

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia Galileo Galilei

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

**Luminosità del cielo notturno e condizioni di
osservazione all'Osservatorio Astrofisico di
Asiago**

Relatore: Prof. Sergio Ortolani

Correlatore: Dott. Andrea Bertolo
ARPAV - Dip. di Padova
Osservatorio Inquinamento Luminoso

Laureanda:
Deborah Carli
Matricola 597518

Anno accademico 2015/2016

Sommario

A partire dagli anni '60 anni si è assistito in tutto il mondo ad un aumento esponenziale dell'inquinamento luminoso dovuto all'emissione incontrollata di luce artificiale verso il cielo.

Negli ultimi 15 anni l'intensificarsi del suo studio da parte della comunità scientifica ha portato all'evidenziazione delle sue maggiori cause e delle possibili soluzioni da attuare per limitarne lo sviluppo; infatti se oltre ad essere un ostacolo per le osservazioni astronomiche, e uno spreco di energia e denaro, gli effetti sull'ambiente e sulla salute sono sempre più importanti. Sotto un continuo dibattito in particolare sono i recenti LED a luce bianca-blu.

La lotta di molte associazioni nazionali e internazionali ha portato all'attuazione di regolamenti per il controllo del tipo di impianti pubblici e privati installati. Nonostante questo l'Italia ha il triste primato all'interno dei paesi del G20 di avere la maggior percentuale di territorio sotto un cielo con luminosità $> 87 \mu cd m^{-2}$. Il 99% della sua popolazione e il 90% del suo territorio si trova sotto un cielo inquinato. Per capire la portata di questi valori basti pensare che il 70% della popolazione non riesce più a vedere la Via Lattea.

È evidente quindi, pur nella buona strada già intrapresa, che le possibilità di miglioramento sono notevoli, se si agisce sull'efficienza degli impianti e razionalizzando maggiormente l'illuminazione pubblica.

Nonostante questa situazione critica lo studio della luminosità del cielo notturno dei due siti di Cima Ekar e Pennar negli ultimi 5 anni non ha evidenziato alcun cambiamento significativo (e comunque entro il valore dell'errore strumentale). I valori medi del cielo notturno ottenuti tramite SQM sono di $20,75 \pm 0,1 mag arcsec^{-2}$ per Cima Ekar e $20,65 \pm 0,1 mag arcsec^{-2}$ per Pennar.

Si è registrato invece un aumento della temperatura media dal 1957 che segue l'andamento del global warming (con valori di $0,2-0,3^{\circ}C$ ogni 10 anni), e un aumento più repentino negli ultimi quattro anni.

Nonostante questo cambiamento climatico la copertura media nuvolosa, simile per i due siti, è rimasta per lo più invariata negli ultimi 55 anni, con un valore di notti potenzialmente lavorative medie pari a circa 200 annue (ricordiamo che nell'analisi non vengono tenuti conto di altri fattori che definiscono una notte effettivamente utilizzabile come l'umidità).

Indice

1	Luminosità del cielo notturno	3
1.1	Luminosità naturale	3
1.2	Luminosità artificiale	5
2	Come si produce l'inquinamento luminoso	7
2.1	Emissione diretta di luce sopra l'orizzonte	7
2.2	La propagazione della luce nell'atmosfera	10
2.2.1	Estinzione atmosferica	11
2.3	Riflessione dall'area illuminata	12
2.4	Distribuzione spettrale della luce e tipi di lampade	13
3	Conseguenze dell'inquinamento luminoso	17
4	Come ridurre l'inquinamento luminoso	23
5	Modelli teorici	25
5.1	Legge di Walker 1977	25
5.2	Modello di Garstang 1986	26
5.3	Modello ILLUMINA	30
6	Crescita dell'inquinamento luminoso	39
7	La situazione attuale	45
8	Monitoraggio	51
8.1	SQM	51
8.2	Stazione Meteorologica	53
9	Analisi dati	55
9.1	Copertura nuvolosa	55
9.2	Temperatura	67
9.3	Confronto copertura-temperatura	72
9.4	Luminosità del cielo	74
	Ringraziamenti	79
	Bibliografia	81

Introduzione

Capitolo 1

Luminosità del cielo notturno

Anche il cielo più scuro non è completamente buio ma ha una sua luminosità dovuta a due componenti principali: quella naturale e quella artificiale.

1.1 Luminosità naturale

La componente naturale del cielo notturno è data dall'unione di diversi contributi, alcuni di origine terrestre ed altri extraterrestre. I fenomeni di natura extraterrestre sono:

- * *Luce zodiacale*: luminescenza visibile specialmente nelle ore appena dopo il crepuscolo o poco prima dell'alba; appare come una striscia di luce sopra l'orizzonte che si estende attraverso il cielo lungo l'eclittica e che diventa più debole man mano che si guarda lontano dal Sole. Appena dopo il tramonto questa nube luminosa è più prominente, si attenua poi fino quasi a scomparire sotto l'orizzonte a causa della rotazione terrestre; a notte inoltrata rimane una sua traccia sotto forma di "ponte" estremamente debole che si illumina di nuovo in modo intenso nel primo mattino, appena prima dell'alba. I valori variano da un massimo di $130 \times 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ e un minimo ai poli dell'eclittica di $56 \times 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$. Le origini sono da ricercarsi nel Sistema Solare interno: la luce zodiacale si genera quando luce proveniente dal Sole viene diffusa verso la Terra da parte delle polveri interplanetarie; queste sono minuscoli grani di ghiaccio e polveri che circondano il Sole (continuamente forniti dalle comete e dalle collisioni di asteroidi) che si distribuiscono sullo stesso disco piatto su cui si trovano i Pianeti, il piano dell'eclittica (vedi immagine in Figura 1.1); la concentrazione massima si trova in due punti, uno sul Sole e l'altro in direzione opposta (Gegenschein).
- * *Luce stellare integrata*: è la componente di luce dovuta alle stelle della nostra galassia; è quindi concentrata in quella parte di cielo che interseca il piano galattico, e varia fortemente lungo questo a seconda della direzione di osservazione: da un massimo in direzione della costellazione del Sagittario di $250 \times 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ ad un minimo in direzione dell'Auriga di $20 \times 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$.
- * *Luce galattica diffusa*: è la componente prodotta dalla diffusione della luce da parte delle polveri galattiche; anch'esse sono concentrate maggiormente lungo la Via Lattea



Figura 1.1: L'immagine a sinistra mostra la stratificazione dei colori dell'airglow. A destra invece la foto cattura il cielo notturno che sovrasta il VLT nel deserto di Atacama; si può distinguere la Via Lattea, l'airglow, che compare all'orizzonte come delle strisce colorate, e la luce zodiacale.

ma contribuiscono molto debolmente al fondo cielo a causa del loro basso valore che varia tra i $6 - 14 \times 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$.

- * *Fondo cosmico integrato*: è dato dall'insieme degli oggetti cosmici che emettono nell'ottico, ma il loro contributo è trascurabile per la nostra trattazione.

I fenomeni di natura terrestre sono invece:

- * *Airglow*: bagliore diffuso dovuto ad un insieme di reazioni che avvengono nell'atmosfera tra gli 80-300 km; durante le ore diurne la luce ultravioletta del Sole distrugge, ionizza e ricombina le molecole e gli atomi della ionosfera scatenando una complessa catena di reazioni chimiche, che porta anche alla creazione di nuove molecole e all'emissione di fotoni (chemiluminescenza). Il risultato è un bagliore osservabile nel cielo notturno chiamato luminescenza notturna che diminuisce in modo esponenziale al passare delle ore dopo il crepuscolo fino a raggiungere un valore costante. Come mostra la Figura 1.1 la luce gialla è dovuta alla presenza attorno ai 90 km di uno strato di Sodio che eccitato irradia ad una lunghezza d'onda di circa 590nm; le altre emissioni a circa la stessa altezza sono dovute a reazioni chimiche che portano alla formazione ad esempio dell'ossidrile OH (emissione blu), o del diossido di azoto NO_2 e dell'atomo di ossigeno (verde); ad altezze superiori tra i 150-300 km la ionizzazione dell'ossigeno ad esempio provoca uno strato color rosso o verde a seconda della reazione; l'azoto invece uno strato color verde. Questi sono solo alcuni esempi. La forma, i colori e la frequenza variano fortemente in base al luogo, ora, temperatura, latitudine ma soprattutto all'attività solare. Ad esempio il VLT a Cerro Paranal si trova sotto la cosiddetta Anomalia Sud Atlantica: la diminuzione in intensità del campo magnetico terrestre porta alla formazione di una luminescenza più accentuata visibile nelle molteplici foto del sito (vedi la foto in Figura 1.1).
- * *Aurora*: fenomeno molto più luminoso nel visibile del nightglow, nasce dall'interazione tra le particelle cariche ad alta energia (elettroni e protoni) del vento solare che vengono spinte contro il campo magnetico terrestre a grande velocità, e gli atomi dei gas presenti negli strati più esterni dell'atmosfera, tra i 100-500 km. Queste collisioni producono energia generando luce di varie lunghezze d'onda. Per via della geometria del campo magnetico terrestre, le particelle solari vengono indirizzate verso i due

Sorgente	Zenith $10^{-6} \text{ cd m}^{-2}$	Zenith mag arcsec^{-2}	Minimo $10^{-6} \text{ cd m}^{-2}$	Massimo?? mag arcsec^{-2}
Luce zodiacale	91 (70-126)	22.71 (23.00-22.35)	56	23.23
Luce stellare integrata	77 (21-213)	22.89 (24.30-21.78)	21	24.30
Luce galattica	14	24.74	5.6	25.73
Airglow minimo	35	23.74	35	23.74
Fondo cosmico	< 0.7	> 28.00	< 0.7	> 28.00
Totale	217	21.76	118	22.42

Tabella 1.1: Valori tipici dei contributi naturali al background del cielo notturno nell'unità di misura utilizzata dall'autore, e in mag arcsec^{-2} , ottenute invece dalle prime tramite le formule di conversione calcolate da Gargstang (1989). (*Inquinamento luminoso e protezione del cielo notturno*, P.Cinzano, 1998)

poli magnetici della Terra, localizzando quindi il fenomeno in una zona ristretta del globo. Sono fortemente legati all'attività solare e comunque non regolari.

- * *Luna*: il suo illuminamento non è costante e dipende da diversi fattori; sono stati costruiti alcuni modelli che analizzano la luminosità del cielo notturno in funzione della sua magnitudine e fase, della sua posizione zenitale e della separazione angolare con la parte di cielo considerata, della distanza con la Terra ed il Sole, e della banda di osservazione. Complessivamente il suo contributo può far diminuire la luminosità del cielo di background fino a $20 \text{ mag arcsec}^{-2}$ nella banda V. Per questo motivo e per la sua forte variabilità, nello studio nella seconda parte verranno considerate solamente le notti di Luna Nuova.

Per avere un'idea indicativa dell'importanza di questi fenomeni viene riportata una tabella riassuntiva dei loro valori tipici di brillantezza.

La luminosità di fondo cielo tipica durante un'attività solare minima è data dalla combinazione dei due fenomeni più importanti sopraelencati, la luce zodiacale e l'airglow, che contribuiscono con il circa 60% e 40% rispettivamente; questa risulta essere pari a circa $22 \text{ mag arcsec}^{-2}$.

Naturalmente il fatto che la brillantezza del cielo a causa dell'inquinamento luminoso superi di molto i valori in tabella porta all'impossibilità di osservare il corrispondente fenomeno.

1.2 Luminosità artificiale

L'inquinamento luminoso è un'alterazione della quantità di luce naturale notturna dovuta all'immissione di luce artificiale al di fuori dagli spazi che è necessario illuminare.

Viene prodotto sia dall'immissione di luce diretta verso l'alto (tramite apparecchi mal progettati o mal posizionati), sia dalla diffusione di luce riflessa da superfici e oggetti illuminati con intensità eccessive.

Le conseguenze provocate sono di diversa natura: da quelle economiche, con uno spreco di energia elettrica e denaro, a quelle sulla salute e ambientali. L'aumento

della luminosità artificiale è causata da una parte dalla crescita della popolazione, accompagnata dalla costruzione di nuovi edifici residenziali e commerciali, dall'altra dalla necessità di prolungare le attività quotidiane anche dopo il tramonto del Sole.

Tra le maggiori fonti di inquinamento troviamo l'illuminazione stradale, quella degli impianti sportivi, delle vetrine, centri commerciali e insegne luminose, ma anche l'illuminazione di monumenti e delle facciate di edifici storici.

Questa continua immissione di luce ha prodotto una specie di velo sopra le nostre città che ci impedisce, dove più e dove meno, di vedere molte stelle e la nostra stessa galassia.

Per l'astronomia l'impatto è stato più tangibile e la costruzione di osservatori in siti privi e lontani dall'inquinamento delle città ne è una prova.

Già attorno al 1860-1870 alcuni astronomi segnalavano il disturbo dei lampioni dell'illuminazione stradale nelle osservazioni e come le stelle più deboli venissero coperte dalla luce proveniente dalle case e dalle strade. All'epoca si avviava al problema semplicemente ricercando siti per l'osservazione che fossero distanti dalle città e in aree buie; in tal modo però non si affrontò mai direttamente il problema fino agli anni '60, quando cioè ci si rese conto di come fosse aumentato in maniera esponenziale. Fu proprio nel 1958 che una città dell'Arizona promulgò la prima ordinanza per il controllo dell'illuminazione esterna; anche il comune di Asiago fece un'ordinanza nel 1963 per proteggere l'osservatorio, imponendo una riduzione dell'intensità dell'illuminazione pubblica e lo spegnimento totale delle luci pubblicitarie private in certi orari della notte.

Risalgono a questo periodo anche i primi studi delle brillanze del cielo notturno come quelle dell'astronomo Walker sullo stato del cielo in California, o quello in Italia da parte di diversi astronomi della specola vaticana, con lo scopo finale di trovare il miglior sito per il telescopio nazionale. Da qui in avanti molte società e organizzazioni, nazionali e internazionali, iniziarono ad analizzare la situazione di diverse città e regioni, promuovendo la conoscenza del problema e la divulgazione di suggerimenti o raccomandazioni per limitarne lo sviluppo, fino ad arrivare alla formulazione delle prime vere e proprie leggi e normative che ad ora sono state applicate un po' in tutto il mondo.

Basti pensare alla nostra regione Veneto, la prima in Italia ad emanare una legge specifica in materia, la legge regionale 27 giugno 1997 "Norme per la prevenzione dell'inquinamento luminoso", superata dalla nuova legge regionale del Veneto del 7 agosto 2009: "Nuove norme per il contenimento dell'inquinamento luminoso, il risparmio energetico nell'illuminazione per esterni e per la tutela dell'ambiente e dell'attività svolta dagli osservatori astronomici". La legge in questione riguarda sia gli impianti di illuminazione pubblica che quelli privati, sia in termini di adeguamento di quelli esistenti che di progettazione e realizzazione di nuovi.

Capitolo 2

Come si produce l'inquinamento luminoso

La luce, dopo essere stata emessa da una certa sorgente o impianto, si disperde nel cielo tramite tre diversi fenomeni: l'irraggiamento diretto in cielo, la diffusione in atmosfera, la riflessione e diffusione da parte delle superfici illuminate.

Per calcolare la quantità totale che una o più città disperdono sono stati costruiti diversi modelli teorici, partendo da diverse assunzioni, come ad esempio che la quantità totale di luce sia funzione della popolazione; tra questi ricorderemo ed analizzeremo i risultati nel Capitolo 5 di Walker (1977), di Garstang (1986,1989) e il modello più recente ILLUMINA di Aubè (2005).

2.1 Emissione diretta di luce sopra l'orizzonte

L'emissione diretta verso la verticale viene diffusa dall'atmosfera per poi perdersi nello spazio, contribuendo per lo più ad aumentare l'inquinamento luminoso a livello locale.

E' invece l'emissione diretta verso l'orizzonte (la cosiddetta emissione a piccoli angoli) la più pericolosa e dannosa, arrivando a propagarsi molto lontano dalla sorgente, fino anche a 200 km di distanza; in questo tragitto la luce, attraversando un maggiore spessore atmosferico rispetto a quella che si propaga lungo la verticale ad esempio, viene quasi integralmente diffusa in atmosfera. E' stato infatti stimato come Milano contribuisca all'inquinamento luminoso di Asiago per il 3%.

A conferma di ciò Cinzano ha applicato i modelli introdotti e sviluppati da Garstang per ricavare l'importanza relativa tra le emissioni verso l'orizzonte e quelle verso la verticale a diverse distanze zenitali e a diverse distanze dal centro della città sorgente. Si riportano i risultati in Figura 2.1.

La luminosità prodotta dall'emissione verso la verticale è importante solamente all'interno della città. Allontanandosi man mano dal centro, il rapporto b_H/b_L diminuisce rapidamente, ciò significa che la luminosità dovuta ad emissioni verso l'orizzonte diventa sempre più importante; la pendenza maggiore si ha se osserviamo verso lo zenit: ad una distanza di circa 40 km il contributo di luce emessa tra i 45° e la verticale è circa 1/100 di quella emessa entro i 45° .

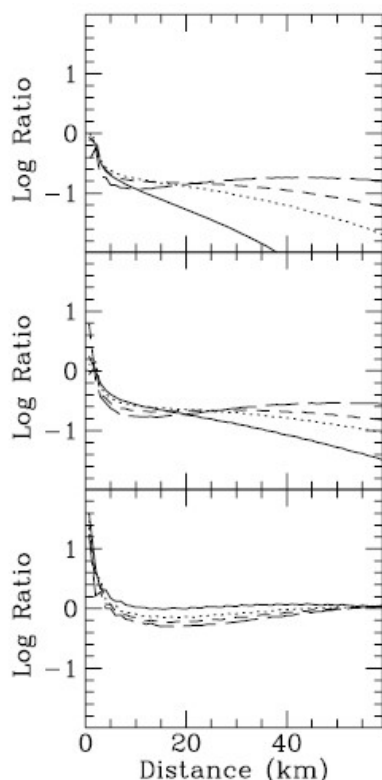
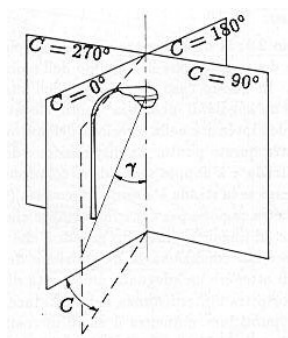


Figura 2.1: In ordinata il logaritmo del rapporto b_H/b_L tra la luce b_H artificiale emessa verso l'alto tra un angolo θ_0 e la verticale e b_L tra l'orizzonte e l'angolo θ_0 . Nel pannello in alto l'angolo θ_0 è di 45° , quello a metà 30° , quello in fondo 10° . La linea solida si riferisce allo zenith, quella puntinata ad un angolo zenitale di 20° , quella a trattini di 45° e quelle a tratti più lunghi di 60° . (*The artificial sky luminance and the emission angles of the upward light flux*, Cinzano et al., 1998)

All'interno di un impianto di illuminazione è l'armatura (costituita dal supporto, dal guscio di protezione e dal sistema ottico) che produce una determinata distribuzione dell'intensità luminosa nello spazio e quindi la responsabile dell'eventuale dispersione di luce.

Facciamo una piccola premessa. Una delle diverse possibili rappresentazioni della luce emessa da un impianto sono le curve fotometriche, o curve C/γ .



Consideriamo il fascio di piani che hanno come generatrice la verticale passante per la sorgente luminosa. Ogni piano è individuato dall'angolo C che esso forma con la parallela all'asse stradale o con un'altra retta di riferimento del piano orizzontale. L'angolo γ invece è quello tra la retta verticale che passa per la sorgente e la direzione che ci interessa. Ogni grafico è definito dal valore di C . I piani di maggior interesse per l'illuminazione stradale sono quelli con $C = 0^\circ$, parallelo all'asse stradale, e quello $C = 90^\circ$, perpendicolare all'asse stradale.

Analizzando le curva per $C = 0^\circ$, un buon impianto dovrebbe emettere ad angoli piuttosto ampi, in modo tale che il massimo di emissione arrivi e venga riflesso dal

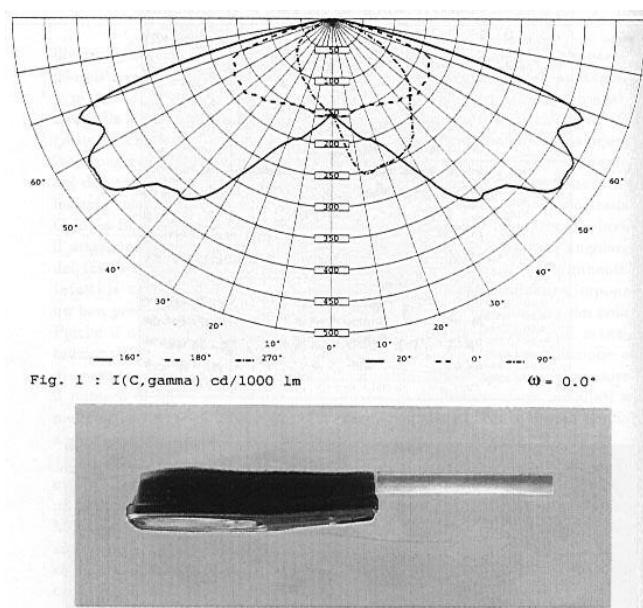


Figura 2.2: Esempio di lampada full-cut-off e curva fotometrica corrispondente per $C = 0^\circ$.

manto stradale nella direzione dell'automobilista, in questo modo saranno necessari un minor numero di punti luce, con quindi minori costi di installazione e manutenzione.

Un'altra caratteristica fondamentale che deve avere è che esista un angolo limite oltre il quale l'intensità emessa dal sistema ottico vada bruscamente a zero; infatti se oltre un certo angolo l'intensità non diminuisce l'automobilista ne verrebbe abbagliato e parte della luce andrebbe dispersa inutilmente in cielo.

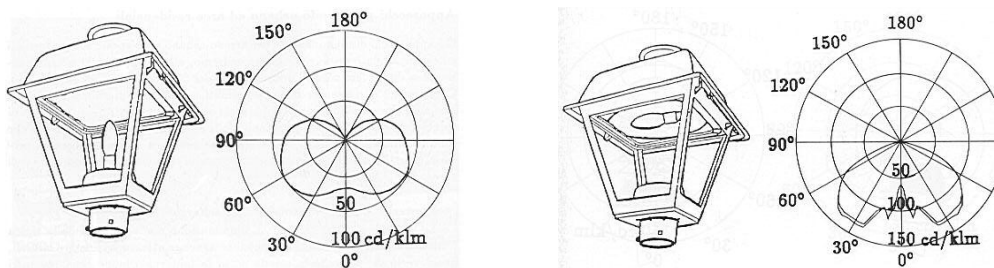
Per $C = 90^\circ$ naturalmente la distribuzione di luce deve essere tale da coprire tutta la larghezza della strada con sufficiente intensità ma ridursi a zero rapidamente appena oltrepassato il bordo sempre per evitare dispersione.

Gli apparecchi che soddisfano queste caratteristiche sono le lampade totalmente schermate (full-cut-off o fully shielded) con vetro piano come quella mostrata in Figura 2.2.

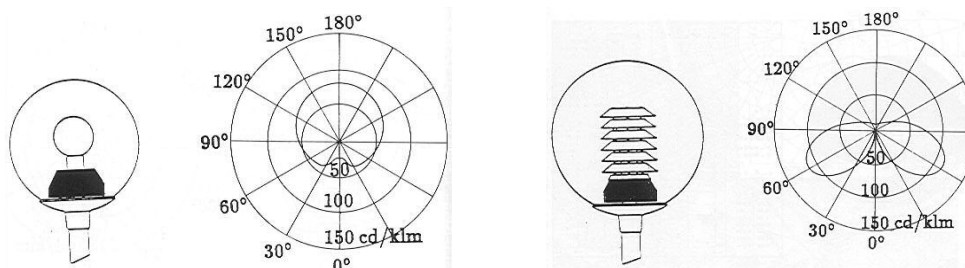
Naturalmente bisogna tener conto anche di come viene montato l'apparecchio, perché l'uso di bracci inclinati rispetto il piano orizzontale del suolo, vanificano anche l'uso di lampade ottime come quelle full-cut-off: come detto in precedenza basta solo una piccola inclinazione dell'ottica di 5° per aumentare notevolmente l'inquinamento luminoso.

Di apparecchi ne esistono di diverse forme e tipologie, e tutt'ora ne sono utilizzati di più o meno inquinanti. Pensiamo ad esempio alle lampade e alle sfere non schermate molto utilizzate nell'arredo urbano, estremamente dispersive che inviano verso il cielo il 35-45% del loro flusso per le prime e il 50-60% della loro luce per le seconde. Certo sono state adottate delle modifiche affinché il loro potere inquinante diminuisca ma rimane tuttavia non trascurabile; per gli apparecchi a lanterna viene montata la lampadina all'interno del tettuccio, in modo da tagliare l'emissione di luce per angoli grandi rispetto la verticale, anche se non è tuttavia possibile eliminare il fatto che la lanterna non illumina bene la zona sottostante a causa dell'ombra che il sostegno fa sulla superficie stradale.

I globi invece sono e rimangono apparecchi con caratteristiche completamente oppo-



ste a quelle richieste per una corretta illuminazione: il sostegno fa ombra sulla strada e la luce viene irradiata direttamente verso il cielo costituendo uno spreco elevatissimo. Inoltre per ottenere livelli di luminanza accettabili occorre utilizzare lampade con potenze molto elevate, il che aumenta ancora di più la quantità di luce dispersa. Usare le alette riduce notevolmente il flusso emesso sopra l'orizzonte ma rimane rilevante. Rappresentano insomma il perfetto controesempio di una buona e intelligente illuminazione.



2.2 La propagazione della luce nell'atmosfera

Quando pensiamo all'inquinamento luminoso ci viene in mente quella luminescenza che si forma attorno alle lampade e che si vede sopra le nostre città dovuta alla diffusione dei fotoni da parte delle particelle presenti nella nostra atmosfera. Per capire la fisica dietro a questo fenomeno visivo ricordiamo brevemente quali sono le particelle atmosferiche che lo scaturiscono.

Entro i primi 30km di altezza troviamo il 99% della massa globale dell'atmosfera, tra la quale il 99% del vapor d'acqua; la composizione dell'aria è variabile in generale a seconda della quota considerata, nella bassa atmosfera una parte formata per il 99,997% da azoto, ossigeno e argo rimane pressoché costante al variare dell'altezza mentre la parte formata da vapore acqueo, anidride carbonica, anidride solforosa e ozono è variabile nello spazio e nel tempo. Queste rappresentano la componente formata da molecole gassose.

Ma oltre a queste nell'atmosfera sono in sospensione particelle liquide, solide o miste che vengono chiamate aerosol. La loro concentrazione decresce con l'altitudine e con la distanza dalle regioni più densamente popolate; infatti la loro formazione è legata alla brusca condensazione dei vapori prodotti da combustioni naturali (di origine ad esempio vulcanica o anche meteoritica) o prodotte dall'uomo (come le emissioni industriali). Le polveri sottili prodotte dalle combustioni industriali combinate con la nebbia co-

stituiscono quell'aerosol che chiamiamo smog, una forma di inquinamento atmosferico. Qualche esempio tipico di aerosol naturali sono le nuvole, la nebbia, la foschia, il pulviscolo atmosferico; altri tipi sono quelli prodotti dalle bombolette spray.

Gli effetti sulla propagazione della luce da parte di queste due classi principali di particelle sono i fenomeni di diffusione (scattering) e di assorbimento, che tolgono energia ad un fascio di luce secondo quel processo chiamato estinzione.

2.2.1 Estinzione atmosferica

Per descrivere la quantità di luce che viene assorbita nell'attraversare un mezzo si può usare la legge empirica di Beer-Lambert-Bouguer la quale afferma che l'intensità della luce che attraversa tale strato decresce in maniera esponenziale con la distanza percorsa nel mezzo stesso.

Supponiamo di avere un fascio di intensità I_0 che viaggia lungo l'asse x ; l'attenuazione di intensità dI è proporzionale all'intensità stessa I , al percorso infinitesimo effettuato dx e ad un coefficiente, chiamato coefficiente lineare di assorbimento del mezzo, dipendente dalla lunghezza d'onda del fascio

$$dI = -\alpha_\lambda I dx$$

che integrata porta facilmente alla legge

$$I = I_0 e^{-\alpha_\lambda x}$$

con x distanza totale percorsa nell'atmosfera. Ora se assumiamo che questa sia un miscuglio di molecole ed aereosol, quando la luce la attraversa sarà soggetta ad una estinzione e diffusione nell'ottico e nell'infrarosso dovuta a due fenomeni principali: lo scattering di Rayleigh per quanto riguarda la diffusione causata dalle molecole (che hanno dimensioni minori alla lunghezza d'onda del fascio) ed allo scattering di Mie per quanto riguarda gli aereosol (che hanno invece grandezze paragonabili o maggiori alla lunghezza d'onda del fascio).

Diffusione di Rayleigh

Consideriamo quindi le particelle con piccole dimensioni rispetto alla lunghezza d'onda della luce visibile; la relazione

$$I(\theta) = k I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{\lambda^4 R^2}$$

ci dà l'intensità della radiazione dovuta alla diffusione di Rayleigh; questa come si nota è funzione dell'intensità del fascio incidente, dell'angolo theta di diffusione tra il fascio incidente e la direzione di osservazione (che sarà quindi massima lungo la direzione incidenza e minima a 90°), della lunghezza d'onda (con una dipendenza inversa alla quarta: vuol dire che la luce blu viene diffusa maggiormente rispetto a quella rossa), della distanza dall'osservatore e da una costante k in cui vengono inglobate tutte le costanti e quei fattori da considerare a seconda che si tratti di particelle (diametro e indice rifrazione) o di molecole (polarizzabilità).

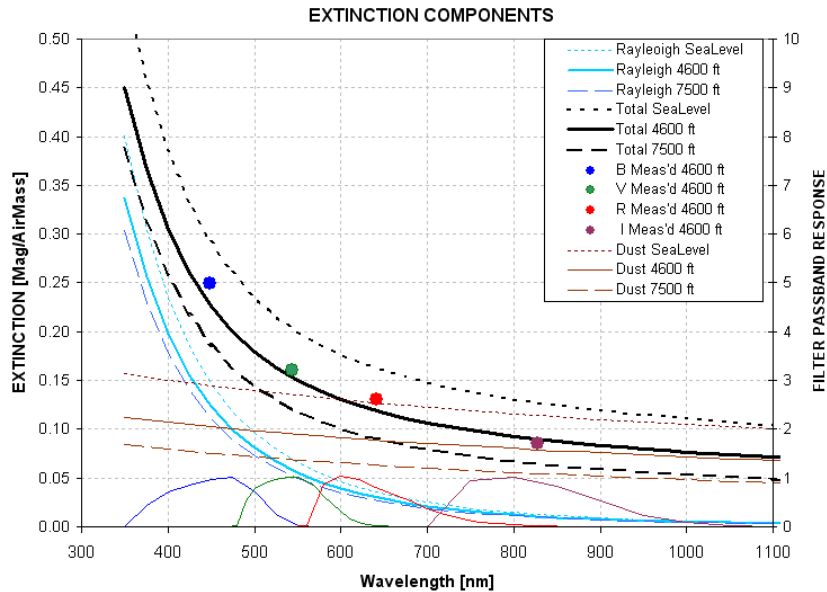


Figura 2.3: Nella figura soprastante notiamo come lo scattering di Mie (linee rosse) mostra un andamento quasi costante con la lunghezza d'onda, mentre lo scattering di Rayleigh (linee azzurre) è caratterizzato da una curva molto più ripida; la linea nera invece combina le due ed è l'assorbimento ottico dell'atmosfera totale in condizioni di atmosfera pulita e priva di nubi; si nota come sia maggiormente influenzato dallo scattering di Rayleigh rispetto allo scattering di Mie specialmente alle lunghezze d'onda più brevi. Tutte le curve sono rappresentate per diverse altitudini: livello del mare, 1402m (l'Osservatorio di Cima Ekar si trova a 1366m) e 2286m. (*Exoplanet observing for amateurs*, Bruce L. Gary, 2007)

Scattering di Mie

Lo scattering di Mie è dovuto a particelle di dimensione paragonabili o superiori alla lunghezza d'onda del fascio incidente visibile (aerosol); la sua soluzione è più complessa, ma in prima approssimazione si può considerare che vari in modo quasi costante con la lunghezza d'onda. E' il responsabile dell'alone luminoso bianco attorno al sole quando sono presenti molte polveri sottili in aria e della luce bianca della nebbia e della foschia.

La figura 2.3 riporta un confronto tra i due scattering in funzione della lunghezza d'onda e per diverse altitudini del sito di osservazione (legate quindi allo spessore dell'atmosfera sovrastante).

2.3 Riflessione dall'area illuminata

Un'altra componente della luce diffusa è dovuta a quella frazione che viene riflessa dalle superfici illuminate (inquinamento da luce indiretta) come il manto stradale, altri tipi di pavimentazione, le pareti di edifici o oggetti e monumenti.

Se idealmente una superficie perfettamente diffondente riemette la luce uniformemente in tutte le direzioni, e una superficie riflettente tende a riemettere tutta la luce con un certo angolo rispetto alla verticale uguale all'angolo dei raggi incidenti, in genere le superfici reali si comportano in modo intermedio.

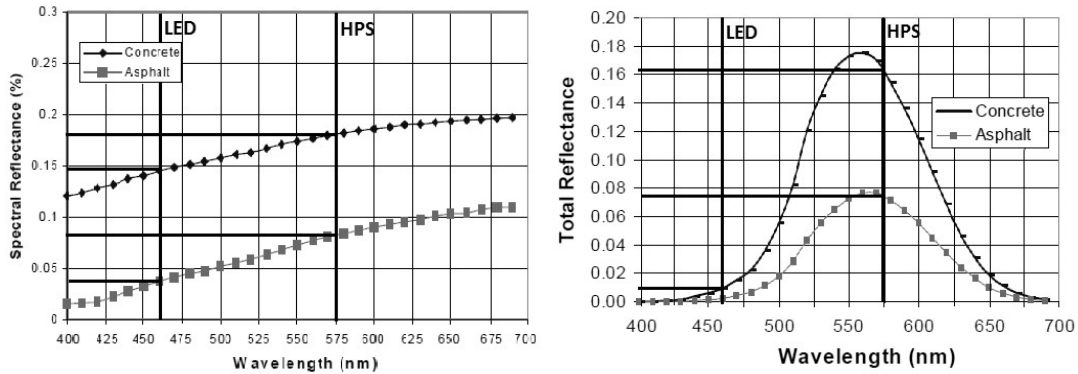


Figura 2.4: Il grafico a sinistra mostra la riflettanza spettrale (coefficiente adimensionale compreso tra 0 ed 1 dato dal rapporto tra la irradianza incidente e quella riflessa a ciascuna lunghezza d'onda) di asfalto e calcestruzzo. Le curve a destra sono state ottenute considerando la sensitività spettrale dell'occhio umano. (*Influence of pavement reflectance on lighting for parking lots*, W. Adrian, R. Jobanputra, 2005)

Se definiamo il fattore di riflessione medio come il rapporto tra la luminosità media di una superficie (in lm/m^2) e l'illuminamento medio (in lux), cioè in pratica la percentuale di flusso luminoso riemesso, otteniamo ad esempio un valore dal 50% per l'intonaco chiaro al 25% per quello scuro, il 40% per il cemento, fino al 15-20% per l'asfalto; in caso di neve il fattore di riflessione può superare il 60%. Ora tenendo conto che mediamente il rapporto tra il flusso luminoso che cade sulla pavimentazione rispetto a quello totale emesso dalle sorgenti luminose, è compreso tra il 20%-45%, nel caso di pavimentazioni stradali, il rapporto tra il flusso luminoso che finisce in cielo rispetto a quello totale emesso dalla lampada è dell'ordine del 3%-9%; nei peggiori dei casi possiamo arrivare anche al 20%.

Considerando l'insieme di tutte le superfici illuminate in una città si ottengono valori del 15% circa, numero che viene preso in considerazione nei modelli di Garstang. Anche se questa percentuale è solitamente minore di quella emessa direttamente in cielo, è comunque una quantità non trascurabile.

Facciamo una considerazione in merito alla luce bianco-blu dei LED; nonostante le leggi prevedano dei valori minimi di luminanza e di uniformità, spesso non si tiene conto del fatto che non tutta la luce viene riflessa allo stesso modo: in Figura 2.4 si nota bene la differenza tra la riflettanza spettrale nella zona di massima emissione del sodio (linea rossa) rispetto a quella dei LED (linea azzurra): per gli asfalti si riduce alla metà. Nella figura a sinistra si nota ancora meglio la differenza: il sodio emette dove l'asfalto riflette meglio la luce percepita dall'occhio umano, mentre le lampade a forte componente blu emettono dove riflette molto meno. Meno luce riflessa vuol dire meno luminanza e quindi minor visione della strada.

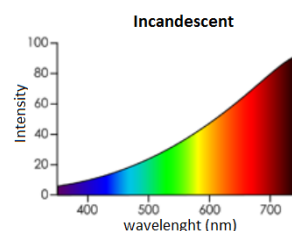
2.4 Distribuzione spettrale della luce e tipi di lampade

La luce dispersa nel cielo può essere più o meno inquinante dal punto di vista astronomico a seconda della sua distribuzione spettrale. Inoltre ogni lampada possiede una

propria efficienza luminosa cioè, per una data potenza assorbita, produce una determinata quantità di luce. Bisogna anche considerare, a seconda dell'ambiente da illuminare, la resa cromatica (ossia la possibilità di percepire i colori) e il comfort visivo. Elenchiamo di seguito i diversi tipi di lampade e le loro caratteristiche principali.

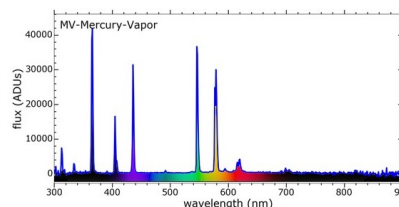
Ad incandescenza

Viene fatta passare corrente in un filamento di tungsteno dentro un'ampolla di vetro sotto vuoto o con gas inerti rendendo tale filamento incandescente; la luce prodotta approssima la distribuzione di corpo nero a 2700K e per questo emette in tutto lo spettro visibile e nelle bande vicine diventando molto inquinante; sono lampade che non hanno comunque potenze ed efficienze elevate e la loro vendita se non per usi specifici è stata messa al bando dall'Unione Europea.



Ai vapori di mercurio HQL

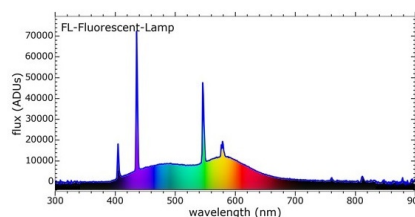
Questa, e come le lampade seguenti, appartiene alla famiglia delle lampade a scarica, cioè quelle il cui funzionamento è basato sull'emissione luminosa per luminescenza da parte di un gas ionizzato; è costituita quindi da una ampolla e da almeno due elettrodi tra i quali avviene la ionizzazione del gas inerte contenuto, rilasciando fotoni.



Quelle ai vapori di mercurio sono in particolare poco efficienti e lente nell'accensione; la loro emissione avviene principalmente nell'ultravioletto e quelle a bassa pressione sono dannose per esposizione diretta e vengono usate per sterilizzare ambienti e oggetti. Quelle ad alta pressione sono state messe al bando da una direttiva del parlamento europeo in quanto estremamente inquinanti nello smaltimento.

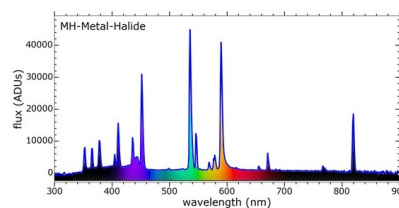
A fluorescenza

Sono lampade costituite da gas nobili e vapori di mercurio in cui l'ampolla però viene ricoperta internamente di polvere fluorescente in modo che la luce venga ripartita nello spettro visibile. Sono efficienti ma inquinanti dal punto di vista astronomico.



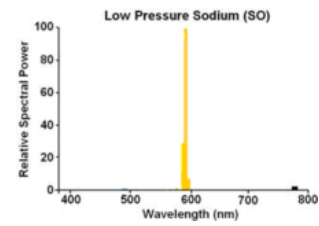
Agli alogenuri metallici HQI

Evoluzione delle lampadine ai vapori di mercurio; come dice il nome sono stati introdotti nel tubo di scarica ioduri metallici (sodio, tallio, indio, disprosio, olmio, cesio, tulio) per aumentarne l'efficienza, migliorarne la distribuzione spettrale e la resa cromatica. La luce emessa è infatti bianca e per questo considerate altamente inquinanti per le osservazioni astronomiche; il loro uso è strettamente regolamentato e limitato ad effettiva necessità (come l'uso negli impianti sportivi).



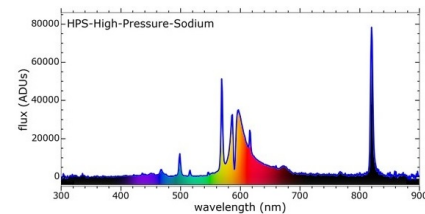
Al sodio a bassa pressione LPS

La scarica avviene in un ambiente di gas e neon che riscaldandosi fa sì che il sodio evapori ionizzandosi; l'emissione si limita al doppietto del sodio a 5890 e 5896 Å dove l'occhio umano raggiunge la massima sensibilità e ad altri due doppietti a 5683-5688 Å e 6154-6161 Å; sono molto efficienti ma hanno una luce monocromatica di colore giallo-arancio che impedisce di percepire i colori. Dal punto di vista astronomico sono da preferirsi fortemente per l'illuminazione stradale in quanto il disturbo è concentrato nei doppietti del sodio ed è quindi eliminabile con un filtro.



Al sodio ad alta pressione HPS

Viene creata una pressione maggiore degli atomi di sodio in modo da ottenere un'efficienza minore ma un'emissione giallo-oro più larga tra 5400 e i 6500 Å che permette una maggiore distinzione dei colori; costituiscono quindi un buon equilibrio tra la resa cromatica e il potere inquinante.



LED

Un LED (light emitting diode) è un semiconduttore che converte energia elettrica in luce visibile sfruttando il fenomeno dell'elettroluminescenza; l'emissione di luce è causata dalla ricombinazione di elettroni e lacune in un dato materiale tra un anodo e un catodo ed il colore dell'emissione dipende dal materiale utilizzato (rossa, verde, blu, ambra, bianca...); hanno una durata di vita maggiore rispetto le precedenti tipi di lampade e dimensioni e peso ridotti che permettono di progettare apparecchi molto più compatti; per quanto riguarda altre caratteristiche come la loro eco-sostenibilità e la loro maggior efficienza sono incorso tutt'ora dei dibattiti.

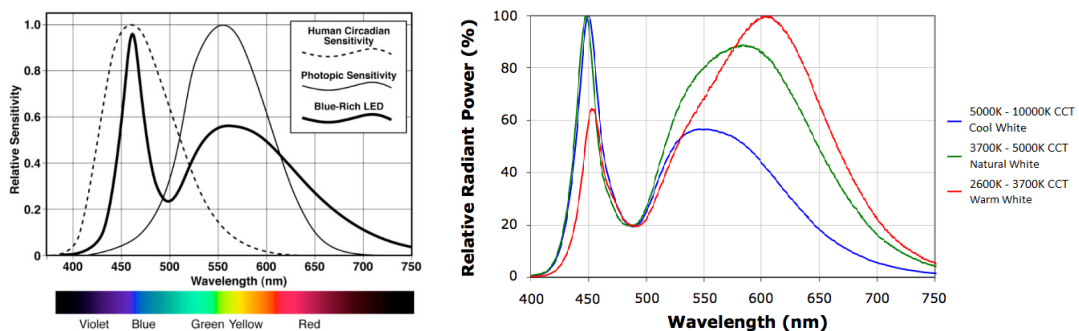


Figura 2.5: A destra: confronto tra l'emissione delle lampade a LED bianche da 5000-6000K e la curva di sensibilità spettrale notturna dell'occhio che ha picco attorno ai 550nm per luminanze usate definite da legge. A sinistra: spettri di diversi tipi di LED; man mano che la temperatura di colore diminuisce, il picco di emissione risulta a lunghezze d'onda più calde e confortevoli. (*International Dark-Sky Association*)

I primi LED erano disponibili solo nel colore rosso e soltanto negli anni novanta la loro efficienza come la gamma di colori (compreso il blu) è aumentata. Ma sono proprio i LED a luce blu -bianca ad essere al centro di tante controversie.

L'emissione del LED, come si nota nella Figura 2.5 a sinistra, ha un picco intorno a 460 nm, ed è caratterizzato da una componente fortemente blu, che risulta però molto lontana dalla curva tipica della visione umana notturna centrata a 550 nm; le temperature di colore sono quindi estremamente elevate (da 4000K fino anche a 7000K). Solo negli ultimi anni hanno iniziato ad essere commercializzati LED più caldi e gradevoli di colore ambrato con temperature di colore anche inferiori ai 3000K che potrebbero porre fine alle controversie sull'uso dei dannosi led a luce bianca-blu.

Capitolo 3

Conseguenze dell'inquinamento luminoso

Merita un capitolo dedicato ai molteplici effetti negativi che l'inquinamento luminoso produce e come l'emissione verso il blu sia in particolare sotto accusa.

Culturale

L'uomo sta sempre più perdendo il contatto diretto con il cielo: si pensi ad esempio agli abitanti di grandi città che non riescono a vedere le stelle ed ai bambini che qui vivono e vedono le costellazioni soltanto sui libri di scuola.

Scientifico

Le osservazioni astronomiche vengono sempre più ostacolate dalla brillantezza artificiale del cielo notturno portando alla necessità di percorrere distanze sempre maggiori per raggiungere i pochi siti rimasti idonei sulla terra.

In particolare sorgenti con componenti bianco-blu (come i LED a 450 nm) diffondono la luce il triplo rispetto a sorgenti con componente verso il giallo (come le lampade al sodio ad alta pressione a 590 nm) a causa della dipendenza inversa alla quarta della diffusione di Rayleigh rispetto la lunghezza d'onda del fascio luminoso.

Sanitario

Gli effetti sulla salute dell'uomo è legato sia alle intensità usate, che alla durata di esposizione ma soprattutto al tipo di lampada; gli studi a riguardo sono stati affrontati solamente nell'ultimo decennio e per questo i risultati sono ancora poco noti al gran pubblico. In particolare sotto accusa sono i LED a luce bianca.

E' stato recentemente scoperto un fotorecettore presente nel nostro occhio responsabile della sensibilità alla luce blu; è questo che regola i ritmi circadiani e in particolar modo la produzione di melatonina, prodotta in assenza di luce dalla ghiandola pineale. Nel grafico a destra in Figura 2.5 si vede come il picco di emissione nel blu dei LED usati per illuminazione esterna coincida proprio con la sensibilità massima del nostro corpo ('circadian sensitivity').

Della riduzione di melatonina sono responsabili due variabili: l'intensità e la lunghezza d'onda della luce; per la prima è stato dimostrato che basta una luminanza di 1,5 *lux* per disturbare il ciclo circadiano e delle misurazioni fatte da Aubé per la città di

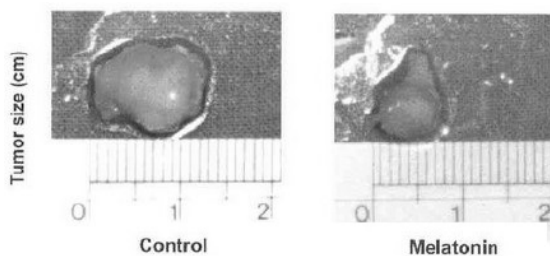
Tipo di lampada	Energia relativa alle HPS, nella banda 440-500 nm	Effetto nella soppressione di melatonina rispetto alle HPS
HPS	1	1
LPS	0.002	0.3
Ioduri Metallici MH	2.7	3.4
LED Natural White	7.0	5.4
Incandescent 65W	2.5	2.5

Tabella 3.1: *Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility*, F. Falchi et al., 2011

Sherbrooke mostra come frequentemente nelle camere dei cittadini entri una luminanza di circa 2 lux. Per la seconda un altro studio ha mostrato come l'esposizione alla luce monocromatica a 460 nm abbia soppresso la secrezione di melatonina, mentre sotto la stessa intensità, tempi di esposizione ma alla lunghezza d'onda di 550 nm tali effetti non sono stati osservati. Non solo i LED bianchi ma anche l'esposizione alle lampade a fluorescenza a 6500K inducono una forte soppressione di melatonina.

Ora la melatonina è un ormone antiossidante e anticancerogeno, le conseguenze quindi ad una sua inibizione possono essere pesanti; molteplici studi recenti dimostrano che le conseguenze possono andare dai disturbi del sonno, disordini metabolici, disturbi coronarici, fino a favorire lo sviluppo dei tumori al seno e alla prostata.

La figura a lato (*Luce blu: effetti sull'uomo e l'ambiente*, Associazione Cielo Buio) mostra la differenza tra due tumori, uno "trattato" con melatonina e l'altro no, la differenza è evidente.



Per avere un'idea di come le lampade bianche a LED sopprimano maggiormente la produzione di melatonina rispetto ad altre più comuni vengono

riportati i dati ottenuti da uno studio recente sul confronto di diverse lampade e il loro livello di soppressione di melatonina in una determinata banda nella tabella sovrastante: quelle LED risultano cinque volte più efficaci rispetto a quelle al sodio ad alta pressione.

Parlando anche di comfort visivo la luce blu dei LED risulta essere la più disturbante e spiacevole. In merito si può analizzare la curva di Kruithof (Figura 3.1); questa è una rappresentazione cartesiana fra illuminamenti e temperatura di colore che mostra la piacevolezza di visione che si ottiene da una data sorgente luminosa; nel cono colorato rientra la luce gradevole all'occhio umano, mentre le parti esterne rappresentano la luce fastidiosa. La linea orizzontale rossa identifica un illuminamento tipico notturno fra 10 e 20 lux che sono proprio quelli tipici di strade come le provinciali o le statali; ecco quindi che la luce più confortevole è quella con tonalità più calda con temperatura di colore inferiore ai 2000K (tipo il sodio ad alta pressione), poi sempre a bassi illuminamenti la sorgente luminosa artificiale che segue è quella delle sorgenti agli ioduri metallici con temperature di colore fra 2800K e 3200K, e più ci si allontana verso destra, verso

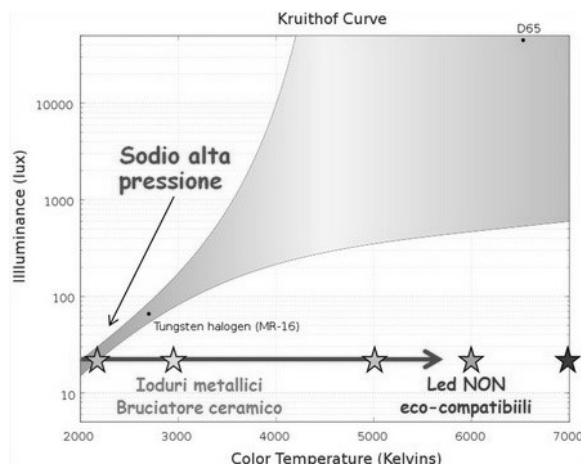


Figura 3.1: Curva di Kruithof e posizione delle varie lampade per un illuminamento di 20 lux. (*Curva di Kruithof e luce confortevole*, Associazione Cielo Buio, 2011)

luci decisamente poco confortevoli, e più ci si avvicina alla luce delle sorgenti LED da 4000K, 5000K, 6000K, 7000K.

I LED hanno anche un'elevata radianza; se osservati direttamente hanno una maggiore probabilità di abbagliamento rispetto ad altre lampade, che anche se non comporta gravi danni diretti per la salute, questa diminuzione della funzionalità visiva può invece portare a rischi per la sicurezza e possibili incidenti.

Altra problematica riguarda la visione di persone con età superiore ai 60-65 anni; in Figura 3.2 si mostra infatti che per queste età l'occhio umano ha una risposta alla luce con componente blu (linea azzurra) molto meno della metà rispetto alla luce gialla del sodio ad alta pressione (linea rossa) e che viene trasmessa comunque metà della luce rispetto ad un 20enne.

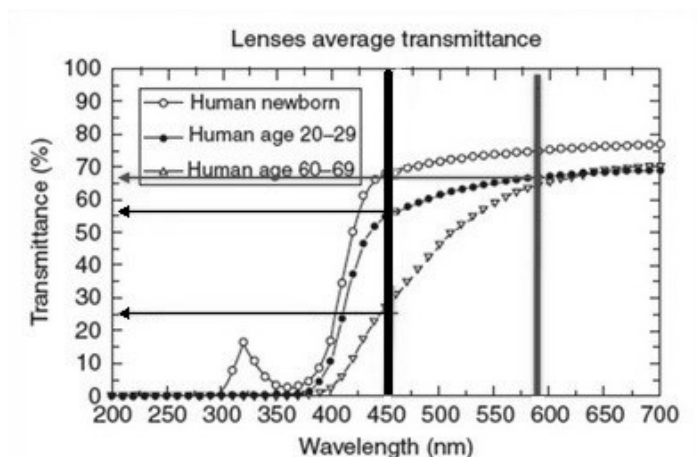


Figura 3.2: Trasmittanza media dell'occhio umano a diverse età in funzione della lunghezza d'onda del fascio di luce; la linea rossa mostra che nella tipica emissione delle lampade al sodio il cristallino trasmette circa il 65% della luce ed è indipendente dall'età; per i LED si riduce al 55% per persone da 20 a 29 anni, e diminuisce al 25% della trasmissione in persone ultrasessantenni. (*Circadian Rhythms: Influence of Light in Humans*, S. W. Lockley, 2010)

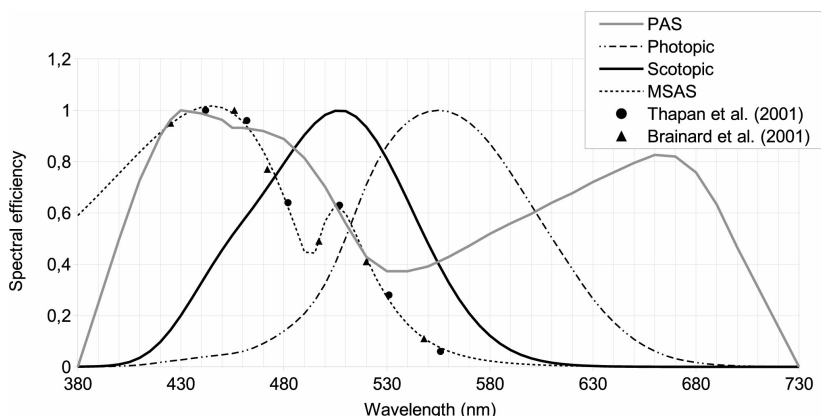


Figura 3.3: Efficienza spettrale di alcuni fenomeni biologici come la sensibilità fotopica e scotopica dell'occhio umano, la soppressione di melatonina (MAS), la fotosintesi clorofilliana. (*Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and Star.*, M. Aubé, 2013)

Ecologico

Sono centinaia gli studi che documentano gli effetti negativi che la luce artificiale ha sull'ecosistema.

Dalle alterazioni dei cicli circadiani al disorientamento, all'influenza nel foraggiamento, nella riproduzione e accoppiamento, nella migrazione e nella comunicazione, per la fauna, all'aumento dell'attività di fotosintesi, alterando la germinazione e la fioritura, per la flora.

Pensiamo ai lepidotteri, coleotteri, e moltissimi altri insetti che utilizzano la Luna come riferimento per orientarsi e che vengono alterati a causa della luce artificiale proveniente dalle innumerevoli fonti luminose che si trovano ad esempio lungo le strade; ma non solo il disorientamento ma anche la morte degli individui che attratti muoiono bruciati. Anche questo problema è stato osservato maggiormente con lampade a componente blu.

Lo stesso vale per molte specie di uccelli che anch'essi vengono disturbati nelle loro migrazioni notturne; e quanti uccelli vengono attirati dai fari delle macchine morendo investiti, o quanti attirati dalle luci dei grattacieli muoiono scontrandosi sulle vetrate. Le stesse abitudini di vita e di caccia ne sono influenzate: specie diurne come le rondini che si cibano di notte sfruttando il potere attrattivo dei lampioni per gli insetti; rapaci diurni che diventano notturni, appollaiati in prossimità di forti fari che attirano pipistrelli e uccelli migratori notturni.

Le tartarughe marine appena uscite dalle uova, scambiano le sorgenti artificiali in prossimità della spiaggia con il riflesso delle stelle sul mare e dirigendosi nella direzione sbagliata muoiono dissecate durante il giorno. La stessa deposizione di uova, che avviene di notte, si riduce notevolmente, perché il numero di tartarughe che si annidano sono significativamente inferiori rispetto alle condizioni di buio (nuovamente l'influenza maggiore si ha per luci a componente blu mentre si è dimostrato che l'uso di lampade al sodio ad alta pressione non porta a sostanziali differenze).

Le rane come molti altri animali rimangono abbagliate con rapidi aumenti di luce (come per i fari delle auto) e il tempo di recupero può essere da minuti a ore, morendo spesso investite dalle automobili.

Le lucciole femmine attirano i maschi fino a 45 metri di distanza con dei flash bioluminescenti che però vengono ridotti dalla presenza di luce artificiale, disturbando così la comunicazione tra i due generi e la loro proliferazione.

Pensando invece alla flora il problema centrale è l'alterazione del ciclo della fotosintesi clorofilliana; prolungando il giorno artificialmente il periodo vegetativo viene favorito, con il risultato di vedere rami più folti e rigogliosi in prossimità delle sorgenti luminose, e osservare alcune specie (come alcune erbacce lungo le strade) fiorire in pieno inverno.

Economico

L'inquinamento luminoso infine costituisce un inutile spreco energetico e di risorse, oltre a naturalmente di denaro.

Capitolo 4

Come ridurre l'inquinamento luminoso

Il contenimento dell'inquinamento luminoso consiste nell'illuminare razionalmente senza disperdere luce verso l'alto, utilizzando impianti e apparecchi correttamente progettati e installati, e nel dosare la giusta quantità di luce in funzione del bisogno, senza costosi e dannosi eccessi.

In primo luogo bisogna evitare di illuminare aree non necessarie o utilizzare sistemi per la riduzione di intensità in alcune ore della notte o dei rilevatori di presenza. Per questo motivo può essere anche utile spegnere o limitare le luci per i monumenti e gli edifici storici ad una certa ora.

Non sovrailluminare usando quantità di luce superiori al necessario e rispettare gli illuminamenti indicati dalle norme tecniche.

Fondamentale è l'angolo di emissione: usare lampade totalmente schermate, con vetro piano, orientate in modo che la luce emessa sopra l'orizzonte sia nulla, e in caso di illuminazione di monumenti o edifici storici preferire proiettori dall'alto verso il basso o che consentano un buon controllo del fascio di luce tagliando l'emissione oltre certi angoli.

Usare lampade efficienti ma che abbiano il minimo contenuto di luce con lunghezza d'onda inferiore a 540 nm, che viene maggiormente diffusa, interferisce con il ritmo circadiano, è fonte di luce sgradevole per l'occhio umano ed abbagliamento, influisce negativamente sulla flora e la fauna. I LED se usati in modo corretto portano comunque ad un risparmio energetico, ma bisognerebbe preferire l'uso di quelli con temperature di colore inferiore ai 3500K o quelli che di recente diffusione color ambra, e limitare l'uso di quelli a temperature più elevate solamente in alcuni ambiti, in particolare dove è necessaria la percezione dei colori come ad esempio gli incroci.

E' utile anche tener conto che la diffusione della luce è legata alla presenza di aerosol in atmosfera e quindi un controllo dell'inquinamento atmosferico può portare alla riduzione di quello luminoso.

Capitolo 5

Modelli teorici

Per capire come la luminosità artificiale si propaga nello spazio sono stati creati diversi modelli teorici; riassumo qui i due tra quelli di maggior rilevanza e uno più recente.

5.1 Legge di Walker 1977

Walker formulò delle relazioni che legavano la luminosità alla popolazione e alla distanza dal centro della sorgente raccogliendo dati sul numero di lumens emessi dagli impianti di luce stradali in diverse città della California, in particolare nella contea di Santa Clara e Monterey e scegliendo centri con lo stesso sviluppo economico e lo stesso tipo di impianti. La relazione che ottenne era di tipo lineare $L = P$, con alcune eccezioni, come aree residenziali che presentavano emissioni molto minori e aree industriali con emissioni maggiori.

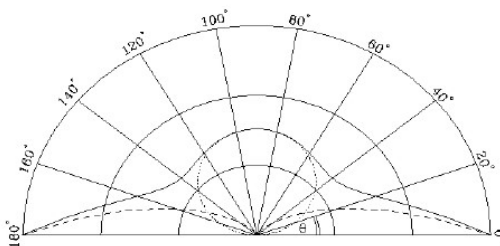
La prima analisi però si basava solamente sugli impianti stradali; quindi per ottenere un andamento che tenesse conto della luminosità totale eseguì delle misurazioni nelle bande B e V su tre città, Salinas, San Jose e King City, definendo L come la differenza tra la luminosità del cielo a 45° dallo zenith verso la città e in direzione opposta in un punto situato a 16.1 km (10 miglia) ottenendo una relazione *luminosità-popolazione* del tipo

$$L = P^{0.8}$$

Similmente misurando in entrambe le bande V e B la differenza tra la brillantezza del cielo a 45° dallo zenith in direzione della città di Salinas e la brillantezza del cielo alla stessa distanza zenitale nella direzione opposta, per diverse distanze dalla sorgente, ottenne una relazione in funzione della distanza D nota come legge *brillantezza-distanza* del tipo

$$L \propto D^{-2.5}$$

Come si vede la pendenza con cui la luminosità decresce è piuttosto elevata. E' necessario però tener conto anche del carattere additivo dell'inquinamento luminoso, per cui la frazione di brillantezza del cielo prodotta dalle cittadine ad una certa distanza dal sito di osservazione decresce all'aumentare di tale distanza in modo più lento e ciò significa che anche le zone molto lontane contribuiscono all'inquinamento luminoso del suo cielo; questo effetto diventa importante nelle aree come la Pianura Padana costituita da una miriade di paesi (vedi la dimostrazione in Figura 5.3 con il modello



- * Atmosfera: siccome l'assunzione di una atmosfera omogenea è inaccurata, ne assume una mista di particelle e molecole; per entrambe ha usato poi due distribuzioni distinte con andamento di decrescita esponenziale, in funzione della densità al livello del mare, e dell'altezza rispetto a questo e uno scattering di Rayleigh. Per gli aerosol invece è stato introdotto un parametro K che misura l'importanza relativa delle molecole rispetto a questi; è un parametro che indica la nitidezza dell'atmosfera, corretto con delle costanti in modo tale che $K=1$ corrisponda alla diffusione da aria pulita al livello del mare.
- * Doppio scattering DS : tiene cioè conto della doppia diffusione effettuata sia da parte delle particelle che dagli aerosol.
- * Coefficiente di estinzione atmosferica EF : calcolato integrando l'estinzione della luce lungo il cammino percorso dall'osservatore al punto osservato ad una certa distanza zenitale (OQ).
- * Luminosità naturale: quantità da sommare alla luminosità artificiale per ottenere quella totale, assunta in banda V pari a $V = 21.9 \text{ mag arcsec}^{-2}$.

Anche per questo modello è stata trovata una forma più concisa:

$$I = fPUD^{-2}(DS)(EF)$$

dove f rappresenta la luce emessa pro capite e U è una costante.

A conferma della validità delle relazioni sono stati fatti dei confronti con i risultati ottenuti da Walker per la città di Salinas ottenendo un buon accordo per entrambe le relazioni con determinati valori dei parametri in gioco.

I risultati più importanti nelle Figure 5.1. Si vede chiaramente come la brillantezza del cielo allo zenit decresce con la distanza in maniera non lineare e addirittura più velocemente al crescere della distanza.

Una considerazione importante sta nel confronto tra i due diversi K : si nota come l'esponente diventa più negativo al diminuire della nitidezza dell'aria. Praticamente una foschia e, in generale l'effetto di un aumento della quantità di aerosol in aria, fa aumentare la brillantezza del cielo allo zenith in prossimità delle sorgenti di inquinamento luminoso per effetto dell'aumento della diffusione, rispetto ad un cielo limpido, mentre rende più buio il cielo in luoghi situati sufficientemente lontano dalle sorgenti per effetto dell'aumento dell'estinzione.

Un'altra applicazione interessante è stata quella di considerare la caratteristica additiva dell'inquinamento luminoso prendendo le due città di Denver e Boulder (a 40

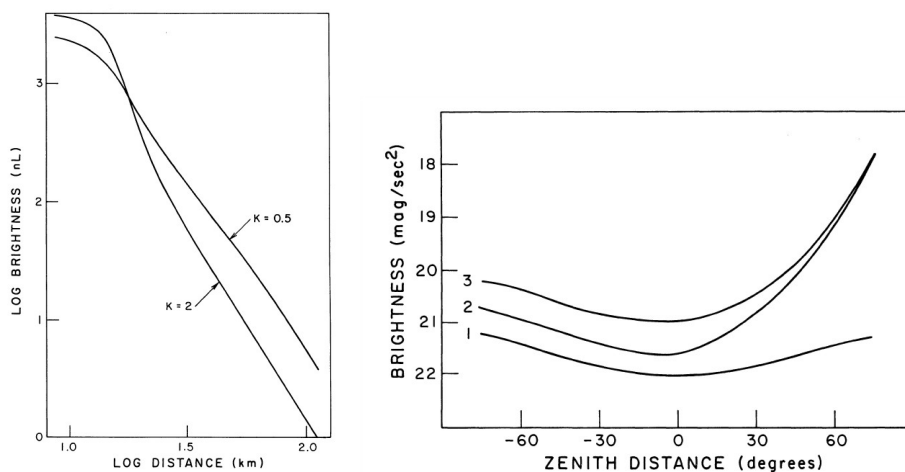


Figura 5.1: A sinistra: Relazione brillantezza-distanza per Denver e senza considerare la luminosità del fondo cielo naturale (Garstang, 1986). A destra: Relazione brillantezza-distanza zenitale. Le linee 1,2,3 corrispondono rispettivamente all'andamento della sola luminosità di fondo, di Denver, o considerando sia la componente naturale che artificiale, vista da una distanza di 40 km. Gli angoli negativi corrispondono ad una direzione della linea di vista opposta rispetto al centro città. (*Model for artificial night-sky illumination*, R. H. Garstang, 1985)

km), applicando il modello ad entrambe separatamente e poi sommando i risultati (Figura 5.2)

A conferma di quello detto in precedenza, la presenza di più sorgenti fa sì che la diminuzione della luminosità con la distanza sia molto più lenta.

In particolare quando un territorio è così popolato che la distribuzione delle sorgenti può essere considerata un continuo, la diminuzione dell'effetto sul cielo dovuto all'aumento medio di distanza viene controbilanciato dall'aumento del numero di sorgenti, così l'effetto globale è quello di diminuire con l'aumento della distanza ma con una minor pendenza.

La conseguenza è che la luminosità diffusa si propaga a distanze molto maggiori.

Un esempio tipico di questa situazione è la Pianura Padana e l'andamento della brillantezza dell'osservatorio di cima Ekar (Figura 5.3). La tabella 5.4 è stata ricavata nel 2000 quindi possiamo supporre che attualmente i valori siano cambiati (anche solo per la variazione di popolazione). Però è utile per capire come una piccola città come Gallio ad una distanza prossima abbia lo stesso contributo di una città maggiore ma molto distante come quella di Padova.

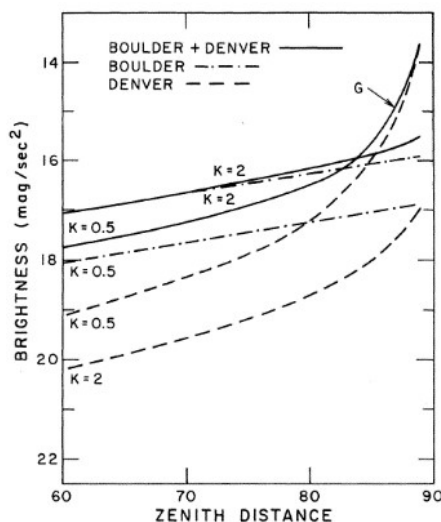


Figura 5.2: *Model for artificial night-sky illumination*, R. H. Garstang

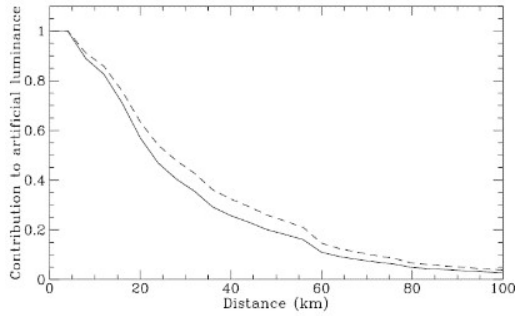
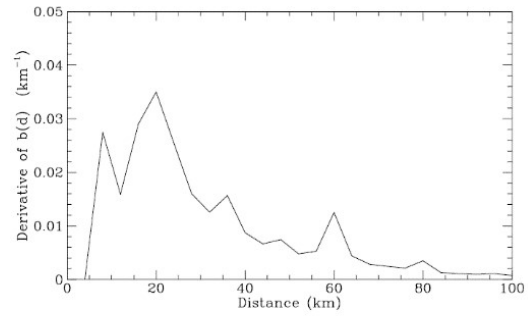

 Fig. 7. $b_g(d)$ curve for Mount Ekar Observatory.

 Fig. 8. The derivative $\frac{db}{dd}$ of the $b_g(d)$ curve for Mount Ekar Observatory.

Figura 5.3: La figura mostra la luminanza artificiale del cielo allo zenit dell'osservatorio di Ekar calcolata da Cinzano nel 1998. Circa il 50% della luminanza è prodotta entro i 30km dall'osservatorio e il 75% entro i 50km. Come ci si aspetta la pendenza è quella per un territorio uniformemente popolato, eccetto il cuore entro i 10 km prodotto dalla minor densità di popolazione in montagna. Nella figura a destra vengono identificati ancor meglio le maggiori sorgenti luminose; i picchi corrispondono ad Asiago (circa 5km), Bassano, Thiene e Schio tra 10 e 20 km, Vicenza a circa 35km, Treviso a circa 56km, Padova a circa 60km. Il continuo è prodotto dalle altre città (circa 1350 città dentro 100km dal sito). (*The propagation of light pollution in diffusely urbanised areas*, P. Cinzano, 1998)

Artificial sky brightness contributions at Mount Ekar Observatory from some cities

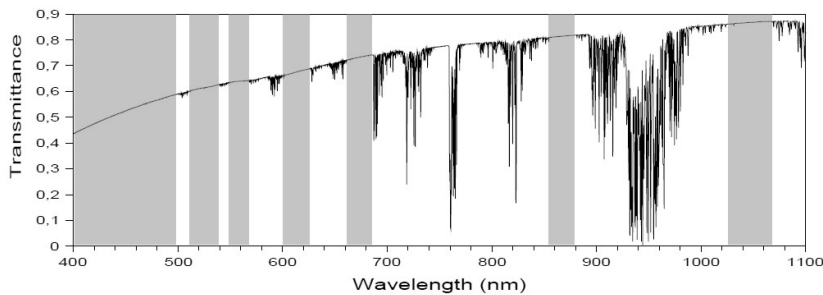
Source	p inhab.	d km	b %	Source	p inhab.	d km	b %
Asiago	6652	5.2	4.6	Area of Zugliano	14115	13	3.4
Gallio	2340	4.6	1.6	Zugliano	5677		1.2
Roana	3747	8.8	1.6	Lugo	3696		1.0
Rotzo	604	13	0.1	Fara Vic.	3732		0.9
Conco	2250	6.8	1.5	Salcedo	1010		0.3
Lusiana	2881	7.6	1.7	Marostica	12610	14	2.2
Arsiero	3313	18	0.4	Breganze	7500	16	1.1
Area of Piovene	17165	14	3.7	Bassano	39289	17	5.1
Piovene	7340		1.4	Vicenza	107786	34	3.0
Carré	2950		0.6	Padova	212731	55	1.3
Chiuppano	2422		0.6	Cittadella	18324	28	0.7
Cogollo	3212		0.7	Grisignano	4099	55	0.5
Calvene	1241		0.4	Treviso	81195	56	0.5
Area of Thiene	34250	18	4.3	Castelfranco	30079	34	0.7
Thiene	20476		2.7	Mestre-Venezia	298915	70	0.7
Zané	5548		0.8	Trento	103181	56	1.3
Marano	8226		0.8	Belluno	35375	66	0.2
Area of Schio	41631	23	3.5	Verona	254145	64	1.5
Schio	36601		2.9				
Santorso	5030		0.6				

Figura 5.4: Tabella dei contributi al cielo dell'Osservatorio di Cima Ekar. (*Disentangling artificial sky brightness from single sources in diffusely urbanized areas*, P. Cinzano, 2000)

5.3 Modello ILLUMINA

A differenza del modello precedente, ILLUMINA tiene anche conto dell'eterogeneità spaziale in cui il fascio di luce si propaga, come ad esempio la variazione spaziale della riflettività del suolo, la topografia, la distribuzione non uniforme della luminosità degli impianti e gli effetti di oscuramento da parte di ostacoli (come costruzioni, piante...), e di questi ne integra la dipendenza spettrale. Lungo ogni percorso che la luce compie inoltre viene calcolata la dispersione ed assorbimento da parte degli aerosol e la dispersione da parte delle molecole, al primo e al secondo ordine, importante soprattutto quando l'osservatore si trova lontano dalla città.

Per semplicità le applicazioni di ILLUMINA si limitano ad alcune bande spettrali (un sottoinsieme del visibile e vicino infrarosso), in modo tale da escludere quelle parti dello spettro affette dall'assorbimento molecolare dell'anidride carbonica e del vapore acqueo (che sono molto variabili nello spazio e nel tempo).



ILLUMINA esegue i calcoli considerando quattro diversi percorsi che la luce può compiere prima di entrare nel campo visivo (FOV) dell'osservatore (Figura 5.5):

- * Scattering di primo ordine nel voxel lungo la linea di vista (I_1);
- * Scattering di primo ordine dopo la riflessione Lambertiana a terra (I_{r1});
- * Diffusione di secondo ordine dopo una prima dispersione da un altro voxel (I_2);
- * Come sopra ma dopo una riflessione (I_{r2}).

L'intensità risultante può essere approssimata come la somma di queste componenti:

$$I_{no} \approx I_1 + I_{r1} + I_2 + I_{r2}$$

Il flusso totale spettrale percepito dal nostro osservatore sarà dato da

$$\Phi_m = \sum_n I_{no} \Omega_{no} \frac{\Omega_{on}}{\Omega_{FOV}}$$

Dove il rapporto $\frac{\Omega_{on}}{\Omega_{FOV}}$ ci dice quanta della luce proveniente da una data cella n entra effettivamente nello strumento che simula l'osservatore. Il modello poi somma su tutti gli n per integrare la luce diffusa lungo la linea di vista.

Elenchiamo i principali risultati e riportiamo le immagini prese da *Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment*, Aubé, 2015)

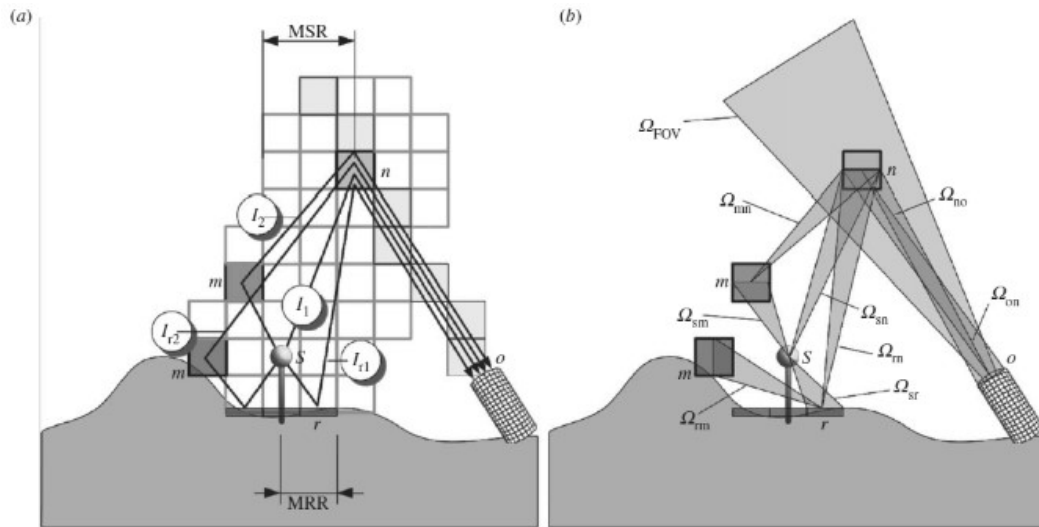


Figura 5.5: Geometria del modello e i contributi al flusso più importanti percepiti da un osservatore. MRR è il raggio massimo di riflessione che è equivalente alla distanza media tra gli ostacoli; MSR è il raggio massimo per il calcolo del secondo ordine di dispersione. (*Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment*, Aubé, 2015)

Relazione luminosità-distanza per diversi AOD

Partiamo dalla relazione tra luminosità e distanza con cielo pulito $AOD=0.1$ (il termine AOD è l'attenuazione ottica da parte di aerosol ad una data lunghezza d'onda); la relazione è molto ripida (si noti che la scala verticale è logaritmica) e diventa più ripida al diminuire dell'angolo zenitale. In particolare per la luminosità allo zenith è stata adattata sui dati a distanze maggiori del raggio della città una legge di potenza ottenendo una funzione decrescente $r^{3.33}$ ($R^2 = 0,9933$). La Figura 5.7 mostra chiaramente come la luminosità allo zenith dentro la città è debolmente dipendente dal valore di AOD ma ne è fortemente dipendente al di fuori (ad esempio, a 50 km dal centro la radianza con cielo limpido allo zenith è 44 volte maggiore rispetto a quella di cielo con contenuto superiore di aerosol). In altre parole, la luminosità allo zenith viene rapidamente attenuata con la distanza al di fuori della città se il cielo è inquinato, e questo comportamento può essere compreso come nel modello di Garstang dal meccanismo stesso dell'estinzione.

Scattering del secondo ordine e presenza di ostacoli

Altra importante caratteristica di questo studio è che riesce a dimostrare l'importanza del secondo ordine di scattering e come questo sia altamente dipendente dalla presenza di ostacoli più alti delle lampade sorgenti; le Figure 5.8 e 5.9 mostrano questo comportamento in funzione della distanza per $AOD=0,1$ e $AOD=1.0$.

Per una presenza di aerosol bassa ($AOD=0.1$), il contributo del secondo ordine di dispersione è generalmente inferiore all'interno della città, ma aumenta rapidamente allontanandosi con un contributo massimo vicino al limite della città per poi diminuire nuovamente; aggiungendo degli ostacoli più alti delle lampade, il contributo diminuisce mediamente del 20%. Quando la AOD aumenta, il contributo alla luminosità zenitale

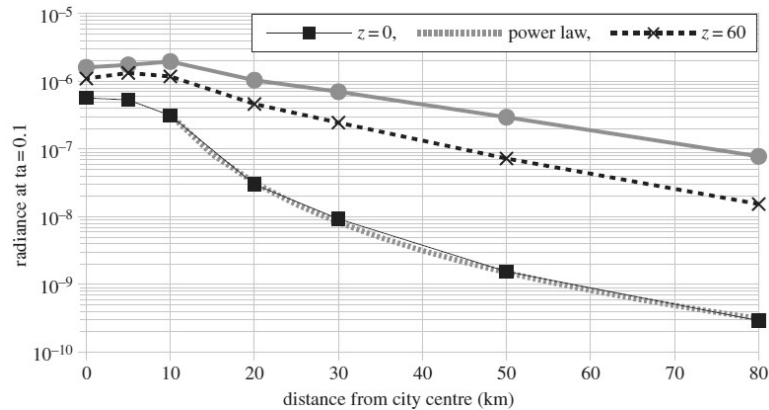


Figura 5.6: Relazione luminosità-distanza per una luce a 569 nm in funzione della distanza dal centro della città per tre angoli zenitali con AOD=0,1 (cielo pulito).

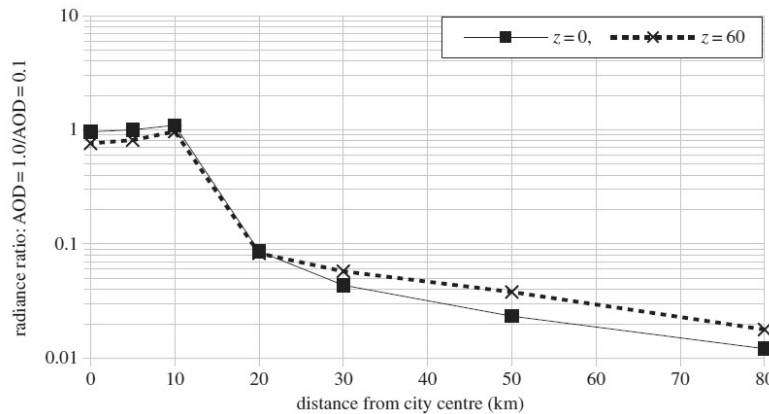


Figura 5.7: Rapporto tra la luminosità del cielo (a 569 nm) con AOD = 1,0 e quella con AOD = 0,1 in funzione della distanza dal centro della città.

all'interno della città simile a quello per cieli puliti ma diminuisce man mano che ci allontaniamo fino ad arrivare al limite della città, dove subisce un aumento repentino a valori fino ad un massimo di quasi il doppio che in cieli con AOD=0.1; la diminuzione che segue è molto più ripida che nel caso precedente; nuovamente la presenza di ostacoli alti diminuisce i contributi. In qualsiasi caso comunque, il contributo del secondo ordine di diffusione non è trascurabile e deve essere preso in considerazione.

Un confronto diretto tra la presenza di ostacoli con altezza minore e maggiore degli impianti luminosi per AOD=0,1 e AOD=1.0 è stata dedotta in Figura 5.10. Quando gli ostacoli sono più piccoli delle lampade, il loro impatto è molto basso (si osserva un rapporto leggermente superiore unità); quest'ultimo caso corrisponde alla maggior parte delle regioni suburbane. All'interno della città l'assenza di ostacoli raddoppia la radianza. Con cieli puliti la luminosità del cielo senza ostacoli aumenta rapidamente al di fuori della città diventando circa sette volte maggiore a 80 km; nel caso di cieli con forte presenza di aerosol il rapporto è massimo all'uscita della città, ma poi diminuisce rapidamente con la distanza (domina quindi l'effetto dell'estinzione).

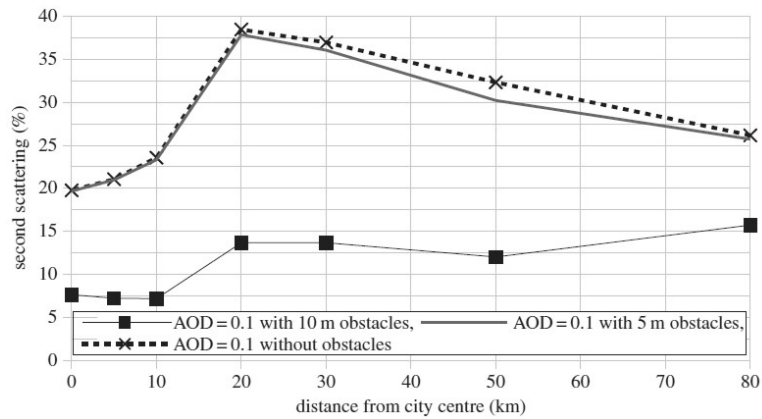


Figura 5.8: Contributo della dispersione del secondo ordine alla radianza totale in funzione della distanza dal centro della città con AOD = 0,1 (cielo pulito).

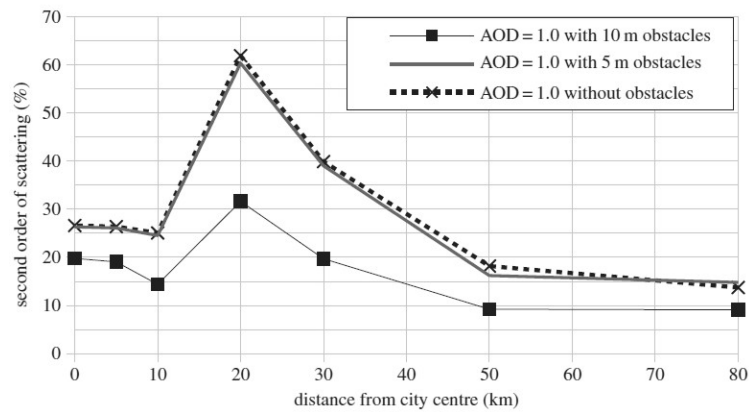


Figura 5.9: Contributo della dispersione di secondo ordine alla radianza totale in funzione della distanza dal centro della città con AOD = 1,0 (cielo inquinato).

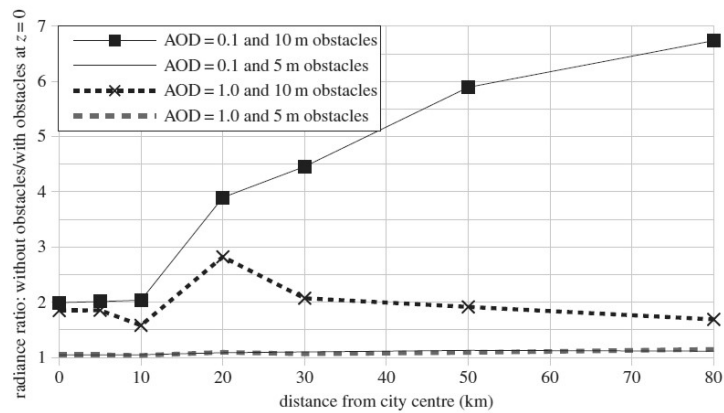


Figura 5.10: Rapporto tra la luminosità allo zenit senza e con la presenza di ostacoli in funzione della distanza dal centro della città.

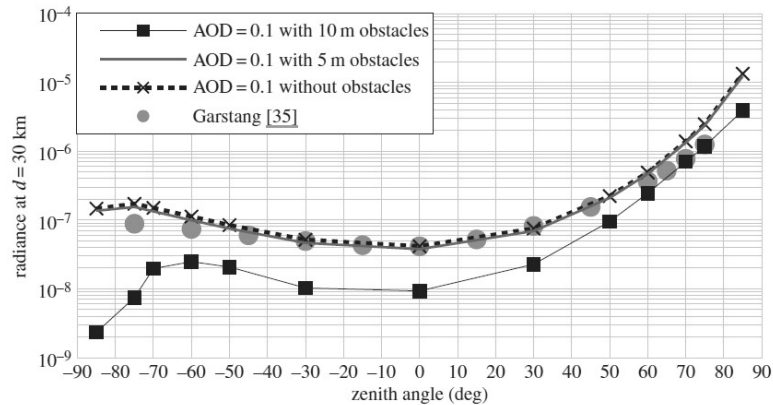


Figura 5.11: Brillanza del cielo (569 nm) con AOD = 0,1 in funzione dell'angolo zenitale a 30 km dal centro della città.

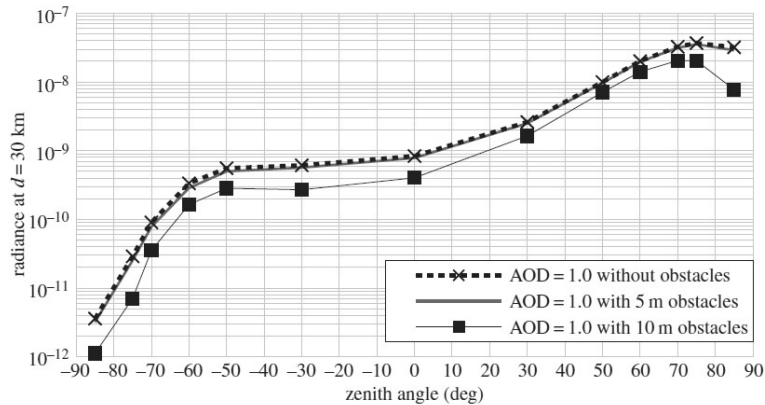


Figura 5.12: Brillanza del cielo (569 nm) con AOD = 1,0 in funzione dell'angolo zenitale a 30 km dal centro della città.

Le Figure 5.11 e 5.12 mostrano, rispettivamente, l'impatto della presenza di ostacoli alti e piccoli per vari angoli zenitali a 30 km dal centro della città. Il caso senza ostacoli a AOD=0.1 è molto simile ai risultati trovati da Garstang. Innanzitutto si nota che la radianza minima si ottiene ad angoli negativi vicini allo zenit e aumenta in direzione della città; un'altra caratteristica è l'inflessione della curva ad alti angoli zenitali negativi che nel caso con ostacoli alti avviene a $z=-60^\circ$ ed è più importante. Questa flessione è causata sia dalla riduzione del flusso verso l'alto per il blocco da parte degli ostacoli che dalla crescente estinzione che si verifica ad alti angoli zenitali; e l'estinzione spiega anche perchè l'inflessione è più importante a valori di AOD maggiore.

Impatto del modello di emissione di luce

Questa sezione descrive l'impatto della distribuzione angolare della luce che esce dalla lampada per ostacoli più alti e più piccole delle lampade. I due corpi illuminanti usati in questa analisi sono molto comuni in Canada: l'apparecchio Cooper Cobrahead (LED) e il Lumec-Schreder Helios (HPS). Fondamentalmente, il dispositivo Helios ha ULOR

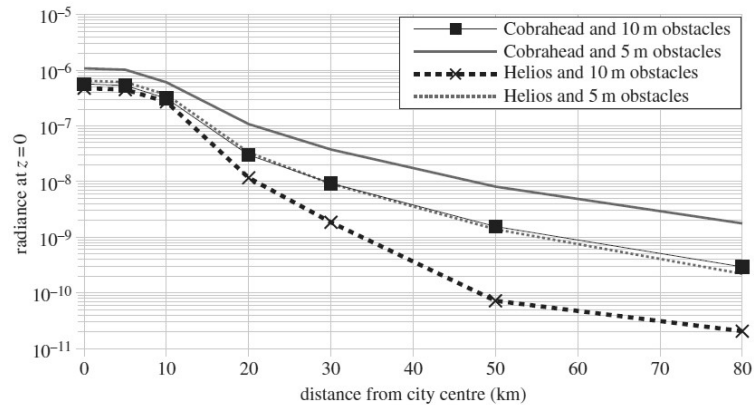


Figura 5.13: Brillanza del cielo allo zenith a 569 nm in funzione della distanza dal centro della città, con due differenti corpi illuminanti (cobrahead ULOR = 7% e Helios ULOR = 1%) e con AOD = 0,1.

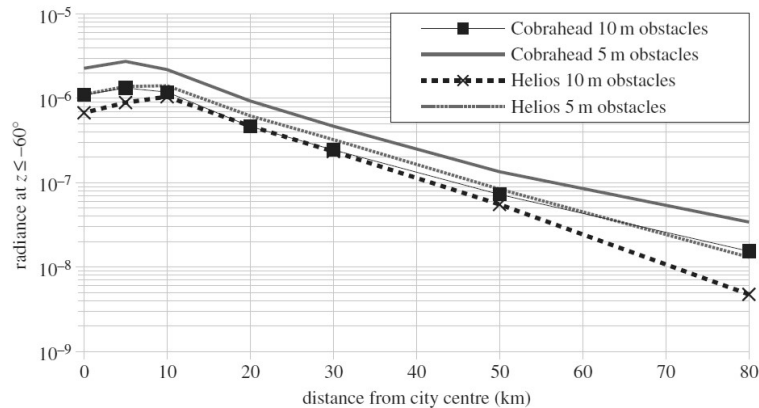


Figura 5.14: Brillanza del cielo a 569 nm a z minor = -60° in funzione della distanza dal centro della città, con due differenti corpi illuminanti (Cobrahead ULOR = 7% e Helios ULOR = 1%) e con AOD = 0,1.

< 1%, mentre il Cobrahead ha ULOR circa 7%. Ricordiamo che ULOR sta per Upward Light Output Ratio.

Le Figure 5.13, 5.14, 5.15 mostrano le relazioni di distanza ottenute a diversi angoli zenitali e per altezze di ostacoli di 5 m e 10 m (inferiori e superiori rispettivamente alla sorgente). Come previsto, gli apparecchi Cobrahead generalmente producono più luminosità di quelli Helios, ma l'altezza degli ostacoli svolge un ruolo importante: ad esempio, quando gli ostacoli sono più alti rispetto alle sorgenti, la Cobrahead diventa quasi identica alla Helios, questo perché l'ULOR delle lampade Cobrahead è concentrato vicino all'orizzonte e viene quindi efficacemente bloccato.

La Figura 5.15 mostra che il rapporto della luminosità tra Cobrahead ed Helios è vicino all'unità in città, ma può aumentare di molto man mano che ci si allontana e se osserviamo allo zenith.

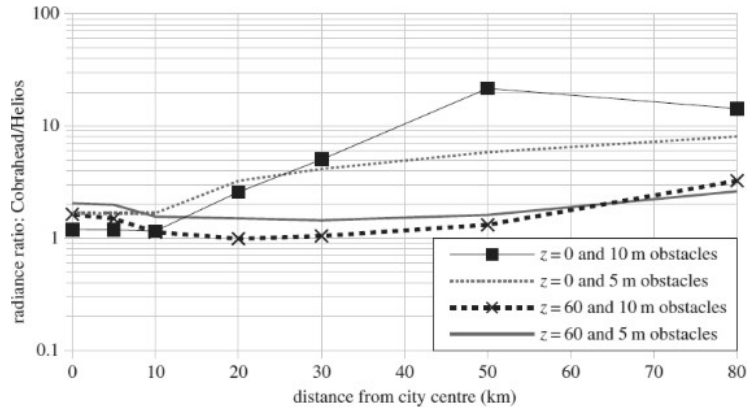


Figura 5.15: Rapporto tra Cobrahead ed Helios in funzione della distanza dal centro per tre diversi angoli zenitali.

Contributo della lunghezza d'onda

Come abbiamo già detto la lunghezza d'onda ha un forte impatto sul processo di diffusione nell'atmosfera; se le molecole diffondono per la teoria di Rayleigh in modo proporzionale alla λ^{-4} , gli aerosol, che sono di dimensioni maggiori, diffondono la luce con una probabilità proporzionale alla $\lambda^{-\alpha}$ con $\alpha \approx 1$, dove α è l'esponente di Ångstrom. La Figura 5.16 mostra l'andamento della luminosità in funzione della lunghezza d'onda per tre distanze dal centro della città (0 km, 30 km, 80 km).

Sono state quindi trovate delle leggi di potenza che fittassero bene i risultati (ad esempio $r^2 = 0.9999$ per $d = 0$ km, $r^2 = 0.9659$ per $d = 80$ km), permettendo di valutare l'esponente di Ångstrom in funzione della distanza dal centro (Figura 5.17). Come previsto, l'esponente è compreso tra i limiti delle teorie Mie e Rayleigh: diminuisce gradualmente da un massimo di 3,59 a $d = 0$ km a 2,70 per $d = 80$ km. Nuovamente ciò indica che l'impatto della luce blu è più importante a brevi distanze dal centro della città, ma è ancora grande lontano. Questo è un risultato molto importante per quanto riguarda il potenziale impatto sui sistemi biologici.

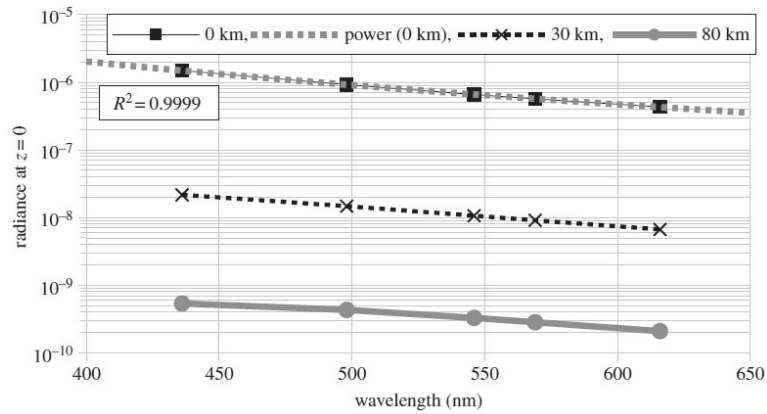


Figura 5.16: Luminosità allo zenith in funzione della lunghezza d'onda per tre distanze dal centro della città. La linea tratteggiata grigia sovrapposta ai quadrati neri è una legge di potenza che si adatta ai dati con un'alta correlazione ($r^2 = 0.9999$).

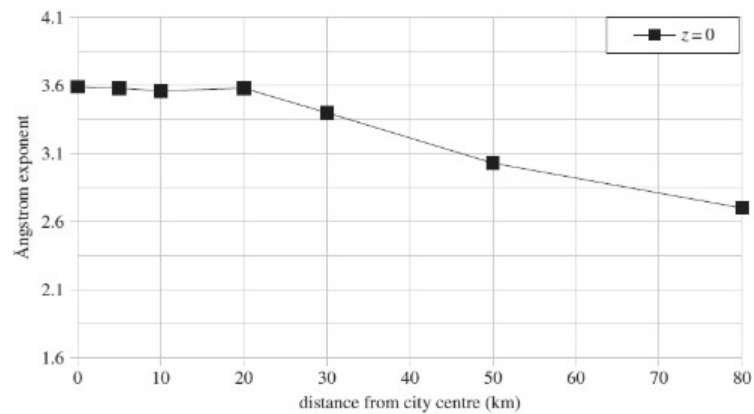


Figura 5.17: Esponente di Ångström determinato dalla legge di potenza che si adatta all'andamento della radianza.

Capitolo 6

Crescita dell'inquinamento luminoso

La crescita dell'inquinamento luminoso negli ultimi 50 anni è evidente ed è stata analizzata da diversi autori e in diverse zone della terra. Fondamentalmente il suo aumento è legato a quattro fattori principali:

- * *La crescita della popolazione.* Abbiamo detto che la brillantezza del cielo dovuta all'inquinamento luminoso è proporzionale alla popolazione secondo una legge del tipo $L \propto P^\alpha$, con $0.8 < \alpha < 1$ a seconda dei vari autori e relativi modelli. Certo una stima precisa dell'aumento di brillantezza dovrebbe tener anche conto degli scambi e trasferimenti della popolazione con città limitrofe, però può essere comunque usata per averne una stima.
- * *La crescita della quantità di luce pro capite.* A causa delle variazioni delle condizioni economiche, dello sviluppo commerciale ed industriale sorgono continuamente nuovi insediamenti e strade di collegamento.

Si riportano alcuni dati dalla relazione che ARPAV ha fatto raccogliendo informazioni sui consumi di energia elettrica per l'illuminazione pubblica esterna di diversi comuni in veneto in kWh e sul numero di punti luce presenti nello stesso territorio comunale tra il 2010 al 2013. In tabella i dati rilevati sono quelli ottenuti dal campione analizzato, mentre le stime sono valori normalizzati dei precedenti applicati all'intera regione.

Una considerazione importante da fare è che l'aumento continuo di efficienza negli impianti ha portato ad una diminuzione delle potenze erogate e dei consumi annui, nonostante l'aumento considerevole di punti luce; questo però porta ad una tendenza negativa effettivamente in atto: i risparmi ottenuti vengono reinvestiti per l'installazione di nuovi impianti, con il rischio che da una parte si arrivi ad un utilizzo non essenziale andando ad illuminare anche zone non necessarie e quindi a sovrailluminare il territorio inutilmente, dall'altra, se non correttamente installati, si arrivi ad un aumento del flusso luminoso "non controllato" e quindi dell'inquinamento. Nonostante questo si nota come il Veneto rispetto alle regioni confinanti presenti consumi inferiori ed inferiori anche alla media nazionale (linea rossa) di 118 kwh/abitante.

DATI RILEVATI	anno 2010	anno 2013	differenza	differenza %
Consumo per abitante (kWh)	93	89	- 4	- 4 %
Potenza per punto luce (W)	121	109	- 12	- 10 %
Punti luce per abitante	0.183	0.196	+ 0.013	+ 7 %
STIME				
Consumo totale annuo (GWh)	454.6	436.5	- 18.1	- 4 %
Potenza totale annua (MW)	108.2	103.9	- 4.3	- 4 %
Punti luce	893900	957000	+ 63100	+ 7 %
Risparmio economico (€)			- 4.2 ilioni	

Figura 6.1: Stima dei parametri per la Regione Veneto (*L'inquinamento luminoso nella regione Veneto*, Osservatorio permanente sul fenomeno dell'inquinamento luminoso, ARPAV, 2015)

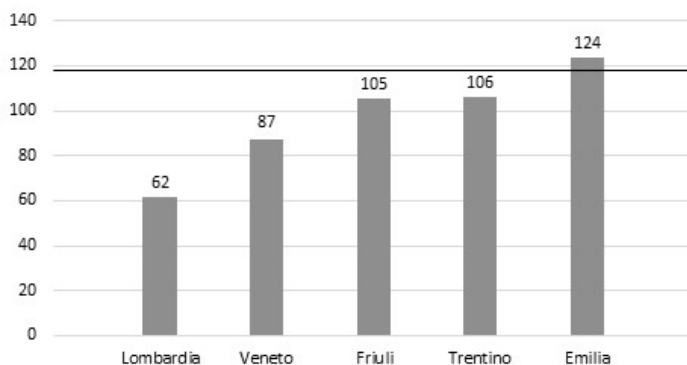


Figura 6.2: Valori dei kWh per abitante per il 2015 (dati *Terna* e *ISTAT*)

- * *Le variazioni nel tipo di armature e di impianti.* Il punto fondamentale dove agire per una limitazione dell'inquinamento luminoso (ricordiamo l'importanza dell'emissione a piccoli angoli che si propaga anche fino a 200km di stanza dalla sorgente).
- * *Le variazioni del tipo di sorgenti di luce.* Riporto la mappa della luminosità artificiale del cielo d'Europa in banda V in Figura 6.3; a sinistra una previsione della luminosità del cielo mantenendo costante il flusso delle lampade attualmente usate (stessa funzione di emissione) ma ipotizzando una transizione verso impianti a LED a luce bianca-blu di 4000K: il risultato è un aumento pari a più del doppio!

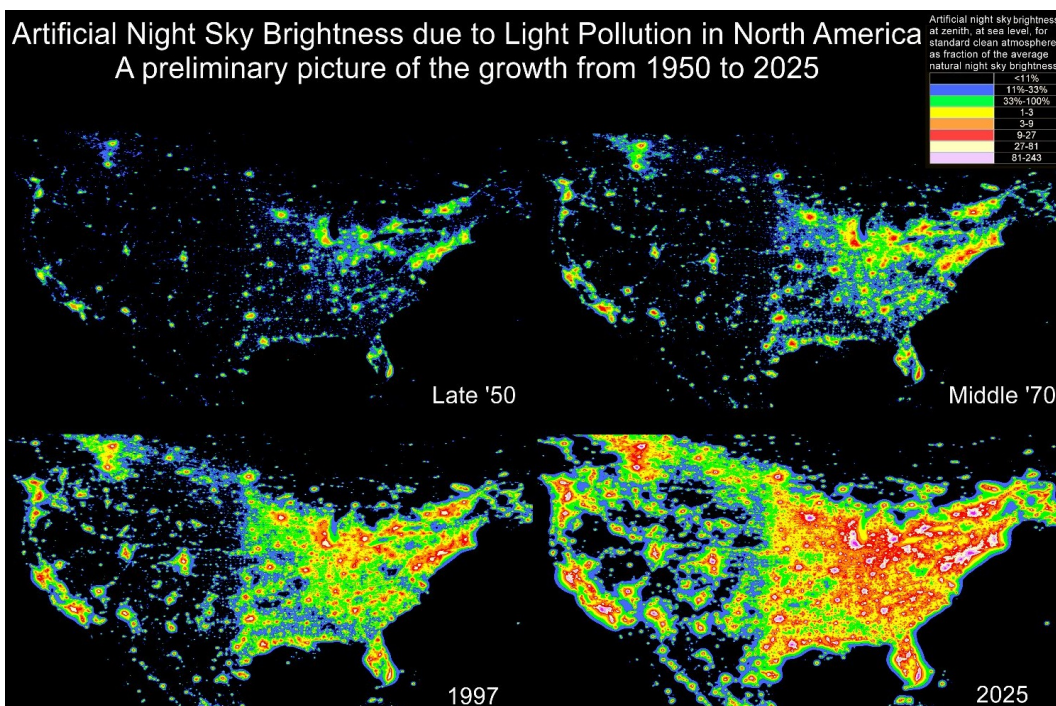
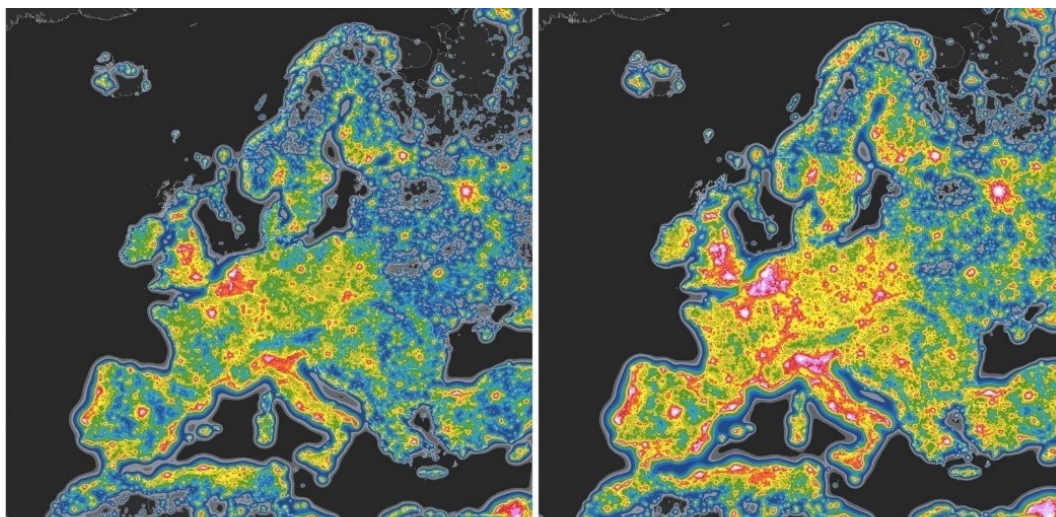


Figura 6.3: *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Falchi et al., 2016. *The growth of the artificial night sky brightness in North America in the period 1947-2000: a preliminary picture*, P. Cinzano, 2002

Nel mondo si sta assistendo ad una crescita generalizzata del flusso luminoso, analizzato da diversi autori in diverse parti del mondo. Viene riportata in Figura 6.3 una mappa degli Stati Uniti che rappresenta l'evoluzione negli ultimi 60 anni e una futura previsione per i prossimi 20 per lo stesso aumento esponenziale di inquinamento luminoso.

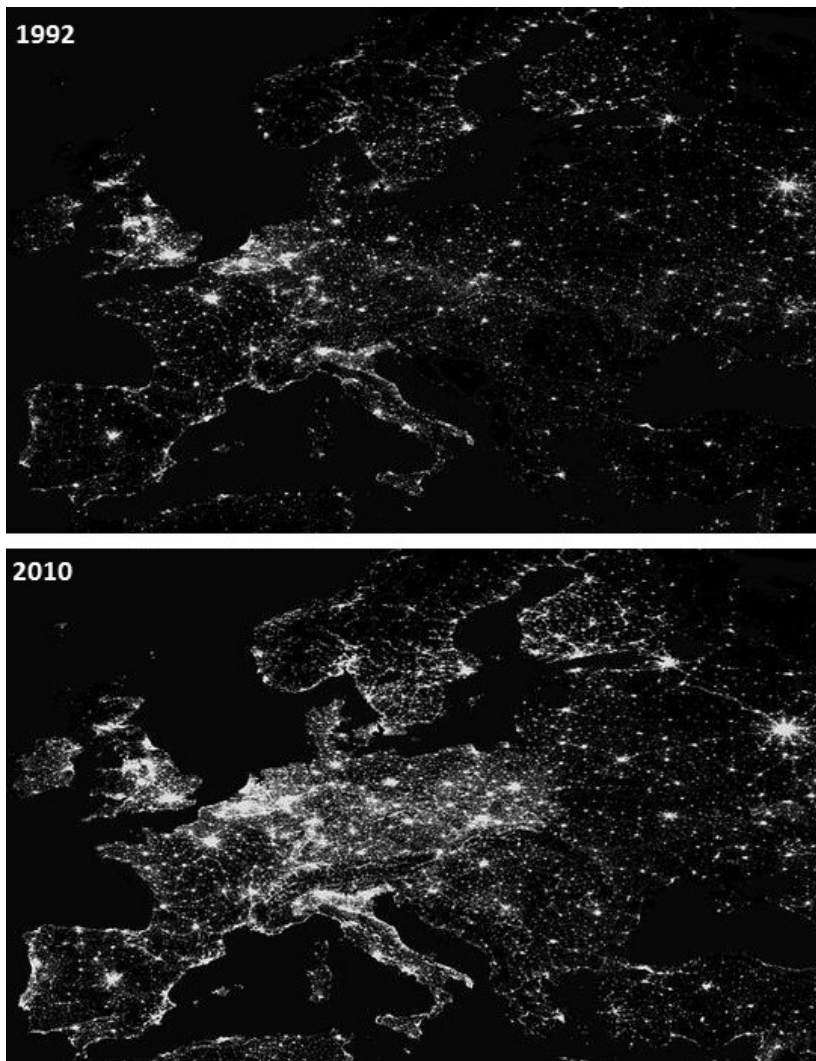


Figura 6.4: *Night lights in Europe*, NGDC/DMSPP/ESA, 2012

La situazione europea degli ultimi 30 anni si può cogliere confrontando le due immagini prese da satellite nel 1992 e nel 2010. L'aumento è nuovamente correlato alla crescita demografica (le aree più luminose sono anche quelle più densamente popolate, si noti ad esempio le grosse città di Parigi, Londra, Roma, Madrid) ed economica.

Nel 1976 Berry ha registrato una crescita annua del 10% per la regione dell'Ontario. Un aumento del 12% annuo è stato anche misurato nelle città Giapponesi (Isobe 1993; Isobe e Hamamura 1998).

A Mount Wilson in California Garstang ha calcolato e rappresentato l'aumento impla-

cabile dal 1900 al 2000 tramite l'analisi del numero di punti luce e del tipo di impianti e lampade che si sono alternate nel corso del secolo.

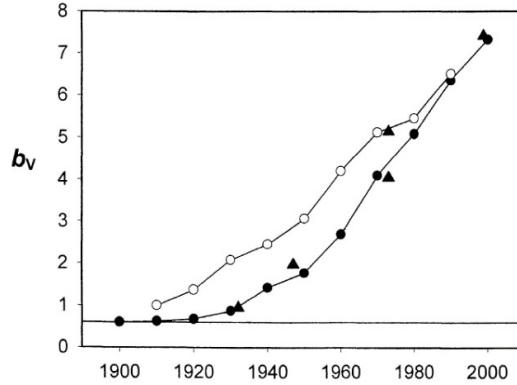


Figura 6.5: *Mount Wilson Observatory: the sad story of light pollution*, R. H. Garstang, 2004

Anche Cinzano analizzando le misure della luminosità del cielo in banda V, B ed R a Ekar tra il 1960 e 1995 corrette per l'attività solare ha ottenuto un aumento esponenziale negli ultimi 35 anni con un valore di circa il 10% annuo.

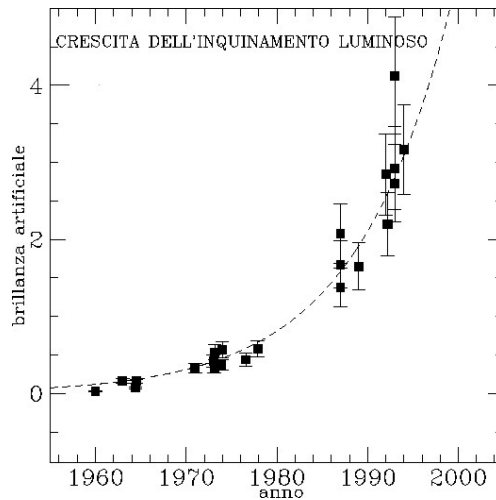
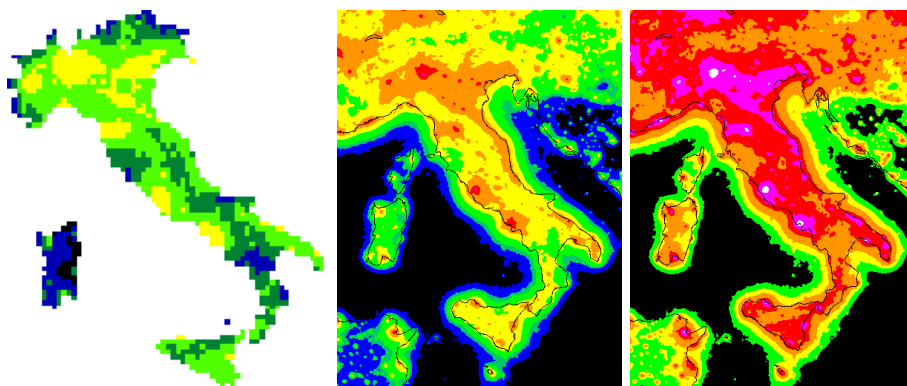


Figura 6.6: *The growth of light pollution in north-eastern Italy from 1960 to 1995*, P. Cinzano, 2000

In accordo anche lo studio di Falchi che ha confrontato la mappa della brillantezza artificiale del cielo ottenuta nel 1971 da Bertiau, Treanor and de Graeve (1973) con una analoga mappa ottenuta nel 1998 con lo stesso metodo ma in base alle immagini prese da satellite.

Il confronto mostra un aumento abbastanza uniforme di circa 5-10 volte negli ultimi 30 anni, che corrisponde ad una crescita del 6-9% annua; alcune zone però hanno mostrato un aumento maggiore della media, come ad esempio il nord est della Sardegna, la Costa Smeralda, con un aumento della brillantezza di oltre 20 volte.

Questo aumento in una situazione di crescita demografica nulla o lievemente negativa come si ha in Italia, è stata spiegata dall'autore da due fattori: da una parte l'aumento



Mappa	1971	Mappa	1998	Mappa	2025
	< 5% Nero	< 11% Nero		< 11% Nero	
	6 – 15% Grigio				
	16-35% Blu	11-33% Blu		11-33% Blu	
	36-110% Verde	33-100% Verde		33-100% Verde	
	> 1.1 Giallo	1-3 Giallo		1-3 Giallo	
		3-9 Arancio		3-9 Arancio	
		> 9 Rosso		9-27 Rosso	
				27-81 Violetto	
				> 81 Bianco	

medio del 5% annuo dei consumi di elettricità dovuti all'illuminazione pubblica notturna, dall'altra l'aumento dell'efficienza media delle lampade installate nel corso degli anni (passaggio dalle lampade ad incandescenza degli anni '60 alle lampade ai vapori di mercurio e a metà degli anni novanta alle più efficienti lampade al sodio ad alta e bassa pressione).

La terza mappa infine è stata ottenuta banalmente assumendo nel periodo 1998-2025 lo stesso incremento medio che è stato registrato nei 27 anni precedenti ed esprime un possibile scenario dello stato del cielo nel 2025 nel caso in cui non venissero attuati provvedimenti sufficientemente efficaci per limitare l'inquinamento luminoso. Il colore arancio indica approssimativamente le zone dove la via lattea è molto difficile da vedere in notti limpide normali.

Capitolo 7

La situazione attuale

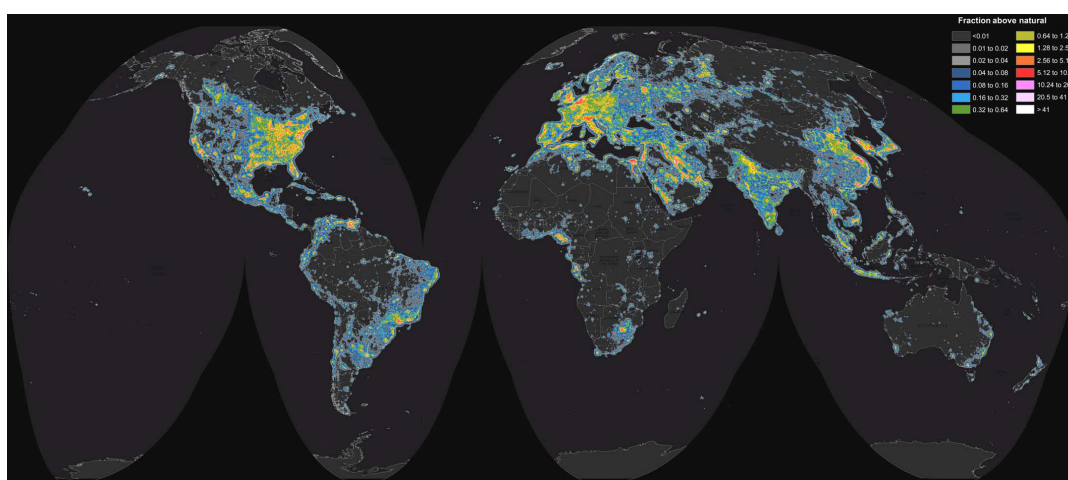


Figura 7.1: I colori più evidenti indicano rispettivamente valori di luminosità in $\mu\text{cd m}^{-2}$ pari a: ≤ 1.7 nero (circa 1% superiore alla luminosità di fondo cielo, cieli incontaminati), 1.7-14 blu (1-8%), 14-87 verde (8-50%), 87-688 giallo (tra il 50% e il valore limite in cui la Via Lattea non è più ben visibile), 688-3000 rosso (la Via Lattea non è più visibile), > 3000 bianco (altamente inquinato, l'occhio umano non riesce ad adattarsi completamente al buio). (*The new world atlas of artificial night sky brightness*, Falchi et al., 2016)

Lo studio recente di Falchi e Cinzano ha dimostrato che circa l'83% della popolazione mondiale e più del 99% di Stati Uniti ed Europa vivono sotto cieli inquinati (cioè con una luminosità artificiale $> 14 \mu\text{cd m}^{-2}$). Più di un terzo dell'umanità non riesce a vedere la via lattea, compresi oltre il 60% degli europei ed l'80% dei nord americani.

Le zone più inquinate sono visibili nella mappa mondiale che è stata riportata ed effettivamente sono quelle con maggior sviluppo demografico ed economico come Europa, Stati Uniti, Arabia Saudita, India, Giappone, Asia orientale. Il paese più inquinato al mondo è Singapore, dove addirittura l'intera popolazione vive sotto un cielo così luminoso che l'occhio umano non riesce pienamente ad adattarsi alla visione notturna: il 100% della popolazione e del territorio si trovano sotto un cielo con luminosità $> 3000 \mu\text{cd m}^{-2}$. Altri altamente inquinati sono il Kuwait (98% della popolazione), Qatar (97%), Emirati Arabi (93%), Arabia Saudita (83%).

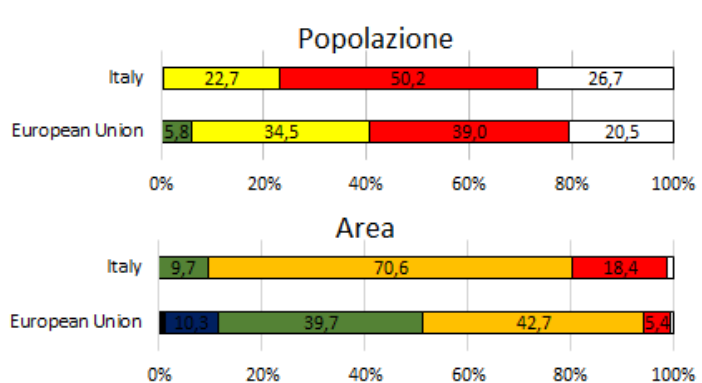


Figura 7.2: I colori indicano rispettivamente valori di luminosità in $\mu cd m^{-2}$ pari a: $\leq 1,7$ nero (circa 1% superiore alla luminosità di fondo cielo, cieli incontaminati), 1,7-14 blu (1-8%), 14-87 verde (8-50%), 87-688 giallo (tra il 50% e il valore limite in cui la Via Lattea non è più ben visibile), 688-3000 rosso (la Via Lattea non è più visibile), > 3000 bianco (altamente inquinato, l'occhio umano non riesce ad adattarsi completamente al buio). Dati ricavati da *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Falchi et al., 2016

I paesi meno colpiti invece da inquinamento luminoso sono il Ciad, la Repubblica Centrafricana ed il Madagascar, con oltre il 95% della popolazione che vive in condizioni di cielo incontaminato ($< 1,7 \mu cd m^{-2}$, cioè una luminosità del cielo notturno con un contributo di luce artificiale minore al 1% rispetto a quella naturale). Lo studio ha classificato tutti le Nazioni mondiali sia per le percentuali di popolazione che di area di territorio coperte dai diversi livelli di luminosità indicati da diversi colori.

I risultati per l'Italia sono abbastanza critici. A livello mondiale se consideriamo la percentuale di popolazione sotto un cielo altamente inquinato (con brillantezza superiore ai $3000 \mu cd m^{-2}$) l'Italia si trova al 37° posto (su 220 nazioni considerate) ed al 20° se consideriamo la percentuale di territorio nelle medesime condizioni. Sempre alta in classifica (32° posto) per la percentuale di popolazione che non riesce a vedere la Via Lattea (il 70Ha il primato tra i Paesi del G20 per quanto riguarda la maggior percentuale di territorio sotto un cielo con luminosità $> 87 \mu cd m^{-2}$). Ha circa il 99% della popolazione sotto un cielo inquinato e un territorio pari al 90% nelle medesime condizioni.

Effettivamente da uno studio fatto nel 2012, i dati sul consumo pro capite per l'illuminazione pubblica in Italia (pari a 105 kwh) risulta più del doppio di molte altre nazioni europee; solo la Spagna, con un consumo pro capite di 116 kwh, la supera. Il primato con Spagna e Paesi Bassi l'abbiamo anche nel numero più alto di apparecchi per area urbanizzata (più del doppio di tutti gli altri paesi europei), nella potenza media degli apparecchi installati, che è molto superiore alla media europea (circa 110 Watt contro i 145 Watt dell'Italia), e nei consumi per superficie illuminata urbanizzata (sempre più del doppio di molti altri paesi europei). A livello internazionale quindi l'Italia è tra gli stati con un maggior numero di punti luce per abitante e con un consumo pro capite più alto. È evidente quindi, pur nella buona strada già intrapresa, che le possibilità di miglioramento sono notevoli, agendo sull'efficienza degli impianti e razionalizzando maggiormente la pubblica illuminazione.

Per valutare l'impatto dell'illuminazione pubblica ad Asiago durante l'iniziativa della

Notte Buia del 28 marzo 2014 (in cui 5 comuni dell'Altopiano hanno spento totalmente l'illuminazione pubblica per l'intera notte) sono stati raccolti dagli Osservatori di Cima Ekar e Pennar dati sulla luminosità del cielo tramite uno Sky Quality Meter (che verrà descritto nella seconda parte del lavoro).

Lo strumento ha registrato valori in $mag \text{ arcsec}^{-2}$ ad intervalli di cinque minuti, e la notte è stata scelta in prossimità della Luna Nuova (in modo che i dati non venissero influenzati dalla sua luminosità). Confrontando i dati raccolti con quelli di una vicina, sempre di Luna Nuova e sempre senza copertura nuvolosa, si sia registrata una variazione di $0,4 \text{ mag arcsec}^{-2}$ per Pennar e $0,3 \text{ mag arcsec}^{-2}$ per Ekar (pari ad una variazione di quasi il 50% e 30%), raggiungendo un valore di circa $21 \text{ mag arcsec}^{-2}$. La differenza tra i due si spiega con la maggior vicinanza dell'Osservatorio di Pennar al paese di Asiago, e l'influenza invece maggiore delle città della Pianura Padana per Ekar.

La stessa iniziativa è stata ripetuta nel 2016 ma uno studio tramite SQM non è stato possibile a causa della presenza di nubi che hanno ostacolato la registrazione dei valori della luminosità del cielo.

Analisi ed elaborazione dati

Capitolo 8

Monitoraggio

8.1 SQM

Lo strumento utilizzato in questa analisi per quantificare la brillantezza del cielo notturno è stato lo Sky Quality Meter.

Lo SQM è composto da un sensore (un fotodiodo di silicio) che misura la luminosità del cielo notturno attraverso un filtro taglia-IR; la risposta del fotodiodo alla luce sarebbe limitata all'intervallo di lunghezza d'onda compreso tra i 320 e i 1050 nm con un picco a 680 nm ma si è aggiunto poi un filtro in grado di restringere l'intervallo di sensibilità a 320 – 720 nm in modo da poter equiparare meglio la risposta dello strumento alla visione umana notturna.

Inoltre grazie ad un sensore interno, lo SQM è in grado di apportare automaticamente le correzioni alle misure dovute alla dipendenza dalla temperatura, in modo da avere uno strumento affidabile in un intervallo di temperature tra i -25°C e i 70°C.

Lo strumento viene orientato verso lo zenit ed è in grado di registrare la luce entro un determinato campo visuale, determinato dal modello: SQM esegue una lettura del cielo con un angolo di circa 80° (Half Width at Half Maximum del profilo di risposta di circa 42°) e l'SQM-L dove l indica l'utilizzo di una lente che permette di restringere il campo a soli 20°, permettendo di focalizzarsi su porzioni del cielo più piccole (HWHM di circa 10°).

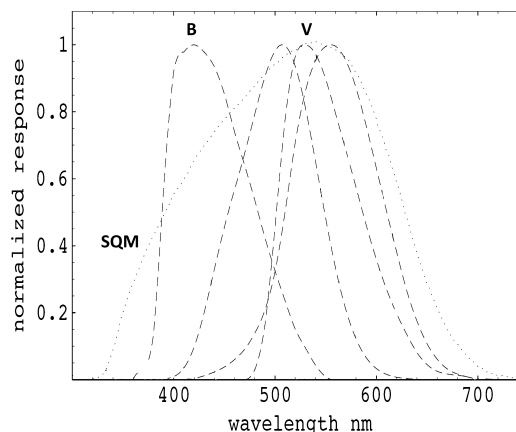
Il valore della brillantezza del cielo è espressa in $mag \text{ arcsec}^{-2}$ con un errore sistematico da associare alle misure pari a $\pm 10\%$ cioè $0.1 mag \text{ arcsec}^{-2}$. Ricordiamo che a questa unità di misura corrisponde una scala inversa, ovvero un cielo di 21.0 $mag \text{ arcsec}^{-2}$ sarà più buio di un cielo con brillantezza di 20.0 $mag \text{ arcsec}^{-2}$, dove con più buio s'intende un cielo in cui il numero di stelle visibili sia maggiore a parità di zona osservata.

Grazie alla sua caratteristica di poter effettuare misurazioni continue nel tempo, permette un monitoraggio costante della luminosità del cielo, diventando uno strumento importante per l'analisi delle variazioni della luminosità del cielo nel corso del tempo (e quindi poter verificare la validità dei provvedimenti presi per la riduzione del flusso artificiale prodotto dagli impianti di illuminazione pubblica e privata).

Al fine di rendere confrontabili i valori forniti da un SQM con un qualsiasi altro dispositivo fotometrico è stato fatto uno studio approfondito della risposta dello strumento stesso.

Test condotti in laboratorio dimostrano che la curva di risposta dell'SQM non corrisponde con nessuna delle curve di sistemi fotometrici standard. E' necessario perciò considerare l'SQM come un nuovo sistema fotometrico e definire dei fattori di conversione opportuni per riportarsi ai sistemi standard. La curva di risposta dello strumento confrontata con i più classici sistemi fotometrici.

Sono stati inoltre determinati i coefficienti di conversione rispetto alla banda fotometrica V per sorgenti tipiche di luce artificiale (ad esempio alcuni valori sono per le lampade MV +0,59, HPS +0,48, Natural Sky +0,54, Polluted Sky +0,56). Per ridurre al minimo questi coefficienti, sono stati identificati dei filtri opportuni, applicabili all'SQM (ma non attualmente installati). In generale possiamo dire che per riportarsi al sistema fotometrico UBV per osservazioni allo zenit, con uno strumento senza filtri aggiunti, è necessario apportare alle misure una correzione pari a $0-0,3 \text{ mag arcsec}^{-2}$.



SQM di Ekar e Pennar

I due SQM utilizzati per questo lavoro sono due SQM fissi del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova, installati presso i telescopi astronomici ad Asiago di Pennar ed Ekar. Sono di tipo SQM-LE (dove E sta per Ethernet, in quanto è possibile collegare il dispositivo alla rete per registrare flussi continui di dati) ai quali non è applicato alcun filtro.

I dati sono stati forniti dal Dott. G. Umbriaco tecnico responsabile degli SQM.

La luminosità del cielo allo zenit viene misurata ad intervalli di 5 minuti. L'SQM di Pennar è operativo da marzo 2014, quello di Ekar dal maggio 2011. I dati non coprono tutto il periodo a causa di malfunzionamenti su diverse notti sporadiche e alcuni mesi; per Ekar in particolare sono mancanti i mesi di giugno e luglio 2015; per Pennar giugno e luglio 2014.

Per diminuire le escursioni termiche diurne e mantenere stabile la temperatura durante la notte durante le 24 ore riceve un flusso di aria proveniente dal basso che mantiene sempre in circolo l'aria presente dentro la cupola mantenendolo a 20°C. Possiamo pertanto escludere che le misure siano affette da errori dovuti ad instabilità termica dello strumento (perchè come detto precedentemente sono corretti dal software interno dello stesso SQM). Lo stesso ricircolo d'aria e la conformazione dell'involucro impedisce il deposito di neve o ghiaccio.



8.2 Stazione Meteorologica

Per l'analisi dell'andamento delle temperature sono stati utilizzati i dati d'archivio relativi a Pennar dal 1957 al 2001, scaricabili on-line dal sito dell'INAF-OAPd; quelli più recenti invece sono stati forniti da A. Siviero e provengono dalla stazione meteo dell'Osservatorio Astrofisico di Asiago Davis Vantage che registra i valori ad ogni minuto. Quelli di Ekar invece sono disponibili on-line sempre sul sito dell'INAF-OAPd, scegliendo l'intervallo di tempo desiderato, e anch'essi risultano registrati ad intervalli di circa un minuto. I valori sono in °C.

Capitolo 9

Analisi dati

9.1 Copertura nuvolosa

Per questa analisi sono stati utilizzati le misure della luminosità del cielo del SQM e come indicatore di copertura nuvolosa le fluttuazioni di questi valori durante la notte.

Per facilitare il lavoro la mole di dati è stata suddivisa per anni; plottando poi i valori di luminosità in funzione del tempo (ricordiamo che sono registrati ad intervalli di 5 minuti) per ogni mese si sono ottenute in successione le curve di brillantezza di ogni notte ed è stato quindi possibile prima di tutto individuare quelle mancanti e conteggiare quelle totali registrate.

Sono state poi contate il numero di notti fotometriche e spettroscopiche. Per la suddivisione sono state usate le seguenti definizioni:

- * Fotometriche: 6 ore consecutive con variazione della luminosità entro i $0,1 \text{ mag arcsec}^{-2}$ (pari all'errore dello strumento); per le notti estive il limite temporale diventa una percentuale di copertura di circa il 10-15% a seconda del mese, in modo comunque da avere la maggior parte della notte disponibile.
- * Spettroscopiche: il tempo si riduce ad almeno 2 ore consecutive con variazioni entro lo stesso valore.
- * Coperte: le notti di copertura sono le rimanenti.

Il conteggio e la selezione è stata fatta manualmente e l'operazione è stata ripetuta più volte per avere conferma dei risultati ottenuti.

Riporto a titolo di esempio alcune curve di brillantezza in Figura 9.1. Come si vede nella notte del 2 settembre 2012 la variazione di luminosità dovuta alle nubi è evidente; questo è il caso della maggior parte delle curve analizzate; in altre invece le fluttuazioni sono presenti solamente in una sua parte, come nel caso del 25 giugno 2015, ed è stato necessario misurare a quante ore corrispondesse la parte continua. Per le notti in cui la variazione era meno visibile è bastato ingrandire le curve di brillantezza (considerando ad esempio luminosità comprese nell'intervallo tra le $19 - 21 \text{ mag arcsec}^{-2}$), creare una griglia con linee distanziate di $0,1 \text{ mag arcsec}^{-2}$ in modo tale da rendere più facilmente individualizzabili e misurabili le variazioni; la notte del 28 marzo 2014 rappresenta invece una tipica notte fotometrica (si osservino i valori minimi di fluttuazione nella curva tra i $20 - 21 \text{ mag arcsec}^{-2}$).

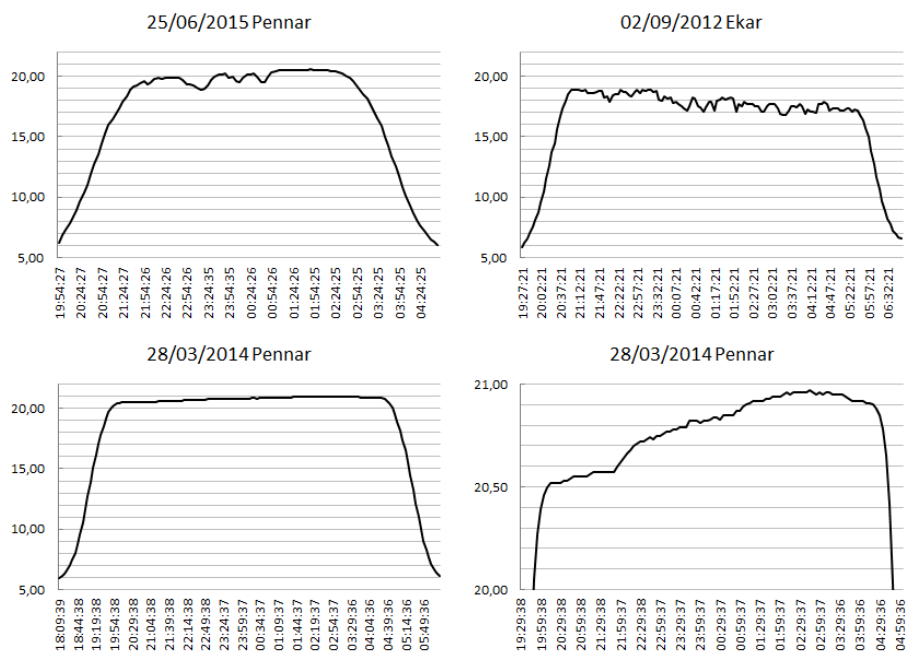


Figura 9.1: Esempi di alcune curve di brillantezza ottenute, in cui i valori in ascissa sono in $mag \text{ arcsec}^{-2}$

Quindi porre il valore limite delle fluttuazioni a 0, 1 $mag \text{ arcsec}^{-2}$ risulta essere sufficiente in quando durante una notte con copertura nuvolosa questo valore viene superato di molto.

Prendendo spunto dal lavoro dei conteggi effettuati dal Prof. Rosino dal 1957 al 1971 è stata definita per semplicità di scrittura la somma delle notti fotometriche e spettroscopiche come notti lavorative. Ricordiamo però che la sua definizione di "notte lavorativa" è diversa: è la somma delle notti limpide e parzialmente coperte (però non sappiamo su che base le abbia effettivamente selezionate).

Oltretutto si deve tener conto che oltre alla copertura del cielo sono altri i fattori che definiscono se una notte sia nella pratica utilizzabile o no, tra i quali ricordiamo in particolare l'umidità; ad Asiago infatti i suoi valori sono sempre molto elevati e al limite della chiusura della cupola. La Dott.ssa Gerlin ha trovato per la stagioni umide un valore medio del 85,86% per Cima Ekar e 80,72% di Asiago stazione ARPAV dell'aeroporto di Asiago) contro ad esempio il 20% di Paranal; valori invece del 79,37% per Ekar contro i 15% per Paranal nelle stagioni fredde.

Nonostante questo problema Rosino adattava il suo lavoro in base al tipo di notte che gli si presentava, lavorando anche in quelle notti non considerate buone. Ecco che nuovamente la sua definizione di notte lavorativa nella pratica può essere diversa.

Considereremo lo stesso i suoi dati per un confronto, ma solamente quelli dopo il 1961, in quanto nel suo stesso resoconto scrive che siano "più veritieri"; ed effettivamente la differenza nelle percentuali dei primi 4 anni rispetto agli altri è abbastanza evidente (Figura 9.2).

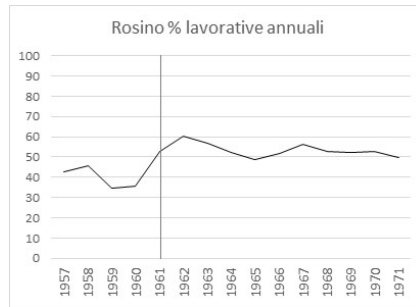


Figura 9.2: Percentuali di notti lavorative annuali di Rosino dal 1957 al 1971

Andamenti mensili e annuali

Dopo aver effettuato il conteggio delle varie notti, sono stati ricavati i valori percentuali mensili ed annuali, le quali calcolate direttamente dalla somma delle notti fotometriche, spettroscopiche e totali rispettivamente per ogni anno. Vengono riportati i risultati nelle tabelle in Figura 9.10 e 9.11 nelle pagine seguenti. Sono stati evidenziati in grigio in tabella e con dei punti gialli o con dei quadrati vuoti nei grafici i mesi corrispondenti a quei giorni totali registrati con un valore pari o inferiori a 16 giorni, e che quindi statisticamente potrebbero portare a risultati non corretti.

In Figura 9.3 vengono rappresentati gli andamenti delle percentuali delle notti lavorative e fotometriche separatamente per gli anni in cui è possibile confrontare i due siti.

Lo stesso lavoro è stato compiuto per i valori dei vari mesi; in Figura 9.4 sono stati riportati a titolo di esempio i mesi di marzo per le notti lavorative e aprile per quelle fotometriche.

Come si nota le coppie di valori che più si discostano sono quelli dei mesi in cui i dati sono più scarsi (indicati con un punto giallo).

In Figura 9.5 invece vengono rappresentati messi a confronto i valori delle percentuali delle notti lavorative e di quelle fotometriche per Ekar, negli anni in cui non è stato possibile un confronto con Pennar per la mancanza di dati a disposizione.

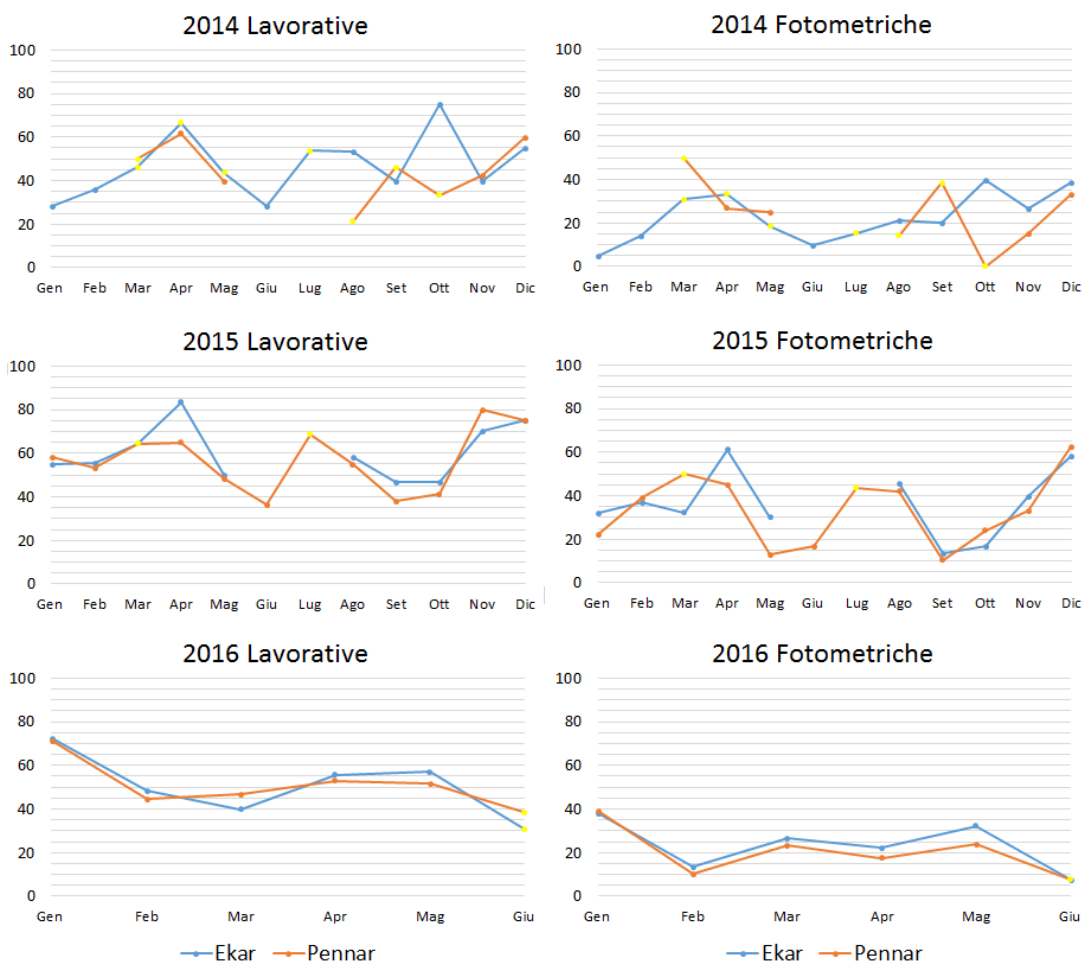


Figura 9.3: Andamento delle percentuali della somma delle notti fotometriche e spettroscopiche a sinistra e solo fotometriche a destra negli anni in cui è stato possibile confrontare i due siti di Ekar e Pennar.

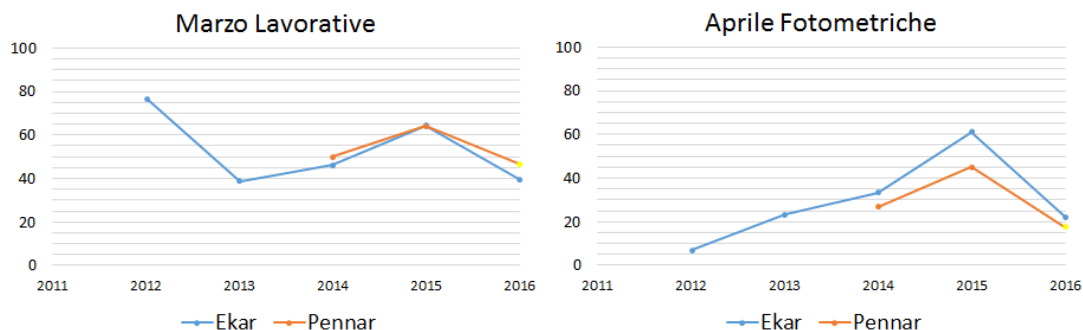


Figura 9.4: Esempio dei risultati per il mese di marzo per le notti lavorative e solo fotometriche per aprile.

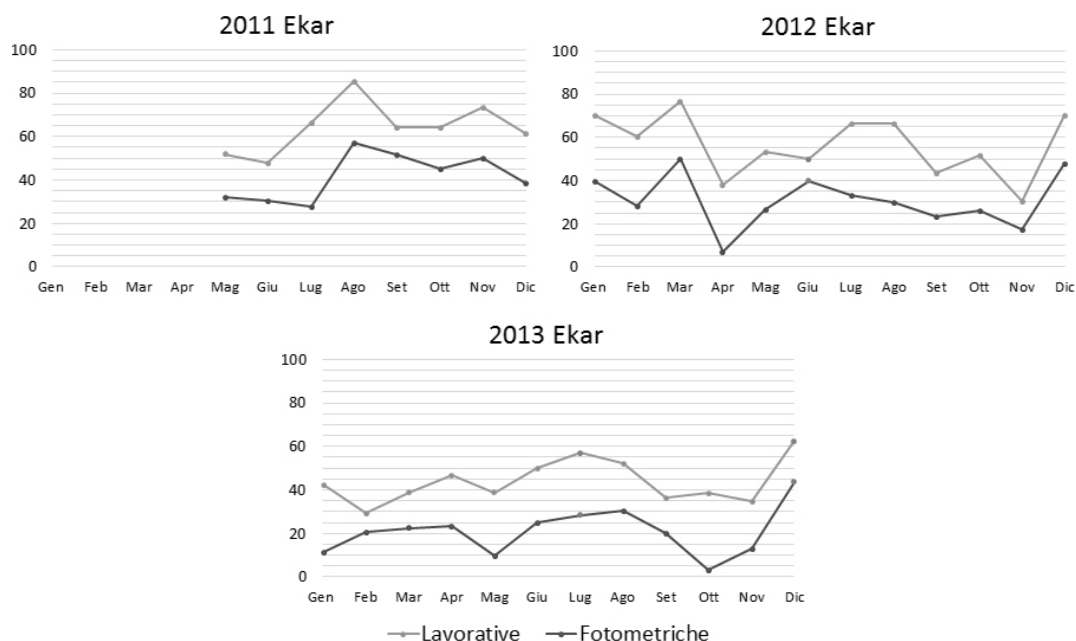


Figura 9.5: Andamenti delle percentuali fotometriche (linea azzurra) e lavorative (linea blu) per il sito di Ekar.

Andamenti medi mensili e annuali e confronto tra i siti

Per ricercare una stima di una possibile differenza stagionale tra i due siti sono state calcolate le percentuali mensili totali, sommando le notti fotometriche, lavorative e totali solamente dai mesi statisticamente più veritieri (escludendo quindi quelli evidenziati in tabella). Il risultato è mostrato in Figura 9.6.

Il motivo per cui è assente il mese di luglio per il sito di Pennar è perchè presentava un numero di dati insufficiente (luglio 2014 e 2016 mancante e luglio 2015 solamente 16 notti su 30).

Una prima cosa che si può notare è la differenza tra i mesi invernali, in cui Pennar presenta un numero di notti fotometriche e lavorative maggiore, e quelli estivi ed autunnali in cui la situazione si capovolge.

Se ricerchiamo i mesi in cui Pennar supera Ekar sono gli stessi (a parte agosto e novembre) sia per le notti fotometriche che per quelle fotometriche e spettroscopiche.

Le differenze medie mensili maggiori misurate per le notti lavorative sono nei mesi di ottobre (4 giorni), novembre e gennaio (3 notti); considerando le sole notti fotometriche si ottiene sempre un valore massimo di 4 notti per settembre e di 3 in marzo; tenendo sempre conto che mancano le stime per il mese di luglio.

La mancanza di una evidente differenza consistente nei due siti si nota anche dal grafico degli andamenti delle medie annuali in Figura 9.7.

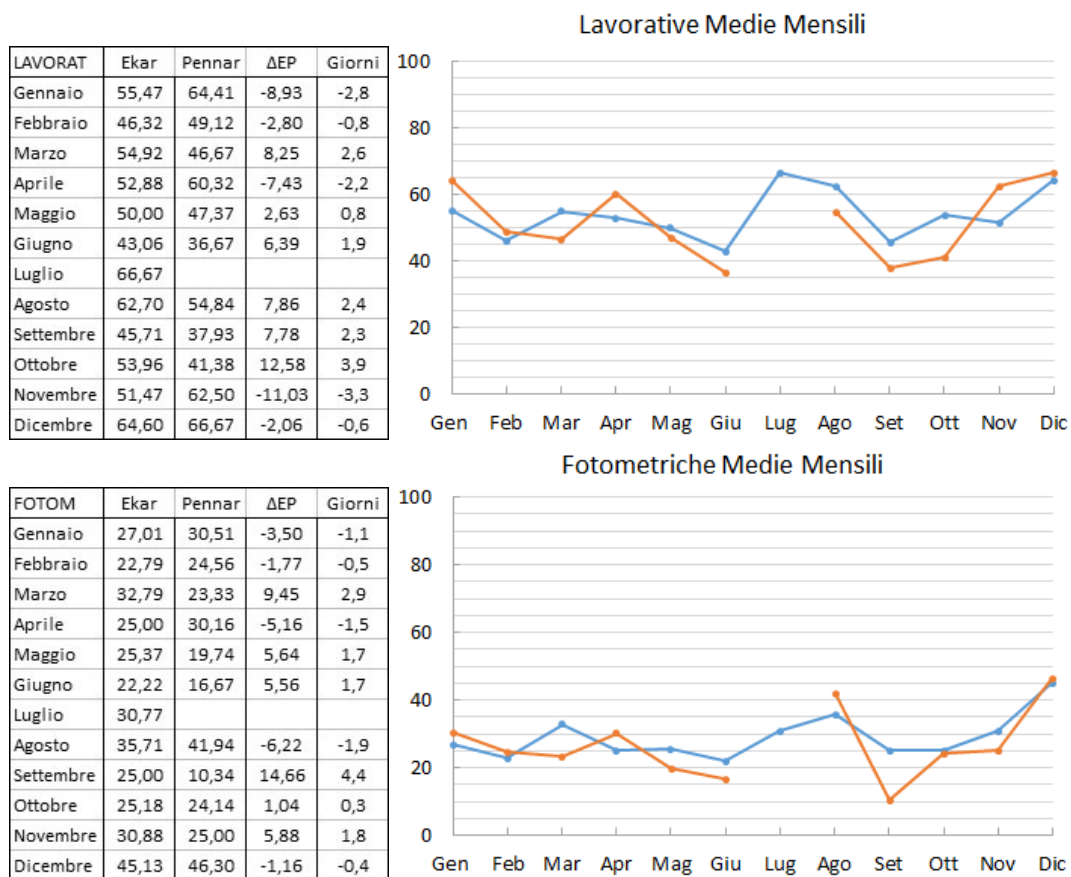


Figura 9.6: Confronto delle percentuali di notti lavorative e fotometriche medie mensili considerando solo i mesi con un numero di notti registrate superiore a 16.

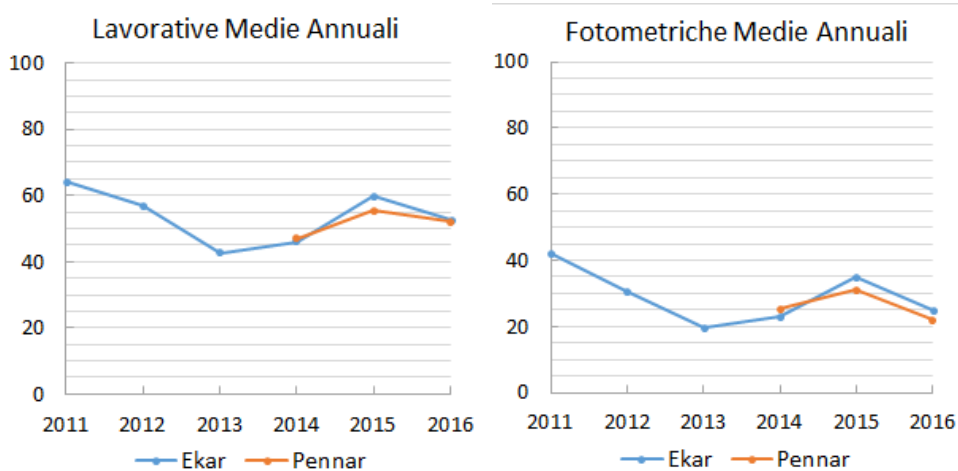


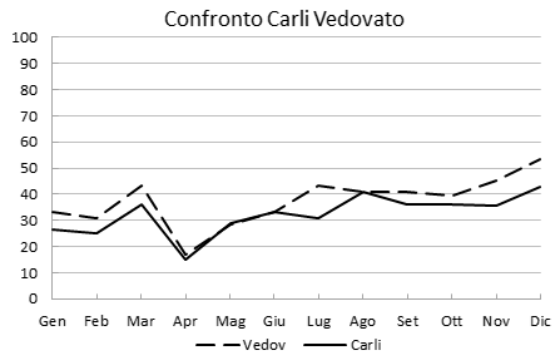
Figura 9.7: Confronto delle percentuali delle notti fotometriche e lavorative medie annuali.

Confronto dei risultati con quelli della Dott.sa Vedovato

La Vedovato ha utilizzato un valore limite delle fluttuazioni pari a $0,05 \text{ mag arcsec}^{-2}$ (valore ristretto se si considera che la selezione è stata fatta manualmente e una dispersione così bassa si riesce a mala pena cogliere, oltre al fatto che l'errore strumentale è di $0,1 \text{ mag arcsec}^{-2}$).

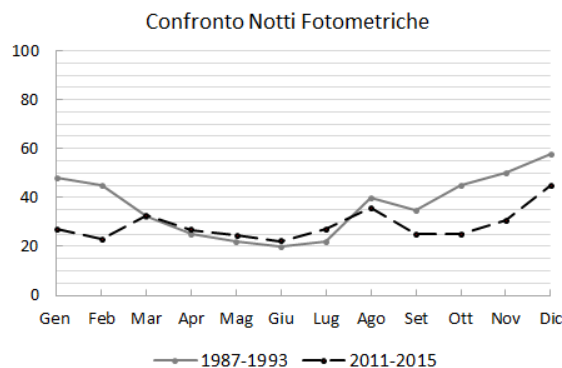
Confrontando le medie mensili ottenute in questa analisi con quelle della Vedovato nello stesso periodo si nota come le prime siano in generale sottostimate (a parte i periodi estivi) nonostante il maggior limite imposto alle fluttuazioni. Le differenze sono importanti invece nei mesi di luglio, novembre e dicembre (in media del 10% e di 3-4 notti).

C'è da dire però che il numero di notti totali registrate ed analizzate dalla Vedovato sono diverse da quelle di questa analisi, in genere superiori di 2-3 giorni; quindi si può supporre che parte della differenza sia dovuta alla mancanza della valutazione di queste notti che possono aver influenzato in parte le percentuali trovate.



Confronto dei risultati con quelli d'archivio

Un confronto interessante è stato quello effettuato con i dati storici (utilizzati nel lavoro della Vedovato) del periodo 1987-1993. Come si mostra in Figura ?? mentre il periodo estivo mantiene la stessa media, il periodo invernale si discosta fortemente. Due possono essere i fattori, oltre ad una effettiva diminuzione delle notti fotometriche nel periodo invernale: da una parte non sappiamo quale siano stati i criteri di selezione che potrebbero essere differenti, dall'altra potrebbe essere l'influenza della diversa lunghezza della notte, maggiore in quel periodo.



Cambiamento della situazione di copertura nuvolosa e valori medi finali

Per ottenere un valore indicativo del numero di notti lavorative e fotometriche annuali medie nei due siti sono state calcolate le percentuali annuali (dalla somma delle fotometriche e lavorative mensili rispetto alla somma delle totali), comprendendo tutti i mesi, trasformato poi questi valori in notti rispetto ad un anno completo e mediato i risultati (Figura 9.9).

Le percentuali di notti fotometriche sono dell'ordine del 25-30%; una media piuttosto bassa se confrontata ad esempio con quella del TNG a La Palma di circa il 50% (A. Della Valle, Y. Maruccia, 2009) o del 65-75% per il San Pedro Martin Observatory in California (Plauchu Frayn, 2016 e Tapia, 2007).

Lo stesso per le notti lavorative di circa il 50%, contro l'oltre 80% delle notti con coperture inferiori al 20% (criterio di selezione più rigido delle spettroscopiche qui considerate), sia per il TNG e SPM Observatory.

Il confronto con Rosino dimostra che non vi è stato nel tempo una variazione importante delle notti fotometriche e lavorative. Ricordiamo però che Rosino ha suddiviso le notti in serene e in notti parzialmente serene (e quindi la definizione di fotometrica e spettroscopica qui utilizzata potrebbe al limite essere una sottostima di questi valori), mentre le notti lavorative sono la somma delle prime due.

Osservando gli andamenti annuali e valutando i valori differenze precedenti in conclusione, anche se i dati di Pennar sono ancora troppo pochi, questa analisi non ha evidenziato nessun fenomeno meteorologico importante che caratterizzi un sito rispetto all'altro.

Per quanto riguarda invece la situazione del cielo i dati a disposizione si riferiscono ad un periodo piuttosto ristretto per poter dare delle indicazioni su un eventuale miglioramento o peggioramento progressivo. L'unica cosa che possiamo dire è che dopo un calo del numero di notti serene, con il culmine nel 2013 e 2014, si è susseguito un loro aumento. In generale il trend è stato comunque di una diminuzione, come si evince dalle linee di tendenza in Figura 9.8 (sono stati considerati solo gli anni con un numero di dati più completi). Per avere una stima invece di questo possibile cambiamento consideriamo i valori degli andamenti mensili (che tengono conto con maggior precisione del periodo analizzato) di Ekar che si sviluppano su un lasso di tempo maggiore. I valori sono di una diminuzione mensile del 6 e 8%, rispettivamente per le lavorative e fotometriche, cioè di 1,2-1,7 notti nell'arco dei 61 mesi considerati, cioè circa 4 anni e mezzo.

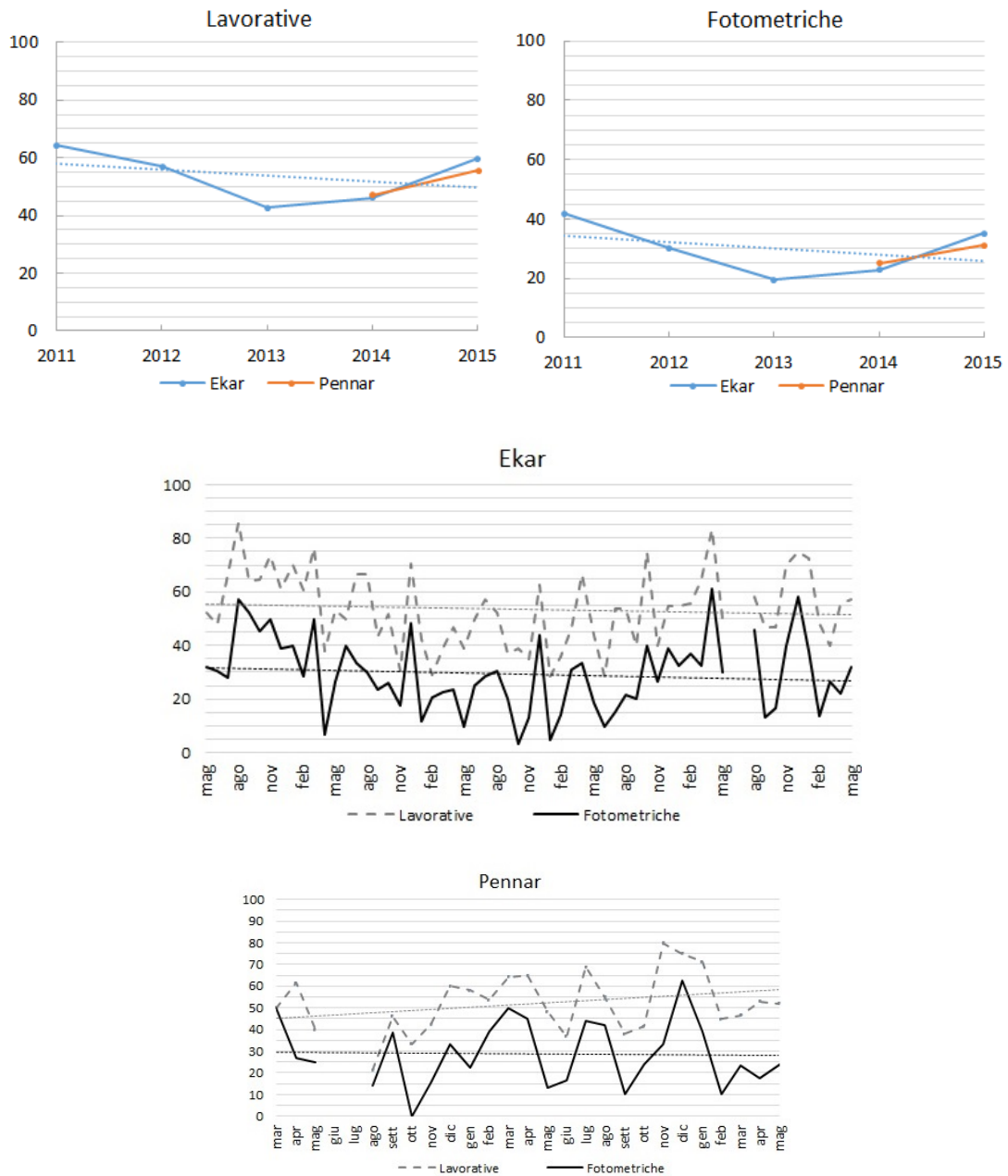


Figura 9.8: Andamenti dei valori percentuali annuali e mensili.

CAPITOLO 9. ANALISI DATI

Ekar							
2011				2012			
% Lavorative	Notti Lavor	% Fotom	Notti Fotom	% Lavorative	Notti Lavor	% Fotom	Notti Fotom
64,22	234	42,16	154	57,14	209	30,48	111
2013				2014			
% Lavorative	Notti Lavor	% Fotom	Notti Fotom	% Lavorative	Notti Lavor	% Fotom	Notti Fotom
42,67	156	19,54	71	46,12	168	22,87	83
2015				2016			
% Lavorative	Notti Lavor	% Fotom	Notti Fotom	% Lavorative	Notti Lavor	% Fotom	Notti Fotom
59,62	218	35,47	129	52,56	192	25,00	91

Pennar							
2014				2015			
% Lavorative	Notti Lavor	% Fotom	Notti Fotom	% Lavorative	Notti Lavor	% Fotom	Notti Fotom
47,02	172	24,50	89	55,59	203	31,31	114
2016							
% Lavorative	Notti Lavor	% Fotom	Notti Fotom				
52,11	190	21,13	77				

Prof. Rosino							
1961		1962		1963		1964	
Notti Lavor	Notti Fotom	Notti Lavor	Notti Fotom	Notti Lavor	Notti Fotom	Notti Lavor	Notti Fotom
193	123	221	127	208	122,00	191	106
1965		1966		1967		1968	
Notti Lavor	Notti Fotom	Notti Lavor	Notti Fotom	Notti Lavor	Notti Fotom	Notti Lavor	Notti Fotom
178	95,00	189	91	206	102,00	193	112
1969		1970		1971			
Notti Lavor	Notti Fotom	Notti Lavor	Notti Fotom	Notti Lavor	Notti Fotom		
190	98,00	193	115	181	104,00		

	Ekar		Pennar		Prof. Rosino	
	Lavorative	Fotometriche	Lavorative	Fotometriche	Lavorative	Fotometriche
Giorni	196	107	188	94	195	109
%	53,77	29,25	51,57	25,65	53,37	29,76

Figura 9.9: Tabelle dei valori finali ricavati per le notti fotometriche e spettroscopiche medie annuali. Sono riportati per ogni anno e sito i valori percentuali e complessivi calcolati su un anno completo. Ricordiamo che è possibile che la definizione di notte lavorativa di Rosino sia diversa.

9.1. COPERTURA NUVOLOSA

	Ekar													
	2011							2012						
	Fotom	Spett	Coperte	Totali	Fotom %	Lavorat %	Copert %	Fotom	Spett	Coperte	Totali	Fotom %	Lavorat %	Copert %
Gennaio							12	9	9	30	40,00	70,00	30,00	
Febbraio							8	9	11	28	28,57	60,71	39,29	
Marzo							15	8	7	30	50,00	76,67	23,33	
Aprile							2	9	18	29	6,90	37,93	62,07	
Maggio	8	5	12	25	32,00	52,00	48,00	8	8	14	30	26,67	53,33	46,67
Giugno	7	4	12	23	30,43	47,83	52,17	4	1	5	10	40,00	50,00	50,00
Luglio	5	7	6	18	27,78	66,67	33,33	7	7	7	21	33,33	66,67	33,33
Agosto	12	6	3	21	57,14	85,71	14,29	9	11	10	30	30,00	66,67	33,33
Settembre	13	3	9	25	52,00	64,00	36,00	7	6	17	30	23,33	43,33	56,67
Ottobre	14	6	11	31	45,16	64,52	35,48	7	7	13	27	25,93	51,85	48,15
Novembre	15	7	8	30	50,00	73,33	26,67	4	3	16	23	17,39	30,43	69,57
Dicembre	12	7	12	31	38,71	61,29	38,71	13	6	8	27	48,15	70,37	29,63
ANNUALI	86	45	73	204	42,16	64,22	35,78	96	84	135	315	30,48	57,14	42,86

	2013							2014						
	Fotom	Spett	Coperte	Totali	Fotom %	Lavorat %	Copert %	Fotom	Spett	Coperte	Totali	Fotom %	Lavorat %	Copert %
	Gennaio	3	8	15	26	11,54	42,31	57,69	1	5	14	21	4,76	28,57
Febbraio	5	2	17	24	20,83	29,17	70,83	4	6	13	28	14,29	35,71	46,43
Marzo	7	5	19	31	22,58	38,71	61,29	4	2	5	13	30,77	46,15	38,46
Aprile	7	7	16	30	23,33	46,67	53,33	4	4	4	12	33,33	66,67	33,33
Maggio	3	9	19	31	9,68	38,71	61,29	3	4	9	16	18,75	43,75	56,25
Giugno	7	7	14	28	25,00	50,00	50,00	2	4	13	21	9,52	28,57	61,90
Luglio	4	4	6	14	28,57	57,14	42,86	2	5	6	13	15,38	53,85	46,15
Agosto	7	5	11	23	30,43	52,17	47,83	6	9	14	28	21,43	53,57	50,00
Settembre	6	5	19	30	20,00	36,67	63,33	5	5	10	25	20,00	40,00	40,00
Ottobre	1	11	19	31	3,23	38,71	61,29	8	7	6	20	40,00	75,00	30,00
Novembre	3	5	15	23	13,04	34,78	65,22	8	4	18	30	26,67	40,00	60,00
Dicembre	7	3	6	16	43,75	62,50	37,50	12	5	13	31	38,71	54,84	41,94
ANNUALI	60	71	176	307	19,54	42,67	57,33	59	60	125	258	22,87	46,12	48,45

	2015							2016						
	Fotom	Spett	Coperte	Totali	Fotom %	Lavorat %	Copert %	Fotom	Spett	Coperte	Totali	Fotom %	Lavorat %	Copert %
	Gennaio	10	7	14	31	32,26	54,84	45,16	11	10	8	29	37,93	72,41
Febbraio	10	5	12	27	37,04	55,56	44,44	4	10	15	29	13,79	48,28	51,72
Marzo	10	10	11	31	32,26	64,52	35,48	8	4	18	30	26,67	40,00	60,00
Aprile	12	3	3	18	66,67	83,33	16,67	6	9	12	27	22,22	55,56	44,44
Maggio	6	4	10	20	30,00	50,00	50,00	9	7	12	28	32,14	57,14	42,86
Giugno								1	3	9	13	7,69	30,77	69,23
Luglio														
Agosto	11	3	10	24	45,83	58,33	41,67							
Settembre	4	10	16	30	13,33	46,67	53,33							
Ottobre	5	9	16	30	16,67	46,67	53,33							
Novembre	12	9	9	30	40,00	70,00	30,00							
Dicembre	14	4	6	24	58,33	75,00	25,00							
ANNUALI	94	64	107	265	35,47	59,62	40,38	39	43	74	156	25,00	52,56	47,44

Figura 9.10: Tabelle dei conteggi effettuati per Ekar. Le celle evidenziate in grigio corrispondono ai valori dei giorni totali registrati inferiori a 16, i cui mesi corrispondenti non sono stati considerati nelle analisi a causa della scarsa validità statistica.

CAPITOLO 9. ANALISI DATI

	Pennar													
	2014							2015						
	Fotom	Spett	Coperte	Totali	Fotom %	Lavorat %	Copert %	Fotom	Spett	Coperte	Totali	Fotom %	Lavorat %	Copert %
Gennaio								7	11	13	31	22,58	58,06	41,94
Febbraio								11	4	13	28	39,29	53,57	46,43
Marzo	5	0	5	10	50,00	50,00	50,00	7	2	5	14	50,00	64,29	35,71
Aprile	7	9	10	26	26,92	61,54	38,46	8	5	7	20	40,00	65,00	35,00
Maggio	5	3	12	20	25,00	40,00	60,00	5	10	16	31	16,13	48,39	51,61
Giugno								5	6	19	30	16,67	36,67	63,33
Luglio								7	4	5	16	43,75	68,75	31,25
Agosto	2	1	11	14	14,29	21,43	78,57	13	4	14	31	41,94	54,84	45,16
Settembre	5	1	7	13	38,46	46,15	53,85	3	8	18	29	10,34	37,93	62,07
Ottobre	0	4	8	12	0,00	33,33	66,67	7	5	17	29	24,14	41,38	58,62
Novembre	3	8	15	26	11,54	42,31	57,69	10	14	6	30	33,33	80,00	20,00
Dicembre	10	8	12	30	33,33	60,00	40,00	15	3	6	24	62,50	75,00	25,00
ANNUALI	37	34	80	151	24,50	47,02	52,98	98	76	139	313	31,31	55,59	44,41

	2016						
	Fotom	Spett	Coperte	Totali	Fotom %	Lavorat %	Copert %
Gennaio	11	9	8	28	39,29	71,43	28,57
Febbraio	3	10	16	29	10,34	44,83	55,17
Marzo	7	7	16	30	23,33	46,67	53,33
Aprile	3	6	8	17	17,65	52,94	47,06
Maggio	5	8	12	25	20,00	52,00	48,00
Giugno	1	4	8	13	7,69	38,46	61,54
Luglio							
Agosto							
Settembre							
Ottobre							
Novembre							
Dicembre							
ANNUALI	30	44	68	142	21,13	52,11	47,89

Figura 9.11: Tabelle dei conteggi effettuati. Le celle evidenziate in grigio corrispondono ai valori dei giorni totali registrati inferiori a 16, i cui mesi corrispondenti non sono stati considerati nelle analisi a causa della scarsa validità statistica.

9.2 Temperatura

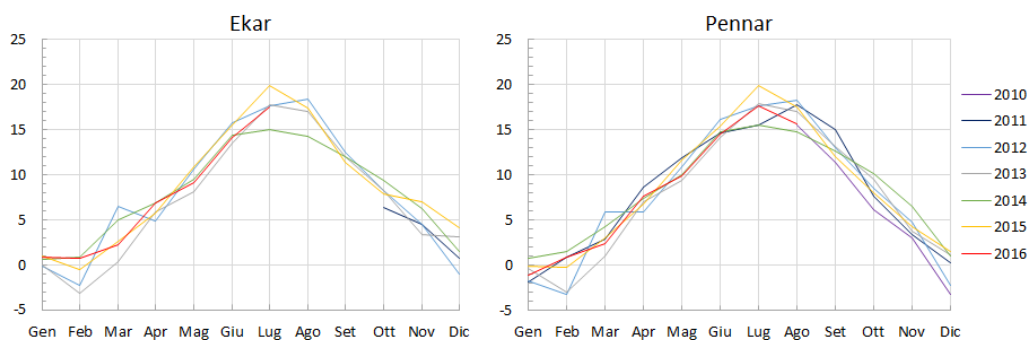
I dati a disposizione sono: per Pennar quelli dell'archivio dal 1957 al 2001, in cui sono riportati i valori delle massime e minime giornaliere, e quelli da agosto 2010 ad agosto 2016 delle temperature registrate ad intervalli di un minuto. Per Ekar invece coprono il periodo da ottobre 2011 a luglio 2016 sempre con valori registrati ad ogni minuto. L'unità di misura è il °C.

La prima cosa che è stata fatta è quella di individuare gli errori di rilevazione; per i dati recenti sono presenti dei valori molto elevati e che fortemente si discostano da quello del minuto precedente e consecutivo; siccome sono per lo più sporadici e visto la mole di dati a disposizione non sono stati semplicemente presi in considerazione. Nei dati d'archivio invece vi erano diversi gap, anche di diversi giorni; per questi è stato usato lo stesso metodo dalla Dott.sa Gerlin che nella sua tesi ha mediato i giorni direttamente precedenti e successivi.

Per il confronto e l'analisi dei due siti negli ultimi anni sono state ricavate le medie mensili mediando tutti i dati nel mese, e similmente per le medie annuali.

I risultati sono riportati nelle tabelle in Figura 9.15; sono stati evidenziati i valori minimi e massimi annuali.

L'andamento tipico mensile dei due siti assume una forma a campana.



I mesi mediamente più freddi sono i mesi di gennaio e febbraio, con un valore medio pari a circa $-1,4^{\circ}\text{C}$, mentre i mesi più caldi sono luglio e agosto con un valore medio delle temperature di $17,8^{\circ}\text{C}$.

Confronto tra i siti

In Figura 9.12 sono stati riportati come esempio i valori medi degli anni 2012 e 2014 e di alcuni mesi come marzo, aprile, agosto e dicembre (in particolare gli ultimi due sono tra quelli con la maggior differenza media tra i due siti).

Vengono inoltre riportate le differenze in temperatura ottenute dalle medie mensili (sottraendo a quelle di Ekar quelle di Pennar).

Ekar ha temperature maggiori nei mesi invernali di novembre, dicembre e gennaio, mentre negli altri risulta mediamente più freddo. Dicembre, gennaio ed aprile sono anche i mesi in cui la differenza media è maggiore, avvicinandosi al grado. I risultati in Figura sono in Figura 9.13.

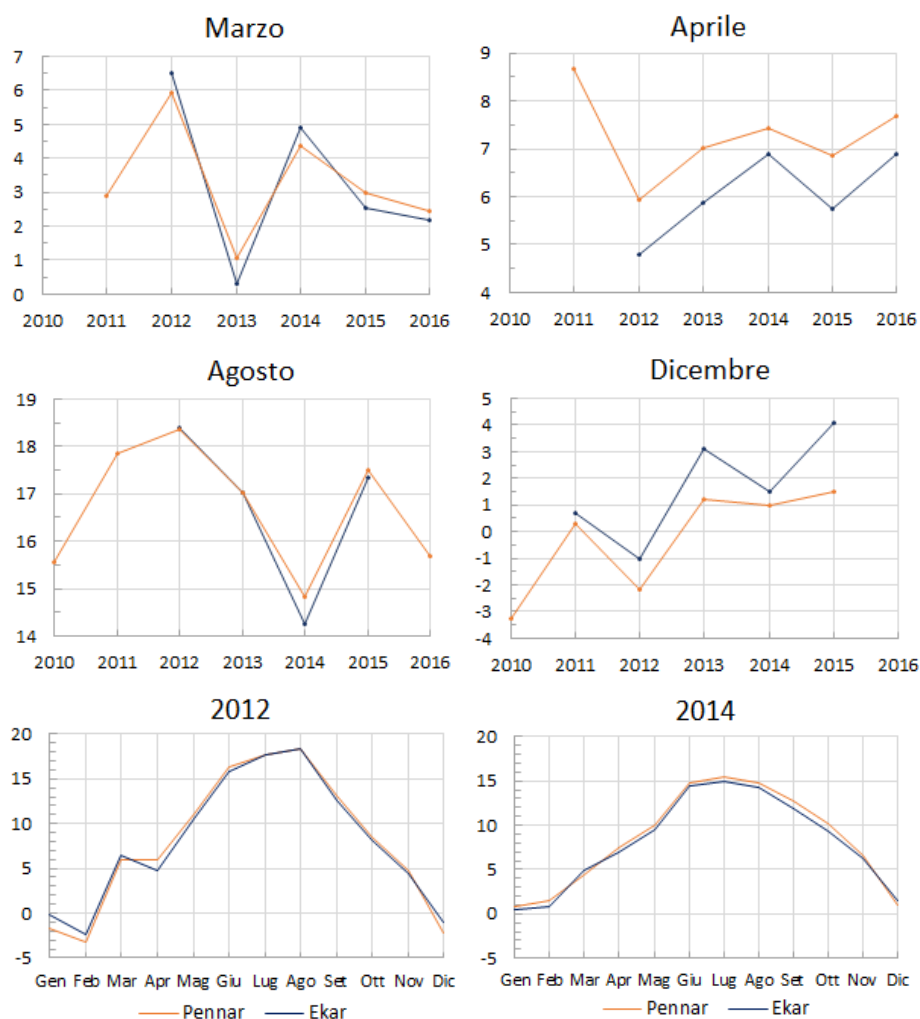


Figura 9.12: Esempi di confronto tra alcuni andamenti mensili ed annuali.

Differenza media $T_{Ekar} - T_{Pennar}$	
Gennaio	0,91
Febbraio	-0,11
Marzo	-0,06
Aprile	-0,95
Maggio	-0,77
Giugno	-0,43
Luglio	-0,20
Agosto	-0,17
Settembre	-0,80
Ottobre	-0,68
Novembre	0,39
Dicembre	1,53

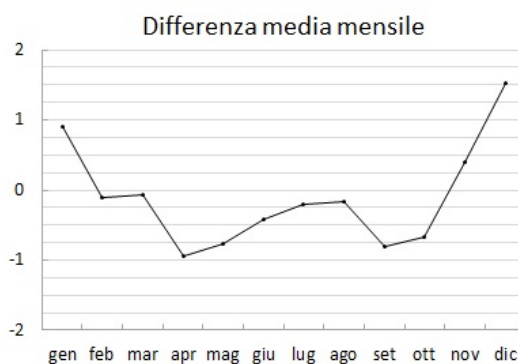
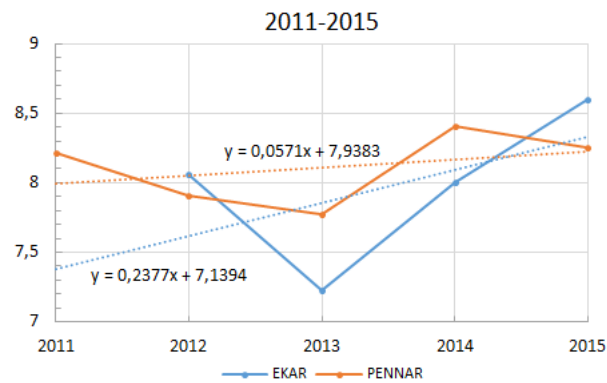


Figura 9.13: Valori delle differenze medie di temperature mensili in °C nel periodo considerato.

Riscaldamento globale

Se ora consideriamo l'andamento globale nel tempo per entrambi i siti, il risultato è un aumento di temperatura, con valori medi di crescita di $0,71^{\circ}\text{C}$ nell'intervallo dal 2012 al 2015 per Ekar (più di 2°C ogni dieci anni), e meno elevati pari a $0,23^{\circ}\text{C}$ per Pennar dal 2011 al 2015 (pari a mezzo grado ogni 10 anni).



I dati di Pennar sono stati confrontati con quelli d'archivio. Ricordiamo però che questi ultimi raccolgono solamente le temperature massime e minime giornaliere, quindi per ricavare la media giornaliera sono state mediate la temperatura massima e minima, poi mediando le medie giornaliere si è ottenuto quella mensile, e da queste la media annuale. Perché il confronto avesse consistenza quindi si è dovuto applicare lo stesso metodo ai dati di Pennar più recenti (ottenendo differenze per i valori medi mensili anche dell'ordine di $1,3^{\circ}\text{C}$ rispetto al primo metodo).

Sono stati quindi uniti i risultati in Figura 9.14. L'andamento medio mostra un aumento continuo della temperatura che si protrae fino ai giorni nostri, con un valore medio di $0,3^{\circ}\text{C}$ ogni 10 anni, del tutto consistente con l'andamento del global warming che sostiene un aumento dai 2°C ai 4°C ogni 100 anni.

Se però consideriamo separatamente i dati possiamo notare come il periodo attuale si trovi leggermente al di sotto della tendenza prevista dai dati storici (ma che a loro volta mostrano un aumento molto repentino).

Sarebbe interessante analizzare il periodo di tempo mancante (dal 2002 al 2010) per capire se vi sia stato effettivamente un arresto della crescita o comunque una sua diminuzione.

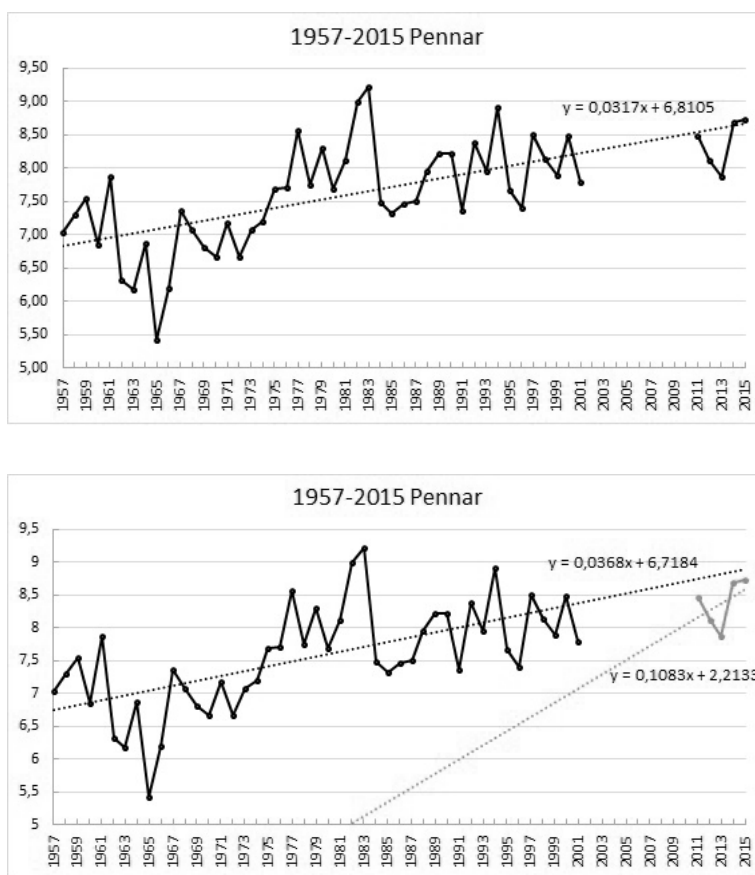


Figura 9.14: Andamento delle temperature in °C e linea di tendenza ottenuti considerando tutti i dati assieme (in alto) e separatamente (in basso).

9.2. TEMPERATURA

EKAR								PENNAR								
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Media		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Media
Gennaio		-0,17	-0,08	0,57	0,93	0,79	0,41	Gennaio		-1,87	-1,71	-0,34	0,78	-0,13	-1,14	-0,73
Febbraio		-2,31	-3,20	0,85	-0,56	0,70	-0,90	Febbraio		0,89	-3,22	-2,90	1,51	-0,25	0,91	-0,51
Marzo		6,49	0,30	4,92	2,54	2,20	3,29	Marzo		2,90	5,94	1,04	4,35	2,98	2,45	3,28
Aprile		4,79	5,86	6,87	5,75	6,89	6,03	Aprile		8,68	5,92	7,02	7,43	6,85	7,68	7,26
Maggio		10,56	8,11	9,43	10,90	9,11	9,62	Maggio		11,93	10,97	9,37	10,02	11,66	9,96	10,65
Giugno		15,77	13,42	14,39	15,43	14,09	14,62	Giugno		14,73	16,23	14,18	14,80	15,41	14,60	14,99
Luglio		17,62	17,76	14,91	19,89	17,50	17,54	Luglio		15,55	17,71	17,90	15,52	19,87	17,70	17,37
Agosto		18,39	17,02	14,26	17,34		16,75	Agosto		15,55	17,86	18,35	17,03	14,81	17,50	15,67
Settembre		12,53	12,00	11,93	11,36		11,96	Settembre		11,39	15,08	13,06	13,17	12,73	12,07	12,92
Ottobre	6,41	8,18	8,28	9,29	7,89		8,01	Ottobre	6,18	7,70	8,58	9,51	10,17	8,08		8,37
Novembre	4,50	4,49	3,36	6,22	7,01		5,12	Novembre	3,08	3,45	4,80	3,85	6,59	4,28		4,34
Dicembre	0,71	-1,05	3,09	1,49	4,08		1,67	Dicembre	-3,27	0,27	-2,18	1,22	0,99	1,49		-0,25
ANNUALI	3,92	8,06	7,22	8,01	8,59	7,56	7,84	ANNUALI	7,19	8,22	7,90	7,77	8,40	8,25	8,27	7,86

PENNAR															
	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971
Gennaio	-3,97	-1,60	-1,08	-1,11	-2,74	-0,48	-5,23	-1,87	-2,27	-4,35	-2,37	-2,90	-0,69	-0,92	-1,47
Febbraio	-0,39	2,09	2,23	-1,03	1,89	-1,41	-3,96	-0,09	-4,25	1,68	-1,61	0,55	-2,30	-2,80	-0,50
Marzo	3,73	-0,24	5,06	2,76	4,71	-0,32	1,42	1,64	0,85	1,42	3,90	2,90	1,27	-0,24	-1,32
Aprile	5,73	3,43	6,30	5,97	8,69	5,80	5,40	6,28	4,60	6,53	4,27	7,37	5,15	3,88	6,48
Maggio	8,52	12,02	9,44	9,71	9,15	8,48	9,52	10,21	8,50	9,52	9,98	9,16	12,16	7,66	10,30
Giugno	13,97	12,90	13,33	13,99	14,32	11,97	12,72	14,35	12,60	13,12	12,52	12,52	12,28	14,43	12,38
Luglio	16,61	15,48	16,95	13,95	14,73	14,45	15,81	15,55	14,03	13,31	17,39	15,89	16,13	15,53	16,35
Agosto	14,74	15,92	15,19	15,03	15,23	16,89	14,23	14,16	13,47	13,05	15,82	14,37	14,53	15,15	17,62
Settembre	11,45	13,35	11,98	10,97	14,97	12,38	12,22	11,92	10,25	12,73	13,12	12,37	12,75	13,73	11,28
Ottobre	8,19	8,63	6,85	7,90	9,35	8,92	7,68	6,66	7,52	10,53	10,79	9,98	9,74	8,02	8,39
Novembre	5,07	4,93	3,26	4,17	3,80	1,97	5,45	4,50	1,67	0,25	5,12	4,58	3,80	5,28	3,13
Dicembre	0,31	0,40	0,60	0,27	0,16	-3,13	-1,82	-0,95	-2,61	-2,22	-0,29	-2,08	-3,61	-0,31	2,87
ANNUALI	7,03	7,30	7,54	6,86	7,88	6,33	6,17	6,87	5,42	6,20	7,37	7,07	6,82	6,68	7,18

	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Gennaio	-1,39	0,45	2,48	1,28	0,70	0,47	0,11	-2,31	-1,93	-2,68	0,55	3,73	-0,39	-4,65	-2,40
Febbraio	1,14	-0,98	1,38	0,46	0,97	2,07	-0,61	1,18	1,62	-0,71	-0,09	-1,63	-0,36	-1,48	-2,96
Marzo	3,47	1,18	2,94	1,97	1,16	6,32	3,92	4,35	3,23	5,47	2,47	4,95	1,72	1,81	2,44
Aprile	5,30	3,75	4,70	6,07	6,25	5,80	5,45	5,83	5,03	8,10	6,52	7,58	6,43	5,62	5,43
Maggio	8,71	9,82	8,81	10,23	10,34	10,92	9,19	10,69	8,84	10,57	11,58	10,98	8,47	10,25	12,90
Giugno	12,38	13,90	12,35	12,75	14,37	14,62	13,68	16,07	14,33	15,50	16,65	15,35	14,00	12,91	13,50
Luglio	15,60	15,58	14,97	16,27	16,65	17,27	16,05	17,08	15,97	15,95	18,53	20,69	16,88	17,70	15,76
Agosto	14,58	16,61	16,87	15,71	13,43	15,61	15,90	16,05	18,02	16,92	16,84	17,37	15,16	16,52	16,45
Settembre	8,93	13,95	12,48	14,43	10,71	12,40	13,75	13,83	14,85	14,48	16,07	14,68	11,91	14,89	13,13
Ottobre	6,72	7,92	3,94	8,21	10,23	10,82	10,06	9,82	9,56	9,58	9,59	10,58	9,40	9,93	9,82
Novembre	3,67	3,09	2,97	2,82	5,19	4,84	5,85	4,05	3,46	4,17	6,65	4,28	4,69	1,62	4,68
Dicembre	0,79	-0,71	2,08	1,61	0,21	1,05	0,21	2,48	-0,56	-0,47	2,10	1,24	1,42	2,02	-0,02
ANNUALI	6,67	7,07	7,20	7,70	7,72	8,56	7,75	8,31	7,70	8,13	9,00	9,22	7,48	7,32	7,46

	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Gennaio	-2,37	1,21	2,42	1,34	-0,63	1,00	0,24	0,47	-1,74	1,02	1,82	0,89	0,66	-1,18	-0,15
Febbraio	0,14	0,28	3,18	3,82	-2,32	1,83	1,02	-0,30	2,13	-1,36	2,20	4,23	-1,57	1,47	1,41
Marzo	-1,28	2,15	5,48	6,00	5,15	3,89	2,63	6,42	2,27	1,10	5,79	3,02	3,82	4,10	5,06
Aprile	6,60	6,67	5,92	5,42	4,85	6,17	6,95	5,50	6,58	7,18	5,13	6,55	6,98	8,12	5,37
Maggio	8,61	11,11	10,92	11,52	7,34	11,68	11,81	11,48	10,58	11,50	11,37	10,94	12,37	12,53	12,76
Giugno	12,67	13,10	12,47	13,45	13,17	13,42	15,12	14,67	12,38	14,97	14,07	15,50	13,93	15,77	13,92
Luglio	17,27	17,48	16,45	16,77	17,77	16,94	15,90	18,40	18,48	15,58	15,98	17,35	17,19	15,08	16,81
Agosto	16,10	16,90	16,13	16,21	17,56	18,81	17,40	18,73	15,95	15,58	16,61	17,61	16,85	17,50	18,13
Settembre	15,88	12,75	12,25	12,13	14,12	13,35	11,90	13,50	10,68	10,55	15,00	12,57	14,08	13,22	10,33
Ottobre	9,31	10,35	8,97	10,34	7,55	7,44	8,81	8,63	10,29	8,37	8,55	8,24	8,84	9,60	11,06
Novembre	4,33	1,23	2,95	3,40	2,85	5,10	2,85	7,02	3,92	4,13	4,43	1,48	2,38	4,18	2,57
Dicembre	2,16	1,73	0,97	-2,15	0,37	0,52	0,34	1,73	0,00	-0,05	0,76	-0,92	-1,55	1,35	-4,26
ANNUALI	7,50	7,95	8,21	8,22	7,37	8,38	7,96	8,91	7,66	7,41	8,52	8,14	7,89	8,50	7,80

Figura 9.15: Valori delle temperature medie trovate in °C.

9.3 Confronto copertura-temperatura

Una curiosità che si è voluta approfondire è stata quella di confrontare i risultati degli andamenti delle notti lavorative con quelli della temperatura per ricercare una eventuale correlazione. Ci si è chiesto se quindi un estate più coperta fosse mediamente più fredda, o viceversa ad un periodo più mite fosse corrisposto uno con un cielo più limpido. Sono stati riportati i risultati ottenuti per Ekar in Figura 9.16. Pennar ha invece dati insufficienti per poter fare un tale confronto.

Al di là delle scale utilizzate che influenzano la pendenza dei segmenti, confrontando i tratti di crescita e decrescenza effettivamente si possono trovare delle somiglianze, soprattutto in alcuni mesi, ma è anche vero che non si può considerare una regola generale.

Sappiamo infatti che la temperatura è solo uno dei fattori che porta alla formazione delle nubi e che il processo che le coinvolge è molto più complesso.

Sarà però interessante ripetere l'analisi in futuro avendo a disposizione un maggior quantitativo di dati.

9.3. CONFRONTO COPERTURA-TEMPERATURA

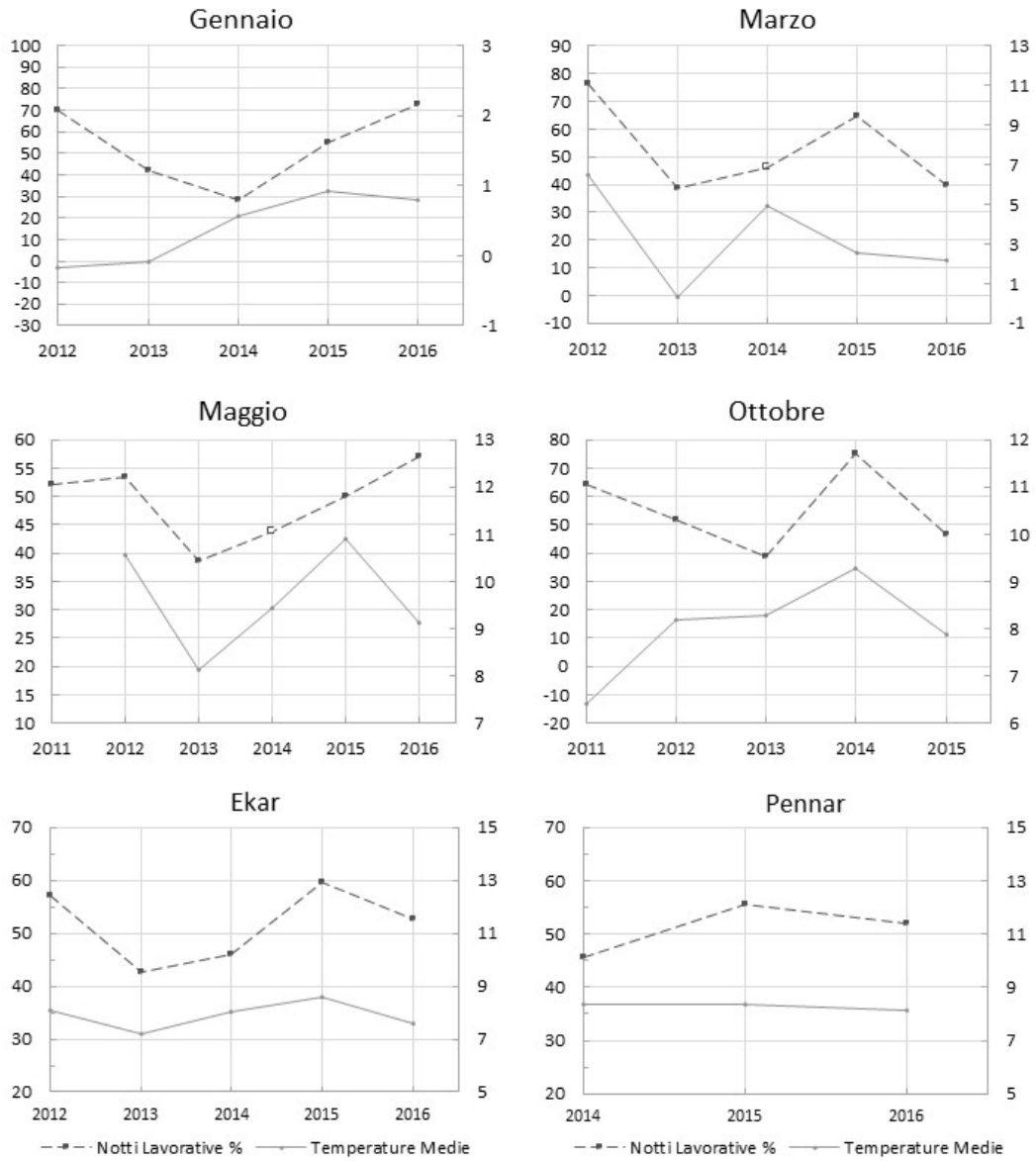


Figura 9.16: Alcuni esempi di confronto tra gli andamenti di temperatura e notti lavorative mensili per Ekar e confronto tra i valori medi annuali. L'asse delle ordinate a sinistra rappresenta le % di notti lavorative, quello a destra le temperature in °C.

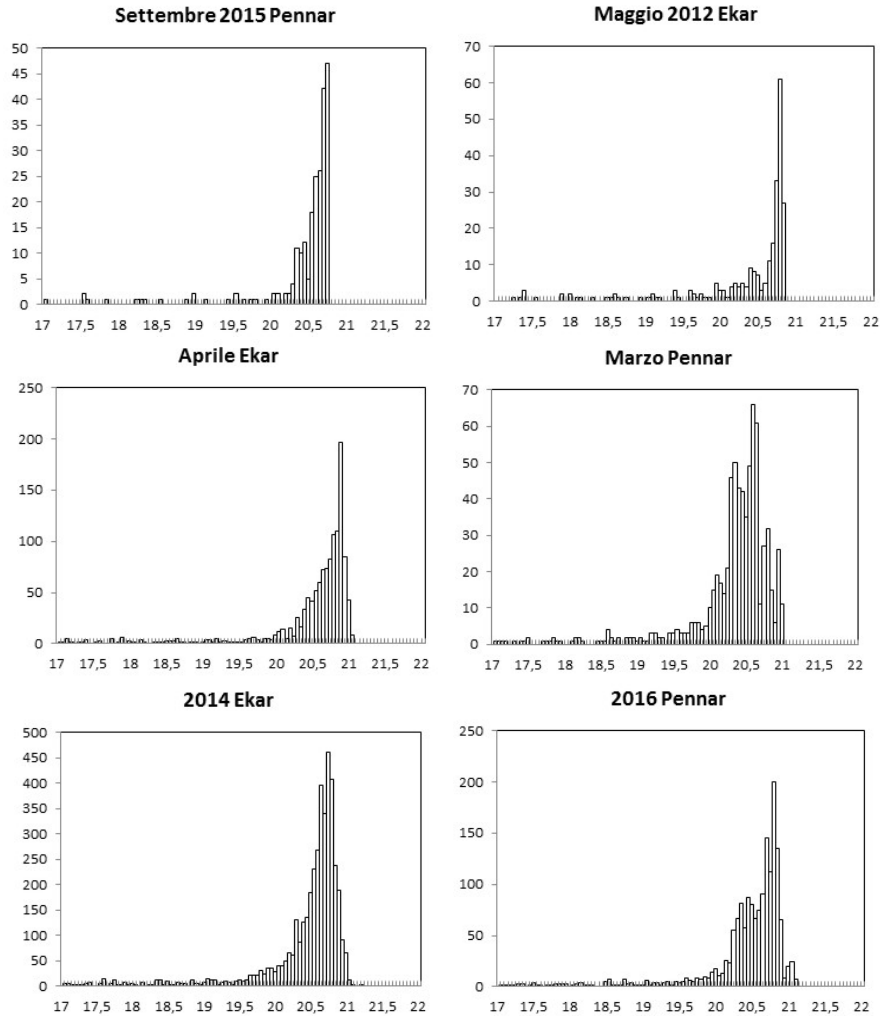


Figura 9.17: Alcuni istogrammi ottenuti (in ascissa $mag\ arcsec^{-2}$).

9.4 Luminosità del cielo

Per analizzare la luminosità del cielo di Asiago sono stati utilizzati i dati provenienti dai due SQM, selezionando e utilizzando solamente le notti di Luna Nuova fotometriche o al più buone spettroscopiche, in un intervallo di tempo di circa 7 giorni centrato sulla data di Luna Nuova (in alcuni casi si è dovuto eccedere tale limite di un paio di giorni).

Sono stati inoltre confrontati i dati ottenuti dalla Vedovato con quelli ricavati da questo studio per lo stesso periodo, ottenendo un buon fit.

Il lavoro è consistito nel creare degli istogrammi con tutti i valori di luminosità nell'intervallo che precedentemente è stato definito, cercando un valore del bin che potesse andare bene per la maggior parte dei mesi ed anni, in modo poi da poterne confrontare meglio i risultati. Il bin ottenuto è lo stesso della Vedovato ($0,1\ mag\ arcsec^{-2}$). Vengono riportati alcuni degli istogrammi ottenuti a titolo di esempio in Figura 9.17.

	Ekar							Pennar			
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Moda mensili	2014	2015	2016	Moda mensili
Gennaio		20,75	20,85	20,75	20,75	20,75	20,75		20,55	20,55	20,55
Febbraio		20,65	20,45	20,65	20,75	20,85	20,65		20,75	20,75	20,75
Marzo		20,75	20,95	20,55	20,65	20,85	20,70	20,55	20,65	20,65	20,65
Aprile		20,95	20,85	20,95	20,85	20,95	20,85	20,55	20,75	20,25	20,75
Maggio	20,95	20,75	20,85	20,75	20,75	20,85	20,75	20,55	20,55	20,65	20,55
Giugno	20,85	20,85	20,95	20,85		20,95	20,85		20,45	20,65	20,45
Luglio	20,75	20,75	20,75	20,95			20,75		20,65		20,65
Agosto	20,65	20,65	20,75	20,75	20,75		20,70	20,75	20,65		20,65
Settembre	20,75	20,85	20,85	20,85	20,55		20,75	20,75	20,65		20,65
Ottobre	20,75	20,75		20,65	20,65		20,75		20,65		20,65
Novembre	20,75	20,85	20,65	20,75	20,85		20,75	20,65	20,65		20,65
Dicembre	20,65	20,65	20,85	20,75	20,65		20,65	20,55	20,45		20,55
Annuali moda	20,75	20,65	20,85	20,75	20,75	20,85	20,77	20,60	20,60	20,65	20,62
Annuali media	20,76	20,77	20,80	20,77	20,72	20,87	20,78	20,62	20,62	20,58	20,61
modali mensili							20,74				20,63
							20,75				20,65

Figura 9.18: Tabella dei valori modali in $mag \text{ arcsec}^{-2}$ delle luminosità del sito di Ekar e Pennar.

In Figura 9.18 è stata riportata la tabella con i valori ottenuti dai vari istogrammi. Nell'ultima riga compaiono i valori annuali, calcolati in due modi; il primo è il valore ottenuto dal picco degli istogrammi creati utilizzando tutti i dati di notti fotometriche e di luna nuova per ogni anno; il secondo è una semplice media dei picchi mensili. Il fatto che i valori siano prossimi dimostra la bontà del bin considerato.

La colonna "complessivi" è stata ottenuta con il primo metodo ma per i valori mensili.

I quattro valori evidenziati rappresentano la luminosità media del cielo, i primi due sono ottenuti in ordine dalla media dei corrispettivi valori annuali, mentre il terzo è una media dei valori complessivi mensili, il quarto infine è la moda dell'istogramma ottenuto considerando tutti i dati in possesso.

Per confronto sono stati anche creati gli istogrammi ampliando l'intervallo di selezione delle notti (eliminando ad esempio le due limitazioni imposte) ed i risultati avevano nuovamente un buon fit.

I valori mancanti sono dovuti al malfunzionamento del SQM o all'insufficienza di notti limpide (come nel caso di ottobre 2013 ed ottobre 2014).

Confronto dei valori di Ekar e Pennar

Dal confronto in Figura 9.19 delle medie mensili complessive si vede come il cielo dei due siti non mostri una rilevante differenza, anche se Ekar nel complesso risulta migliore; il discostamento maggiore lo si trova nei mesi di gennaio, maggio e giugno, con valori rispettivamente per i primi due di $0,20 \text{ mag arcsec}^{-2}$ e $0,40 \text{ mag arcsec}^{-2}$ per l'ultimo; nei restanti rimaniamo attorno a differenze del $0,10 \text{ mag arcsec}^{-2}$, che ricordiamo essere anche l'errore strumentale.

Lo stesso si può dire per i valori annuali, con differenze da $0,15$ a $0,20 \text{ mag arcsec}^{-2}$.

Valori della luminosità del cielo notturno

I quattro valori della luminosità del cielo ricavati con i metodi elencati precedentemente in Figura 9.18 si trovano in un intorno molto ravvicinato, e inoltre quello di Ekar

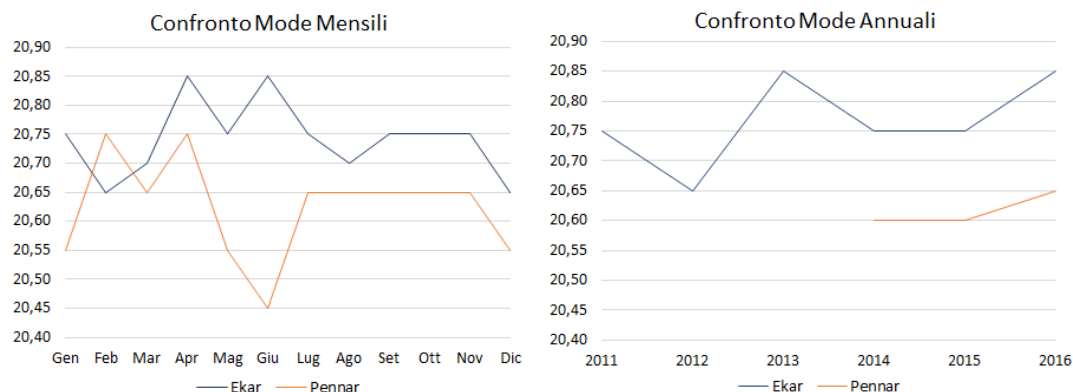


Figura 9.19: Confronto dei valori modali mensili ed annuali in $mag\ arcsec^{-2}$ per i due siti e del valore complessivo di luminosità del cielo ricavata.

è concorde con il valore trovato dalla Vedovato (che ne ha analizzato i dati da luglio 2011 a febbraio 2013).

Possiamo quindi assumere un valore di $20,65\ mag\ arcsec^{-2}$ per Pennar e uno di $20,75\ mag\ arcsec^{-2}$ per Ekar.

Per avere un termine di confronto, ricordiamo che il cielo del San Pedro Martir Observatory e quello di Roque de los Muchachos hanno un valore di $21,60\ mag\ arcsec^{-2}$ (calcolato da Plauchu Frayn nel 2016 e da Hänel nel 2009 sempre tramite SQM).

Cambiamento del cielo notturno

L'ultima analisi è stata quella di individuare un possibile miglioramento o peggioramento del livello di inquinamento del cielo.

Analizzando i valori mensili è stato ottenuto un andamento per lo più costante per entrambi i siti (con una variazione per Ekar da maggio 2011 a giugno 2016 positiva e per Pennar da marzo 2014 a giugno 2016 negativa ma dell'ordine di qualche centesimo).

Analizzando i valori medi annuali invece si ricava un lieve miglioramento per entrambi nei periodi considerati sempre però dell'ordine di qualche centesimo.

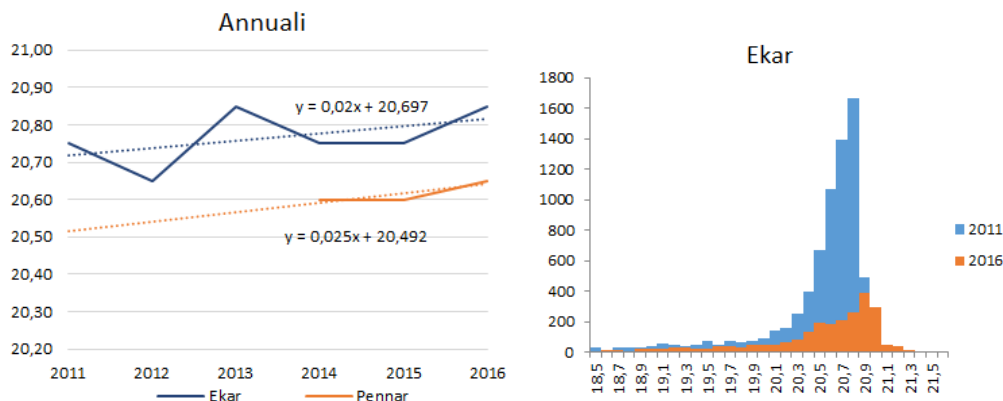


Figura 9.20: Gli andamenti annuali mostrano un leggero anche se piccolo miglioramento; lo stesso si nota nello slittamento del picco dell'istogramma per i dati di Ekar.

Nonostante la crescita di inquinamento luminoso esponenziale registrata negli ultimi decenni, i dati qui analizzati non subiscono una variazione importante nel tempo e sempre inferiore all'errore strumentale.

Si può quindi dire che il cielo dell'Altopiano sia rimasto negli ultimi 5 anni invariato.

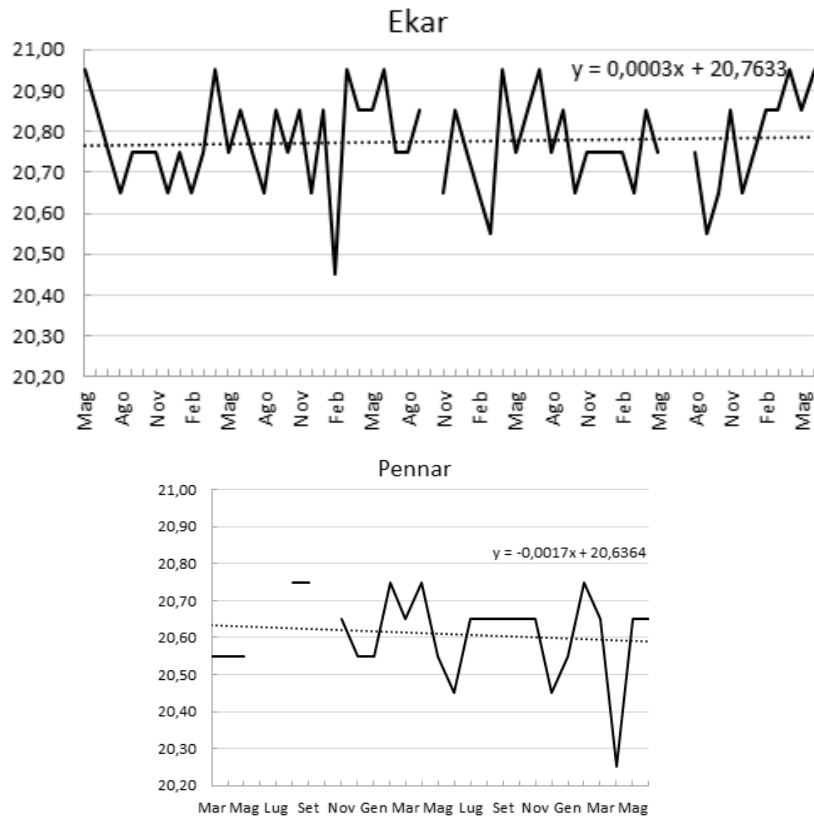


Figura 9.21: Andamenti per i due siti dei valori modali mensili in $mag\ arcsec^{-2}$ ottenuti nel tempo. Anche se per Pennar si trova un valore di pendenza negativo, i dati a disposizione sono ancora troppo pochi per dire con certezza che la situazione stia progressivamente peggiorando.

Ringraziamenti

I ringraziamenti vanno al Dott. G. Umbriaco, al Dott. A. Siviero e alla Dott.sa D. Fantinel e a tutto il personale INAF-OAPd che si occupa della gestione degli strumenti e raccolta dei dati dei SQM e delle stazioni meteorologiche.

Il Dott. Andrea Bertolo, ma in particolare il Prof. Sergio Ortolani che con molta pazienza e disponibilità mi ha seguita in questo lavoro di tesi.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori, a mio fratello e a Federico, che mi hanno sempre sostenuta in questo lungo percorso e nei momenti difficili con ironia e tanto affetto.

Bibliografia

- [1] ARPAV, L'inquinamento luminoso nella regione Veneto, Osservatorio permanente sul fenomeno dell'inquinamento luminoso, 2015
- [2] P. Cinzano, F. Falchi, C. D. Elvidge, Stato del cielo notturno e inquinamento luminoso in Italia, Rapporto ISTIL 2001
- [3] P. Cinzano, Inquinamento luminoso e protezione del cielo notturno, 1996
- [4] M. F. Walker, The effects of urban lighting on the brightness of the night sky, 1977
- [5] R. H. Garstang, Model for artificial night-sky illumination, 1985
- [6] M. Aubé, Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment, 2015
- [7] P. Cinzano, F. J. D. Castro, The artificial sky illuminance and the emission angles of the upward light flux, 1998
- [8] P. Cinzano, The propagation of light pollution in diffusely urbanised areas, 2000
- [9] P. Cinzano, Disentangling artificial sky brightness from single sources in diffusely urbanised areas, 2000
- [10] P. Cinzano, The growth of light pollution in north-eastern Italy from 1960 to 1995, 2000
- [11] R. H. Garstang, Mount Wilson Observatory: the sad story of light pollution, 2004
- [12] F. Falchi et al., The new world atlas of artificial night sky brightness, 2016
- [13] P. Cinzano, Night Sky Photometry with Sky Quality Meter, 2005
- [14] Tesi di LAurea F. Gerlin, Qualificazione meteorologica del sito astronomico di Asiago, 2009
- [15] Tesi di Laurea A. Vedovato, Misura dell'inquinamento luminoso del cielo notturno ad Asiago, 2013
- [16] D. L. Crawford, Light pollution, an environmental problem for astronomy and for mankind, 2000
- [17] F. Falchi, P. Cinzano, Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility, 2011

BIBLIOGRAFIA

- [18] A. Roman, Gli effetti dell'inquinamento luminoso sulla fauna e sulla flora
- [19] T. Longcore, C. Rich, Ecological light pollution, 2004
- [20] Associazione Cielo Buio, <http://www.cielobuio.org/>