the detection of wavelength. It is possible to obtain luminance adding the luminous efficiency for the observer.

•Variables

FD =Directed flux, EFS=Superior flux emission, ds1= first elementary surface, α= Angle formed between the zenith and the line of directed flux, pa= Distance between the city and effective limited height of atmosphere, FTI= total installed flux, FHSmedio= percentage of hemispheric superior flux, FHImedio = Percentage of the hemispheric reflected flux, fr=reflection factor, γ=Observer angle, po= Distance between the observer and the city, Aat=effective limited height of atmosphere, η=azimuthally angle of observer, AC=City area, CT = transmission coefficient, X=airmass, Kλ= optical depth, λ=wavelength size, Aray=Rayleigh scattering, Aaer=Aerosol scattering, Aoz=ozone extinction, c=refraction index, Ao=optical thickness of aerosols, H=height scale, X1=first airmass, X2=second airmass, FF=phase function, Albm=molecular albedo, FFm=molecular phase function, Alba=aerosol albedo, FFa=aerosol phase function, θ=scattering angle, CU=correction for curved earth geometry, h=relation to curved earth geometry, A= height to curved earth geometry, Co= correction for topography obstacle, Aobst=obstacle height, Dobst=obstacle distance, In=cloud intensity, CRN=cloud reflectance, An=cloud height, Ctn=transmission coefficient related to cloud.

•Testing

We made some simple numerical simulations assumed the city as a point source, omitting the double integration for the light source.

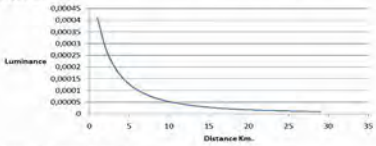


Table 1 Data in relation to distance observer

Conclusions

The resultant model was possible after was made a research in the periods between 2006 and 2009, covering different areas in the region of Catalonia, Spain and Sinaloa, Mexico. This model is a result of a long research, but at this moment it is in the state of prototype. The principal strength of the model: is possible to make a better analysis of the pollutant focuses., do not take the city as a constant, because all cities have a different lighting system.

We are working in to make correlations between the data model and the data from measurements in situ, the places selected are the natural park cited at the beginning. Also we are working in a software tool.

References

1. Albers S. y Duriscoe D. 2001 Modeling Light Pollution from Population Data and Implications for National Park Service Lands. George Wright Forum. Vol 19, p. 1.
2. Angstrom A. (1961). Radiation to actinometric receivers in its dependence on aperture conditions. Tellus Vol, 13, p.425-431.
3. Aubé, M., et al. 2005 Light Pollution Modelling and Detection in a Heterogeneous Environment: Toward a Night Time Aerosol Optical Depth Retrieval Method. SPIE, Vol. 5890.
4. Berry, R.L. 1976 Light Pollution in Southern Ontario. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada. Vol. 70(3) p.97-115.
5. Garstang, R.H. 1986 Model for Artificial Night-Sky Illumination. Astronomical Society of the Pacific, Vol. 98 p.364-375.
6. Green D. W. E. 1992 Magnitude corrections for atmospheric extinction. International Comet Quarterly. Vol. 14, p. 55-59.
7. Hayes, D. S. y Latham, D. W. 1975 A rediscussion of the atmospheric extinction and the absolute spectral energy distribution of VEGA. Astrophysical Journal, vol. 197, p. 593-601.
8. Kocifaj M. 2007 Light pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources, *Appl. Opt.* 46, 2007, 3013-3022.
9. Narisada K. y Schreuder D. 2004 Light Pollution Hand Book. Springer. Light pollution and astronomy. Netherlands. p. 117-118.
10. San Martin R., Garcia M., Solano H.A. 2009 Metodologia para análisis cuantitativo de la contaminación luminica. XXXV Simposium Nacional de Iluminación. 27-30 de mayo, 2009, Pontevedra, España.
11. Shirkey R.C. 2006 A Model for Nighttime Urban Illumination. Modeling and Simulation Conference. Dec 11-14, 2006, Las Cruces, NM.
12. Stalin C.S. et al 2008 Night sky at the Indian Astronomical Observatory during 2000-2008. *Astronomical Society of India. Vol 36, p 111-127.*
13. Treanor P.J. A 1973 Simple Propagation Law for Artificial Night-Sky Illumination. The Observatory, Vol. 93 p.117-120.
14. Walker M.F. 1973 Light pollution in California and Arizona. Astronomical Society of the Pacific, Vol. 85, p. 508-519.

Correspondence:
Department of light studies, Polytechnic University of Catalonia, Avinguda Diagonal 647, 08028. Barcelona, Spain.
lamphar@gmail.com +34 639844701

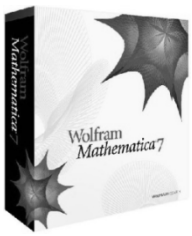
ANEXO XVI.

Características de los instrumentos utilizados en el desarrollo de la investigación

Instrumento	Características
Luminancímetro LMT L 1009	• Ángulos 3°, 1°, 20', 6' Seleccionables. • Rango de medición 0.0001 cd/m2 a 19 990 000 cd/m2. • Distancia de medición aprox. 0.50 m a infinito. • Cabeza de Fotómetro con Si-photoelement • Batería NiCd recargable, circuito de recarga automático.
Sky Quality Meter	• Mide la calidad del cielo, en un ángulo de 80º en mag/arcsec²). • La precisión absoluta de cada medición se encuentra en ±10% (±0.10 mag/arcsec²). • Los efectos de temperatura en el oscilador micro controlador han sido removidos. • Cada SQM esta calibrado usando un luminancímetro NIST • Es sensible solo a la luz visual.
luxómetro MAVOLUX 5032C/B	• Mide iluminancia y luminancia • Selección de lux y pies/candela • clasificado según DIN 5032/T7 y CIE no. 69 • La sensibilidad espectral del luxómetro es equiparable a la del ser humano
Nikon coolpix 990	• 3.34 mega píxeles (2048 x 1536) • Diafragma de 7 láminas • Enfoque: Manual, automático, normal y macro. • Exposición: Auto, manual, y con prioridad velocidad o apertura. • Medición: Matricial, puntual y pondera en el centro. Y puntual AF. • Wide conversor de 0,63X • Tele convertidor 3X
Toshiba Satellite A110-160	• Procesador Core2 Duo T5500 (1,66 GHz) • Memoria DDR II SDRAM de 2,5 GB • Disco duro de 250 GB (5400 rpm) SATA • Pantalla de 15'4 WXGA Trubrite TFT • Grabador DVD doble capa • Gráfica Chipset Intel 945GM con 224MB de memoria de vídeo) • 36 cm x 26.3 cm x 3.9 cm,2.7 kg
GPS Nokia N95	• Navegador GPS satelital.

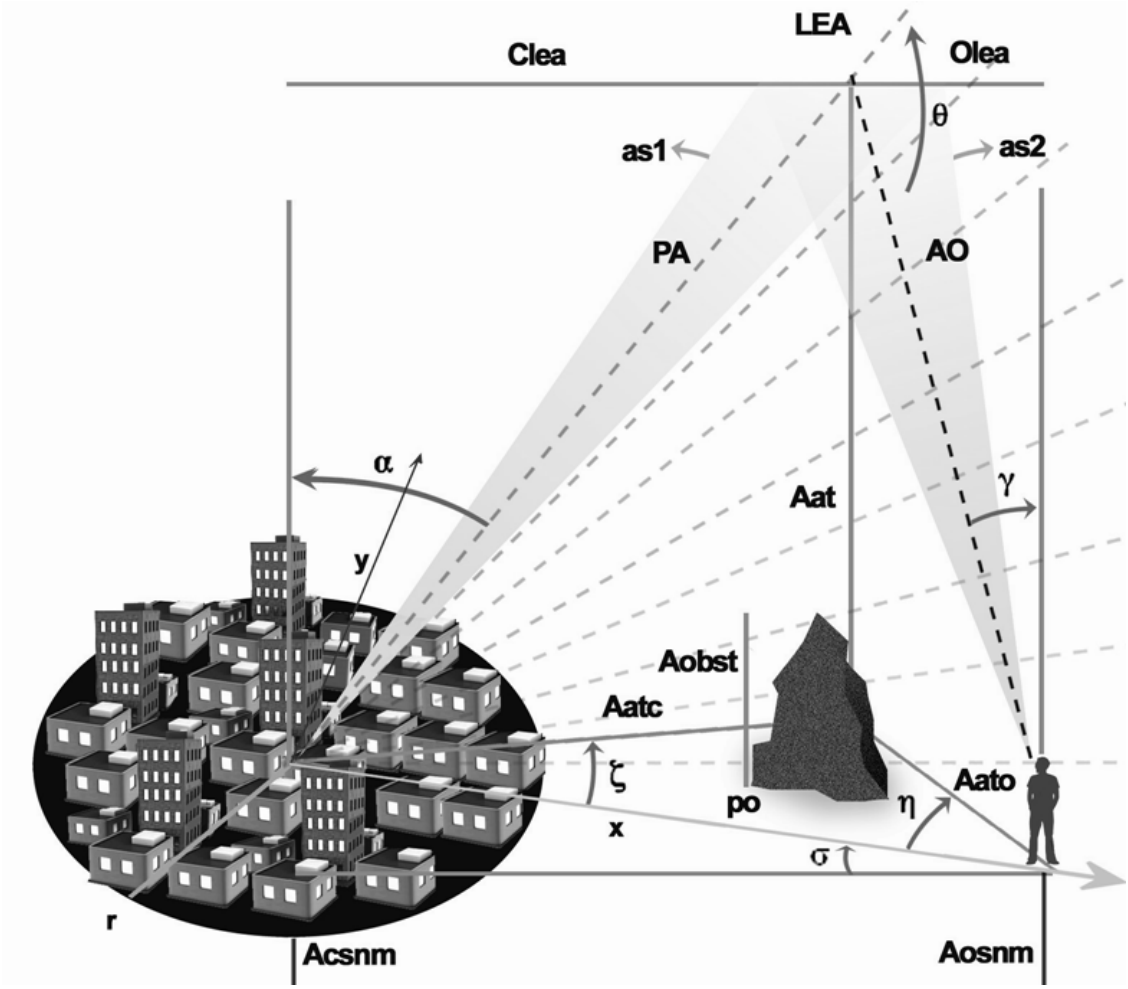
ANEXO XVII.

Características del software utilizado en el desarrollo de la investigación

Software	Características
Office 2007	• Word 2007 • Access 2007 • Excel 2007 • OneNote2007 • PowerPoint2007 • Outlook 2007 • Visor de imágenes de office 2007
Minitab 15	• Estadísticas básicas • Regresión y ANOVA • Diseño de experimentos • Gráficas de control • Herramientas de calidad • Confiabilidad y supervivencia
Wolfram Mathematica 7.0 	• Cálculo geométrico integrado. • Capa gráfica automatizada. • Optimización combinatoria. • Optimización no lineal con restricciones. • Integración numérica. • Nuevas clases de funciones especiales. • Demostración automática de teoremas. • Cálculo de estadística simbólica. • Operaciones con matrices ampliadas.
Smartdraw 2009	• Organigramas • Diagramas de flujo • Cronologías de proyecto • Diagramas de Gantt • Calendarios de proyecto • Gráficos de barra; Gráficos circulares
Google Earth 2009	• Fotografías vía satélite • Mapas • Datos geográficos
Endnote X3	• Generación de bibliografías • Crear referencias manualmente • Importar referencias • Búsqueda online en bases de datos

ANEXO XVIII.

Esquema completo del modelo



ANEXO XIX.

Nomenclatura de fórmulas

$\boldsymbol{\alpha}$ = Ángulo cenital de flujo dirigido

$\boldsymbol{\gamma}$ = Angulo cenital del observador

$\boldsymbol{\nabla}$ = Reflexión piso paredes

$\boldsymbol{\xi}$ = Angulo acimutal del flujo dirigido

$\boldsymbol{\eta}$ = Angulo acimutal del observador

$\boldsymbol{\sigma}$ = Ángulo de la diferencia de alturas de la ciudad y el observador a nivel del mar

$\boldsymbol{\lambda}$ =Longitud de onda

$\boldsymbol{\lambda 1}$ = Menor longitud de onda

$\boldsymbol{\lambda 2}$ = Mayor longitud de onda

$\boldsymbol{A}$ = Constante de 4000 metros

$\boldsymbol{Aat}$ = Altura efectiva de atmósfera

$\boldsymbol{Aatc}$ = Distancia entre ciudad y línea cenital de punto de encuentro de ángulos sólidos

$\boldsymbol{Aato}$ = Distancia entre observador y línea cenital de punto de encuentro de ángulos sólidos

$\boldsymbol{Ac}$ = Área de la ciudad

$\boldsymbol{Acsnm}$ = Altura de la ciudad sobre el nivel del mar

$\boldsymbol{Aerc}$ = Constante de 1,3

$\boldsymbol{Alb}$ = Albedo

$\boldsymbol{An}$ = Altura de la nube

$\mathbf{AO}$ = Distancia de segundo ángulo sólido

$\boldsymbol{Aosnm}$ = Altura del observador

$\boldsymbol{Aobst}$ = Altura obstáculo

$\boldsymbol{Aop}$ = El espesor óptico total de los aerosoles atmosféricos para una longitud de onda de un micrón.

$\boldsymbol{Aosnm}$ = Altura del observador sobre el nivel del mar

$\boldsymbol{Aro}$ = Área de observador

$\boldsymbol{c}$ = Concentración

$\boldsymbol{C1}$ = Primer coeficiente de transmisión

$\boldsymbol{C2}$ = Segundo coeficiente de transmisión

$\boldsymbol{Clea}$ = Distancia entre línea cenital ciudad y punto de encuentro de ángulos sólidos

$\boldsymbol{Co}$ = Corrección orografía

$\boldsymbol{Coz(\lambda)}$ Es el coeficiente de absorción del ozono

$\boldsymbol{CRn}$ = Coeficiente de reflexión de la nube (Tomando un valor promedio de 0,5)

$\boldsymbol{CT}$ = Coeficiente de transmisión total

$\boldsymbol{CTaa}$ = Coeficiente de transmisión en atmósfera adversa

$\boldsymbol{CTn}$ = Coeficiente de transmisión de la nube

$\boldsymbol{CU}$ = Curvatura de la tierra

$\boldsymbol{D}$ = Coeficiente de Dispersión

$\boldsymbol{dAat}$ = Diferencial de altura de atmósfera

$\boldsymbol{d\Omega 1}$ = Diferencial de ángulo solido primario.

$\boldsymbol{d\Omega 2}$ = Diferencial de ángulo solido secundario

$\boldsymbol{dh * dv}$ = Los lados de la superficie elemental de ángulo sólido

$\boldsymbol{Disp}$ = Dispersión

$\boldsymbol{Dobst}$ = Distancia obstáculo del observador

$\boldsymbol{dS1}$ = Superficie elemental de primer ángulo sólido

$\boldsymbol{Ea}$ = Dispersión por aerosoles

$\boldsymbol{EFS}$ = Emisión de flujo superior

$\boldsymbol{Eoz}$ = Extinción por ozono

$\boldsymbol{Er}$ = Dispersión de Rayleigh

$\boldsymbol{Ext}$ = Extinción

$\boldsymbol{FF}$ = Función de la fase de dispersión

$\boldsymbol{FFa}$ = Función de fase para la dispersión por aerosoles

$\boldsymbol{FFm}$ = Función de fase para la dispersión molecular

$\boldsymbol{FHImedio}$ = Flujo hemisférico inferior medio

$\boldsymbol{FHSimedio}$ = Flujo hemisférico superior instalado medio

$\boldsymbol{Fl}$ = Flujo lumínico

$\boldsymbol{Fllea}$ = Flujo lumínico hacia atmósfera

$\boldsymbol{Flha}$ = Flujo lumínico hacia ángulo solido primario

$\boldsymbol{Flho}$ = Flujo lumínico hacia observador

$\boldsymbol{FTI}$ = Flujo total instalado

$\boldsymbol{h}$= relación de curvatura

$\boldsymbol{H}$ = escala de alturas

$\boldsymbol{In}$ = Intensidad aportada por la nube

$\boldsymbol{IT}$ = La contaminación lumínica total

$\boldsymbol{IObs}$ = Intensidad al observador

$\boldsymbol{Io}$= Luminancia del objeto.

$\boldsymbol{I(Xobs)}$ = Luminancia en la localización del observador.

$\boldsymbol{(Ka + Km)PA}$ = Extinción atmosférica entre la ciudad y el límite de atmósfera

$\boldsymbol{(Ka + Km)AO}$ = Extinción atmosférica entre el observador y el límite de atmósfera

$\boldsymbol{(Ka + Km + K\lambda a)PA}$ = Extinción atmosférica entre la ciudad y el límite de atmósfera con condiciones adversas de clima

$(\boldsymbol{Ka + Km + K\lambda a})\boldsymbol{AO}$ = Extinción atmosférica entre el observador y el límite de atmósfera con condiciones adversas de clima

$\boldsymbol{K\lambda}$ = Extinción atmosférica

$\boldsymbol{ka\lambda}$ = Coeficiente de extinción de atmósfera adversa

$\boldsymbol{Olea}$ = Distancia entre línea cenital observador y punto de encuentro de ángulos sólidos

$\boldsymbol{pa}$ = Distancia entre foco y el volumen donde impactan los fotones

$\boldsymbol{PO}$ = Distancia entre el punto contaminante y el observador.

$\boldsymbol{Prob}$ = Probabilidad de dispersión

$\boldsymbol{X}$ = Masa de aire

$\boldsymbol{X1}$ = Masa de aire de la ciudad

$\boldsymbol{X2}$ = Masa de aire del observador

ANEXO XX.

Gráfica climatológica perteneciente a la estación de Amposta en Deltebre de marzo de 2009.

Período (T.U.)	T (°C)	HR (%)	PPT (mm)	VV (m/s) Altura sensor 10m	DV (graus) Altura sensor 10m	P (hPa)	RS (W/m2)
27/03/2009 (00:00-01:00)	7.8	77	0.0	1.5	328	1014	-3
27/03/2009 (01:00-02:00)	7.7	78	0.0	2.4	299	1014	-3
27/03/2009 (02:00-03:00)	7.0	81	0.0	2.6	298	1014	-3
27/03/2009 (03:00-04:00)	7.0	81	0.0	2.6	296	1013	-3
27/03/2009 (04:00-05:00)	6.2	83	0.0	2.2	309	1013	-3
27/03/2009 (05:00-06:00)	6.0	85	0.0	3.0	293	1013	-1
27/03/2009 (06:00-07:00)	6.6	83	0.0	3.0	295	1013	76
27/03/2009 (07:00-08:00)	9.4	74	0.0	2.8	296	1013	263
27/03/2009 (08:00-09:00)	13.5	64	0.0	0.7	299	1013	455
27/03/2009 (09:00-10:00)	16.6	60	0.0	1.1	158	1013	619
27/03/2009 (10:00-11:00)	18.0	55	0.0	2.2	153	1013	742
27/03/2009 (11:00-12:00)	18.4	54	0.0	4.0	160	1012	809
27/03/2009 (12:00-13:00)	19.0	53	0.0	4.4	162	1011	803
27/03/2009 (13:00-14:00)	19.6	48	0.0	4.5	158	1011	746
27/03/2009 (14:00-15:00)	19.4	52	0.0	5.0	156	1010	639
27/03/2009 (15:00-16:00)	18.7	60	0.0	6.0	174	1009	485
27/03/2009 (16:00-17:00)	17.0	68	0.0	6.8	181	1008	281
27/03/2009 (17:00-18:00)	15.7	72	0.0	5.6	179	1008	88
27/03/2009 (18:00-19:00)	14.0	80	0.0	3.9	173	1007	0
27/03/2009 (19:00-20:00)	13.0	84	0.0	3.7	166	1008	-3
27/03/2009 (20:00-21:00)	12.2	87	0.0	3.1	161	1007	-3
27/03/2009 (21:00-22:00)	11.7	89	0.0	2.2	130	1007	-2
27/03/2009 (22:00-23:00)	11.9	91	0.0	2.5	72	1006	-2
27/03/2009 (23:00-00:00)	11.8	92	0.0	2.2	76	1006	-1