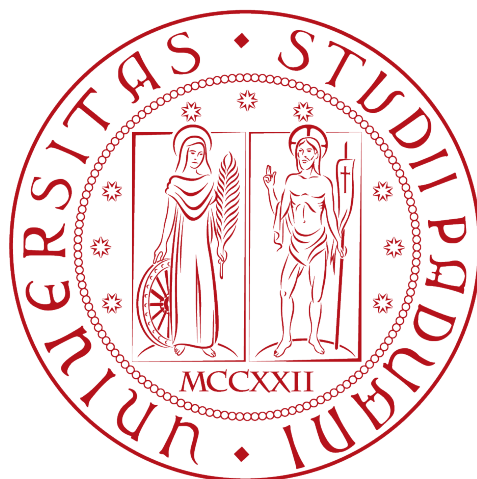


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Galileo Galilei



Corso di Laurea in Astronomia

Evoluzione della luminosità del cielo notturno all'Osservatorio di Asiago e siti limitrofi

Laureanda:

Beatrice Duchini

Matricola n.1051798

Relatore:

Prof. Sergio Ortolani

Correlatori:

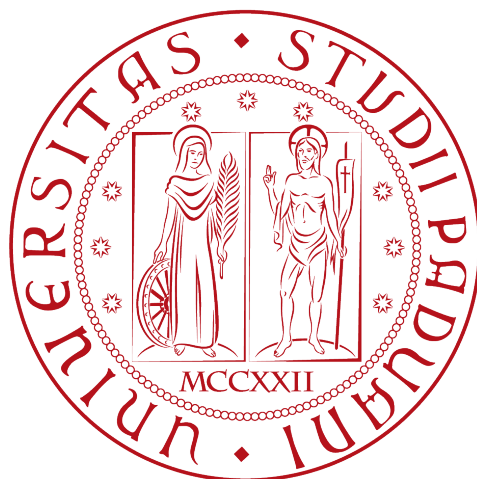
Dott. Andrea Bertolo (ARPAV)

Dott. Renata Binotto (ARPAV)

Anno Accademico 2017/2018

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Galileo Galilei



Corso di Laurea in Astronomia

Evoluzione della luminosità del cielo notturno all'Osservatorio di Asiago e siti limitrofi

Laureanda:

Beatrice Duchini

Matricola n.1051798

Relatore:

Prof. Sergio Ortolani

Correlatori:

Dott. Andrea Bertolo (ARPAV)

Dott. Renata Binotto (ARPAV)

Anno Accademico 2017/2018

"Se guardi il cielo e fissi una stella, se senti dei brividi lungo la pelle, non copritti, non cercare calore, non è freddo ma è solo amore."

Kahlil Gibran

Indice

Introduzione	1
1 Luminosità del cielo notturno	3
1.1 Luminosità naturale	3
1.2 Luminosità artificiale	4
1.3 Processi di diffusione della luce	8
1.4 Rapporto segnale-rumore in fotometria	10
2 Modelli di studio dell'inquinamento luminoso	11
2.1 Modello di Walker	11
2.2 Modello di Treanor	12
2.3 Modello di Garstang	12
2.4 Modello di Soardo	15
3 Mappe dello stato del cielo in Italia e in Veneto	19
3.1 Italia	19
3.2 Focus: Veneto	23
4 Strumentazione	25
4.1 Sky Quality Meter	25
4.2 Calibrazione	26
5 Analisi delle curve di brillantezza	29
5.1 Studio dell'andamento della luminosità	31
5.1.1 Descrizione dei grafici	32
5.1.2 Analisi delle pendenze medie	32
5.1.3 Analisi delle frequenze	37
5.1.4 Analisi delle curve medie stagionali	40
6 Confronto con la letteratura	45
Conclusioni	51
Ringraziamenti	53

Bibliografia	55
Appendice	57

Introduzione

Negli ultimi 20 anni l'inquinamento luminoso sta diventando sempre più importante.

La luminosità del cielo notturno è data da molteplici fattori naturali e artificiali. I livelli della luminosità naturale sono governati dalle sorgenti celesti, la Luna prima di tutto, le stelle, la Via Lattea, la luce zodiacale e la luce aurorale. In molte parti della Terra la componente della luce artificiale supera notevolmente quella naturale, tanto che più dell'80% della popolazione mondiale vive sotto cieli inquinati dall'inquinamento luminoso (Falchi, et al. 2016).

Questo fenomeno rende sempre più difficile l'osservazione, soprattutto di sorgenti deboli. Gli osservatori migliori sono quelli in siti molto bui e lontani da grandi agglomerati urbani. Però, nonostante ci si trovi in siti idonei, la luce artificiale viene comunque rilevata ovunque, creando un rumore di fondo sempre maggiore che va a ridurre l'accuratezza delle misure.

Contribuisce a questo problema un'errata costruzione dell'illuminazione pubblica e privata.

Le conseguenze dell'inquinamento luminoso attraversano più campi.

Si possono infatti verificare gravi squilibri psico fisici dati dalla distorsione del ritmo circadiano, sia per gli uomini che per gli animali. Anche gli insetti, soprattutto quelli notturni, sono influenzati dai cambiamenti sempre più drastici dell'alternanza giorno-notte, il che può portare una diminuzione dell'impollinazione notturna che oltretutto avrebbe una conseguenza anche sull'impollinazione degli insetti diurni. Come si può ben immaginare, tutto ciò, a lungo andare potrebbe avere gravi sviluppi sul processo riproduttivo delle piante (Knop, et al. 2017).

Lo spreco di denaro e risorse della Terra è un altro motivo di preoccupazione. Una buona percentuale (circa il 30%) del denaro, spesso pubblico, è destinato a quella parte dell'illuminazione pubblica che contribuisce all'inquinamento luminoso. Ma non solo il denaro è sprecato, c'è anche un'incessante ricerca con relativo consumo di materiali anche rari per realizzare impianti sempre più all'avanguardia o scenografici.

Le cause di questo tipo di inquinamento sono molteplici e spesso interconnesse.

Si è notato che la luminosità del cielo continua a diminuire durante tutta la

notte, a meno di fattori esterni. C'è chi sostiene che sia dovuto al progressivo spegnimento della luce che fuoriesce dalle finestre degli edifici residenziali (Bará et al.,2017), mentre c'è chi pensa che la causa possa essere la graduale diminuzione del traffico automobilistico (Ashdown, 2016). Con questo lavoro di tesi vogliamo andare a studiare l'andamento della luminosità del cielo notturno durante la notte, in Veneto, ponendo a confronto quattro siti posti a diverse altitudini e distanze dai centri urbani: Asiago, Padova, Passo Valles e Nove, attraverso i dati raccolti dagli Sky Quality Meter in questi siti.

Questa analisi permetterà di valutare la rilevanza di diverse fonti di inquinamento luminoso attraverso ipotesi sulle cause delle variazioni di luminosità durante la notte.

Capitolo 1

Luminosità del cielo notturno

1.1 Luminosità naturale

La luminosità naturale del cielo, nell'intervallo del visibile, è data dalla sovrapposizione di più contributi, una parte di origine terrestre e un'altra di origine extraterrestre.

La componente extraterrestre è dovuta ai seguenti fattori:

- **Luce zodiacale:** lieve luminescenza visibile lungo l'eclittica, in particolare modo nei dintorni solari, sotto cieli molto bui. La sua intensità decresce man mano che ci si allontana dal Sole. Essa è osservabile, nel nostro emisfero, dopo il tramonto o subito prima dell'alba se la Luna non è presente in cielo. Questa luce infatti è così debole che se il nostro satellite è anche parzialmente presente la luce zodiacale è completamente invisibile. La causa di questo contributo è dovuta alla luce del Sole che viene diffusa dalle polveri interplanetarie, composte da granelli di ghiaccio e polvere, portate da comete e asteroidi, che vanno ad accumularsi sul piano dell'eclittica. Su questo piano l'intensità ha due punti di massimo, uno sul Sole e un altro in direzione opposta a causa del forward e back scattering. La luce zodiacale corrisponde anche ad un'emissione di corpo nero a 160-220 K nell'infrarosso. I valori nel visibile variano da un massimo lungo l'eclittica di $120 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ ad un minimo, in direzione dei poli dell'eclittica, di $56 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$.
- **Luce stellare integrata:** è la componente dovuta alle stelle e alle sorgenti cosmiche, presenti nel piano galattico, che emettono nell'ottico. Nonostante il valore di fondo cosmico ad essa legato sia molto basso, va comunque considerato perché è capace, anche se di poco, di influire sulle misure. Questa luminosità è concentrata nell'area di cielo che interseca il piano galattico, quindi la brillantezza varia sensibilmente in base alla direzione di osservazione. Essa va da un massimo di $250 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ nelle zone più luminose della Via Lattea (costellazio-

ne del Sagittario) a circa $20 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ ai poli galattici (in direzione dell'Auriga).

- **Luce galattica diffusa:** è la luce prodotta dalle stelle diffusa dalle polveri galattiche. Essa è maggiore lungo la Via Lattea a causa del fatto che sia le stelle che le polveri interstellari raggiungono il massimo grado di concentrazione. Questa componente è piuttosto debole, tra i $6 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ e i $14 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$.
- **Fondo cosmico integrato:** fondo cosmico prodotto da tutte le sorgenti cosmiche che emettono nell'ottico. La sua luminosità però fornisce un valore molto basso, che per il nostro tipo di studio è assolutamente trascurabile.

Le componenti terrestri sono invece:

- **Airglow:** si tratta di un debole bagliore diffuso, dovuto a processi chimico-fisici tra particelle neutre o ionizzate come la ricombinazione tra ioni fotoionizzati, le fotoemissioni come conseguenza degli urti tra i componenti dell'atmosfera e i raggi cosmici e la chemiluminescenza associata alle reazioni dell'ossigeno e l'azoto con lo ione idrossido. Il valore dell'airglow diminuisce in modo esponenziale durante la notte fino ad un valore costante. Esso dipende direttamente dall'intensità della radiazione solare nell'estremo ultravioletto (EUV) che va ad eccitare gli ioni durante il giorno, quindi dipende ancor di più dalla fase in cui si trova il Sole nel suo ciclo di attività. Al minimo della sua attività l'airglow contribuisce con $35 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ allo zenit, quindi circa il 50% di quella zodiacale. Il fenomeno non è visibile durante il giorno a causa dell'intensa luce solare, ma durante la notte può essere osservato ad occhio nudo. Esso è generalmente di colore blu e può essere osservato a circa 10° sopra l'orizzonte perché più in basso si guarda maggiore è lo spessore atmosferico che si va ad attraversare con lo sguardo.
- **Luce delle aurore:** luce generata in alta atmosfera, tra gli 80 e i 200 km, dall'interazione, ricombinazione e diseccitazione, di particelle cariche (protoni ed elettroni) di origine solare (il cosiddetto vento solare) con la ionosfera terrestre. I prodotti si muovono lungo le linee di forza del campo magnetico terrestre. La luce aurorale ha una distribuzione variabile dal punto di vista geografico, sono localizzate in una zona piuttosto ristretta tra i 20° e i 25° dai poli geomagnetici. La sua intensità è fortemente influenzata dal ciclo di attività solare.

1.2 Luminosità artificiale

L'inquinamento luminoso è dato da tutta quella luce che non ha origine naturale. Secondo una definizione legislativa, infatti, è definito inquinamento



Figura 1.1 L'immagine a sinistra mostra il bagliore notturno dato dalla luce zodiacale, catturato qui sull'altipiano delle Ande. La foto destra invece mostra i due principali contributi naturali terrestri: l'airglow e l'aurora. (Web)

luminoso "ogni radiazione di luce diretta al di fuori delle aree a cui essa è funzionalmente dedicata, ed in particolare verso la volta celeste". Le cause di questo fenomeno sono molteplici e possono venire sia dall'esterno che dall'interno di edifici o attività commerciali.

Le principali fonti di luce artificiale sono:

- illuminazione stradale
- impianti di illuminazione sportiva
- illuminazione di opere e monumenti
- illuminazione esterna di edifici residenziali e commerciali
- illuminazione interna di edifici residenziali e commerciali
- fari dei veicoli

La luce che è indirizzata direttamente verso l'alto, o quella che riflessa a terra devia verso il cielo, va ad illuminare le particelle presenti in atmosfera e le stesse molecole che la compongono. In base ai livelli di aerosol, si produce velo luminoso tra noi e lo spazio più o meno invasivo che rende difficile l'osservazione dei corpi celesti. Dagli anni settanta ad oggi la luminosità artificiale in cielo è più che quadruplicata.

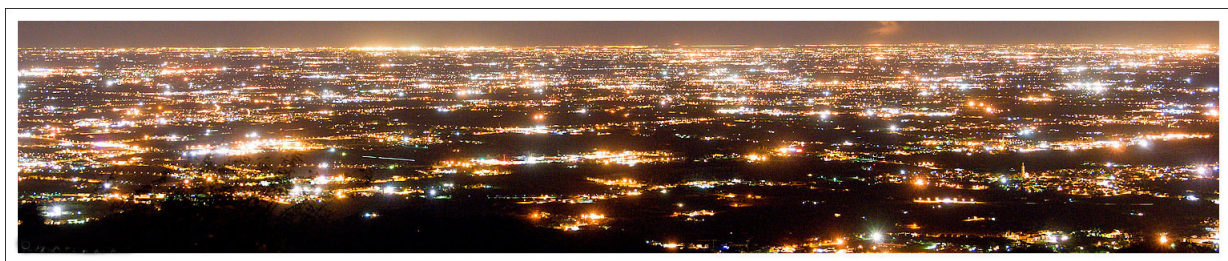


Figura 1.2 Questa foto mostra la grande quantità di luce artificiale della Pianura Padana (web)

Si è visto che lo scattering di secondo ordine ha una grande importanza sulla quantità di inquinamento luminoso presente nelle aree urbane. Per un basso livello di aerosol, per esempio, il contributo di questo scattering è generalmente più basso all'interno del perimetro di una città, ma aumenta rapidamente appena si esce a causa del mancato effetto degli ostacoli che bloccano la luce. Gli ostacoli come edifici o alberi sono di fondamentale importanza, infatti se questi fossero più bassi degli impianti di illuminazione (quindi minori di 7m circa) la radiazione emessa verso l'alto sarebbe circa il doppio di quella con ostacoli maggiori di 7m. Con un $AOD=0.1$ (Aerosol Optical Depth) la radiazione senza ostacoli aumenta rapidamente all'esterno della città e cresce ancora fino ad 80km dal centro dell'agglomerato urbano. Quando l' $AOD=1.0$, il rapporto senza/con ostacoli è massimo quando si esce dalla città, per poi diminuire con la distanza. Ciò significa che ostacoli come quelli citati sopra sono molto più efficienti nel ridurre la luminosità del cielo a grandi distanze, nell'ipotesi di un'atmosfera pulita (Aubé, 2015).

Ovviamente anche le montagne hanno un effetto di screening molto significativo, ma solo quando essa si trova vicino all'osservatore.

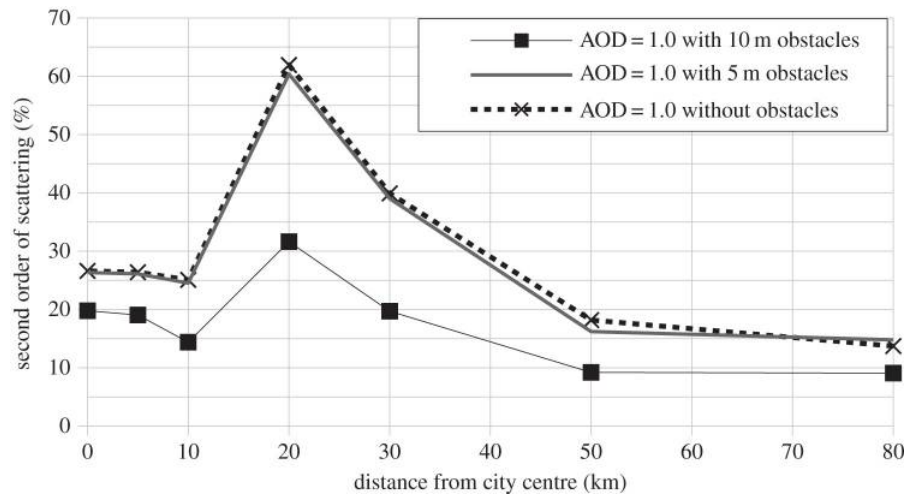


Figura 1.3 Contributo dello scattering di secondo ordine sulla radianza totale in funzione della distanza dal centro della città con AOD=1.0 (inquinata). (Aubé, 2015)

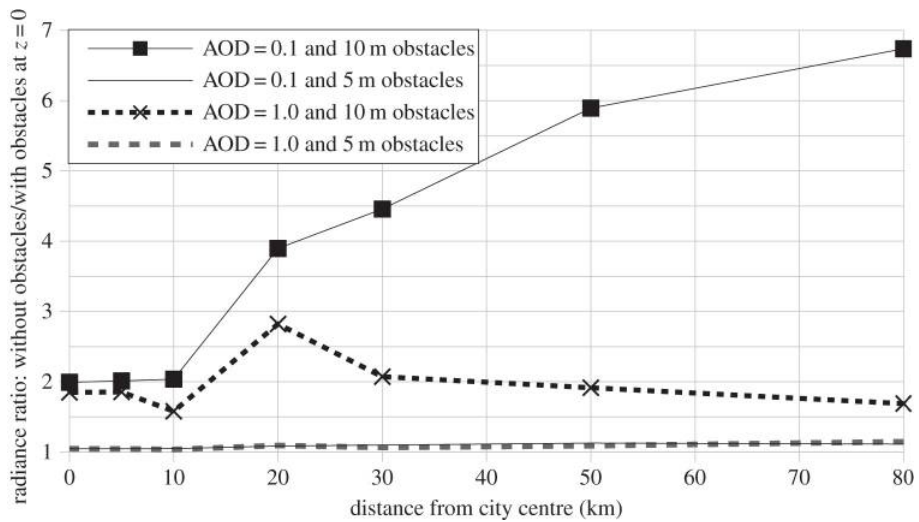


Figura 1.4 Rapporto tra radianza zenitale senza ostacoli e radianza con ostacoli in funzione della distanza dal centro della città (Aubé, 2015)

1.3 Processi di diffusione della luce

Composizione dell'atmosfera

Nella parte più bassa della nostra atmosfera (tra 0 e 60 km di altezza) è presente la quasi totalità di gas e aerosol. Solo la troposfera (0-10 km) contiene circa l'80% della massa totale dell'atmosfera ed è lo strato più importante per le osservazioni astronomiche perché è la causa della maggior parte dell'assorbimento ottico. Al di sopra della troposfera si estende la stratosfera, nella quale è presente uno strato di ozono. L'ozono è importante per la sua efficacia nell'assorbire i fotoni ultravioletti a lunghezze d'onda più brevi di circa 3500Å.

L'atmosfera terrestre è composta per la maggior parte da azoto e ossigeno, rispettivamente 78% e 21%, mentre gli altri costituenti (CO_2 e gas rari) sono in percentuali minime. In particolare la quantità di anidride carbonica è oggi stimata a circa 400 parti per milione (con un costante aumento dello 0.5% annuo dal valore di 280 parti per milione dell'epoca pre-industriale). Oltre a questi è presente una piccola frazione di gas (H_2O , CO , NO_2 , NO , O_3 , SO_2 , CH_4) la cui quantità è legata alle condizioni meteorologiche o a situazioni locali di inquinamento atmosferico e sono molto importanti dal punto di vista climatico perché, essendo costituiti da molecole complesse, assorbono la radiazione infrarossa emessa dal suolo. Tra questi il vapor acqueo e l'ozono hanno un impatto diretto nelle osservazioni astronomiche.

Gli aerosol sono quell'insieme di sostanze sospese in aria e sono composti da particelle liquide e solide disperse nell'atmosfera con un diametro che va da pochi nanometri a mezzo millimetro. Le concentrazioni diminuiscono con l'aumentare dell'altitudine e con l'aumentare della distanza da zone più densamente abitate. Queste particelle possono avere origine naturale (terra, sabbia, ceneri di incendi, polveri vulcaniche e meteoriche, pollini ecc.) o antropica (residui di lavorazioni industriali, smog ecc.).

Gli aerosol e le molecole dei gas hanno effetti sulla condensazione del vapor d'acqua e sulla propagazione e sull'assorbimento della luce in atmosfera (l'attenuazione del flusso luminoso a causa dello scattering e dell'assorbimento).

Scattering

La diffusione della luce, o scattering, è il fenomeno attribuito all'interazione tra materia e radiazione nel quale le traiettorie delle onde vengono deviate per l'interazione con altre onde o con altre particelle.

Le osservazioni astronomiche da terra sono influenzate dall'atmosfera terrestre a causa dell'assorbimento, diffusione o riflessione delle onde elettromagnetiche. A brevi lunghezze d'onda (tra 1000 e 3000Å) la nostra atmosfera è opaca e la radiazione che arriva al livello del mare è trascurabile. L'opacità deriva dall'elevato coefficiente di assorbimento delle molecole di O_2 e di N_2 tra 1000 e 2000Å, e quella dell'ozono tra circa 2000 e 3000Å.

L'assorbimento atmosferico nella banda ottica e nel vicino infrarosso è dovuto a due distinti processi: lo scattering di Rayleigh e lo scattering di Mie.

Scattering di Rayleigh

Lo scattering di Rayleigh è la diffusione di un'onda luminosa provocata da particelle di dimensione molto inferiore alla lunghezza d'onda del raggio incidente.

Questo fenomeno dipende dal numero di interazioni che ci sono tra le molecole lungo la linea di vista (n) e l'intensità è proporzionale all'inverso del quadrato della distanza tra diffusore e osservatore (R) e decresce con la quarta potenza della lunghezza d'onda secondo l'equazione:

$$\frac{I}{I_0} = c \cdot \frac{1 + \cos^2 \phi}{\lambda^4}$$

Dove ϕ è l'angolo tra la direzione del fascio incidente e quella di osservazione. I due termini al numeratore sono dovuti alle due componenti di polarizzazione con il vettore campo elettrico perpendicolare e parallelo al piano di scattering, rispettivamente. La costante vale:

$$c = \frac{N \cdot 8\pi^4}{R^2}$$

La radiazione diffusa è concentrata nella radiazione della direzione incidente, con circa la stessa intensità nei due versi, quindi massima lungo la linea di incidenza e minima a 90° .

Scattering di Mie

Lo scattering di Mie è dovuto a particelle di dimensione paragonabile o superiore a quella della lunghezza d'onda del raggio luminoso (aerosol). La dipendenza dalla lunghezza d'onda in questo caso è più complessa, come per la dipendenza dalla dimensione e dalla natura della particella. In prima approssimazione però lo scattering di Mie è quasi costante con la lunghezza d'onda, infatti $K_{Mie} = 0.006 \cdot \lambda^{-0.8}$ (λ in micron). I valori della costante e dell'esponente possono variare fino a circa un fattore 2 (Ortolani, 2016) con le condizioni ambientali, e quindi è molto sensibile alle variazioni meteorologiche. In ottico, con un'atmosfera senza nubi e con un basso contributo di aerosol, lo scattering di Rayleigh è dominante rispetto allo scattering di Mie, soprattutto a brevi lunghezze d'onda.

La maggiore conseguenza è che l'assorbimento ottico dipende in maggior parte dall'altezza del sito di osservazione per la minore concentrazione di aerosol con l'aumentare dell'altitudine.

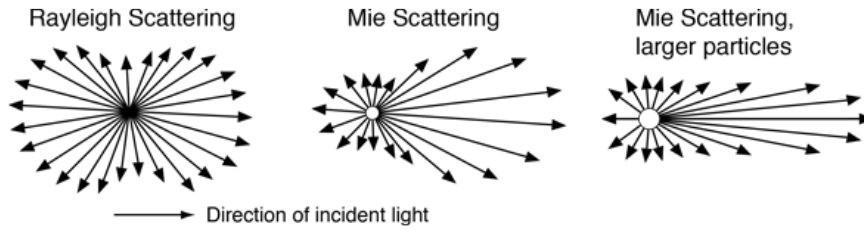


Figura 1.5 Ricostruzione grafica della deviazione della luce nello scattering di Rayleigh e di Mie (web)

1.4 Rapporto segnale-rumore in fotometria

Nell'ottico l'inquinamento luminoso è prodotto da quella luce che illumina direttamente un'area di cielo o un oggetto che riflette la sua luce verso il cielo. Quando si va ad osservare una stella, i suoi fotoni che arrivano a terra, assieme ai fotoni della luce artificiale diffusa, vanno a colpire il CCD creando un'immagine. All'aumentare della luce artificiale in cielo aumenta anche la ricezione dei fotoni in un CCD andando a falsare l'immagine e ovviamente la misura.

Si definisce *rumore* qualunque tipo di incertezza in un segnale. In ogni misura della quantità di luce raccolta da un rivelatore viene introdotto un qualche rumore. Quello fondamentale è il *rumore fotonico* col quale si intendono le fluttuazioni casuali del numero di fotoni che arrivano al recettore in intervalli consecutivi di tempo. La statistica degli elettroni generati nel rivelatore segue la distribuzione di Poisson. Il rumore varia quindi con la radice quadrata del segnale, dato che la varianza ($\sigma^2 = (x - \mu)^2$) è uguale al valor medio dei conteggi (μ), da cui $\sigma = \sqrt{\mu}$. Il rapporto tra il numero di conteggi del segnale e il numero di conteggi del rumore è chiamato *shot noise* (S/N) ed è:

$$S/N = \frac{n_{segnale}}{\sqrt{n_{totale}}}$$

Un segnale accettabile ha un rapporto $S/N \geq 3$, in generale maggiore è il rapporto migliore è il segnale.

Per misurare il contributo di fondo cielo è necessario usare un'area del CCD non compromessa dal contributo di altre sorgenti. È evidente che minore è il numero di pixel su cui si eseguono le misure minore è il contributo del rumore dovuto al fondo cielo.

Se a dominare è il contributo di fondo cielo si dice che si è "*sky limited*".

Nel caso di oggetti estesi, tipo le galassie, il rapporto tra la loro brillantezza e quella del cielo è costante e di conseguenza sarà costante anche il rapporto S/N. Se la luminosità del cielo cresce, le zone più deboli dell'oggetto non possono più essere osservate.

Capitolo 2

Modelli di studio dell'inquinamento luminoso

Studiare l'inquinamento luminoso significa tracciare la distribuzione spaziale e la variazione nel tempo della componente artificiale della luminosità del cielo notturno. Per farlo sono stati creati dei modelli teorici capaci di prevedere come la radiazione originata dai centri abitati si propaghi, anche a grandi distanze.

Saranno ora descritti brevemente i principali modelli per lo studio dell'inquinamento luminoso.

2.1 Modello di Walker

Walker (1977) creò un modello a partire dal fatto che la luminosità del cielo notturno (I) causata dall'inquinamento cittadino è proporzionale al numero dei lumen (L) emessi dalla città. La luce totale emessa da un agglomerato urbano è approssimativamente proporzionale alla popolazione (P) stessa. Per deduzione si ha che, se $I \propto L$ e $L \propto P$, allora $I \propto P$. Walker mostrò anche che la luminosità totale del cielo è anche dipendente dalla distanza dal centro della città ($I \propto D^{-2.5}$). La formula generale di questo modello è data dalla combinazione delle singole relazioni:

$$I = CPD^{-2.5}$$

dove C è una costante che non dipende né da P né da D e che descrive l'emissione pro-capite della popolazione e la riflettività del suolo. La relazione è stata trovata misurando la differenza di brillantezza del cielo a 45° dallo zenit in direzione di una città e in direzione opposta (in particolare sulla città statunitense Salinas che conta 68000 abitanti).

2.2 Modello di Treanor

Treanor (1973) ha derivato una formula per lo scattering degli aerosol. Ha considerato un semplice modello che consiste in una atmosfera omogenea e in città trattate come fonti puntiformi. Egli assume che la luce che aggiunge un elemento di volume dell'atmosfera più o meno allo zenit è composto da due parti. La prima è un fascio di luce proveniente direttamente dalla città, mentre la seconda è un fascio di luce scatterata dagli aerosol che si trovano tra la città e l'elemento di volume. Entrambi i contributi sono soggetti ad una relazione del tipo $I \propto D^{-2}$. Quando le formule per i contributi del singolo (Rayleigh) e doppio (Rayleigh e aerosol) scattering vengono combinate in una singola formula, il risultato è la formula che regola il modello di Treanor:

$$I = fP(UD^{-2} + VD^{-1}) \exp(-kD)$$

dove I è la brillantezza del cielo notturno allo zenit ad una distanza D da una città di popolazione P , k è un coefficiente di estinzione, U e V sono costanti e f è una costante che si introduce per tenere in considerazione la luce pro-capite emessa dalla popolazione, che dipende dal grado di sviluppo economico della città. Il termine UV^{-2} tiene conto dello scattering di Rayleigh e il termine VD^{-1} del doppio scattering.

2.3 Modello di Garstang

Il modello di Garstang è costruito su considerazioni geometriche e fisiche più dettagliate. Non considera più un'atmosfera omogenea, ma una in cui la densità diminuisce esponenzialmente con l'altezza, con una composizione che segue leggi di scala diverse per molecole e aerosol.

Considera la città come un'area circolare di luminosità uniforme con centro C e raggio R che sta sul piano orizzontale. L'osservatore è posizionato in O , ad un'altezza A rispetto al piano della città e alla distanza D dal centro della città, misurata sul piano della città.

Un disco uniforme darà risultati migliori rispetto ad una sorgente puntiforme, per un osservatore vicino alla città.

Inizialmente si assume che la luce artificiale produce un numero L di lumen pro-capite e quindi la luce totale emessa sarà LP . Sia F la frazione di luce, prodotta dalla città, irradiata direttamente verso il cielo con angoli sopra l'orizzontale, e la rimanente frazione $(1 - F)$ sia irradiata verso il terreno. La frazione F è irradiata con un'intensità proporzionale a ψ^4 , dove ψ è la distanza zenitale di un raggio di luce verso l'alto. L'intensità della radiazione verso lo zenit ($\psi = 0$) è praticamente zero, mentre quando ψ si avvicina a 90° l'intensità aumenta rapidamente. Poniamo che, della frazione di luce $1 - F$ che raggiunge il terreno dalle luce artificiali, una frazione G sia scatterata verso l'alto con una distribuzione Lambertiana, e la rimanente frazione $1 - G$

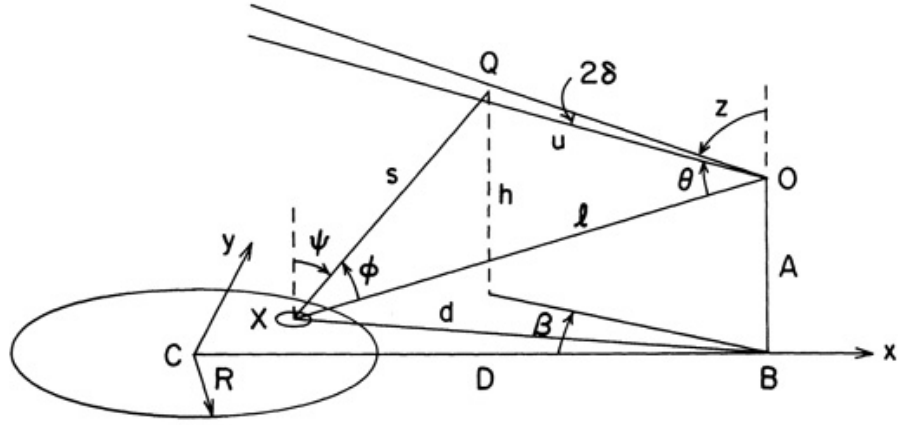


Figura 2.1 Impostazione geometrica modello di Garstang (Garstang, 1986)

sia assorbita. Allora:

$$I_{up} = \frac{LP}{2\pi} \{2G(1 - F) \cos \psi + 0.554F\psi^4\}$$

Per aumentare l'accuratezza dei calcoli senza dover necessariamente usare il calcolo completo del trasporto radiativo, Garstang ridefinì la formula di Treanor.

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

dove P è la popolazione di una città che si trovi alla distanza D dell'osservatore, f rappresenta la luce emessa pro-capite dalla popolazione e U una costante. Mentre:

$$(DS) = 1 + \frac{N_a \sigma_a \{1 - \exp(-as \cos \psi)\}}{a \cos \psi} + \frac{\gamma N_m \sigma_R \exp(-cH) \{1 - \exp(-cs \cos \psi)\}}{c \cos \psi}$$

con

$$N_a \sigma_a = 11.11KN_m \sigma_R \exp(-cH)$$

dove N_a , N_m , σ_a , σ_R sono rispettivamente la densità di aerosol e di molecole in atmosfera (N) e la sezione d'urto di una singola particella o molecola; K è un indice di nitidezza dell'atmosfera. L'ultimo termine della formula di (DS) è stato aggiunto per dare un po' di tolleranza per il doppio scattering molecolare.

(EF) è il coefficiente di estinzione atmosferica calcolato integrando l'estinzione della luce lungo il cammino percorso utilizzando un modello governato da altezza di scala:

$$(EF) = \exp[-N_m \sigma_R \exp(-cH) p \sec z]$$

dove z è la distanza zenitale del raggio di luce proveniente dalla città. Secondo il modello di Garstang la brillantezza zenitale del cielo notturno decresce non linearmente con la distanza e l'esponente della distanza D diventa più negativo (la luminosità diminuisce più velocemente) all'aumentare della distanza, e per città molto popolate può arrivare ad un valore di circa -4 (Tesi Vedovato, 2013). L'esponente si abbassa anche al crescere dell'aerosol rispetto alle molecole, cioè al diminuire della nitidezza dell'aria. L'effetto della foschia o di un qualunque aumento di quantità di aerosol consiste nell'aumento della brillantezza del cielo allo zenit, nelle vicinanze delle sorgenti di inquinamento luminoso, per effetto dell'aumento della diffusione. Tuttavia però, la brillantezza decresce in luoghi situati sufficientemente lontano dalle sorgenti per effetto dell'aumento dell'estinzione.

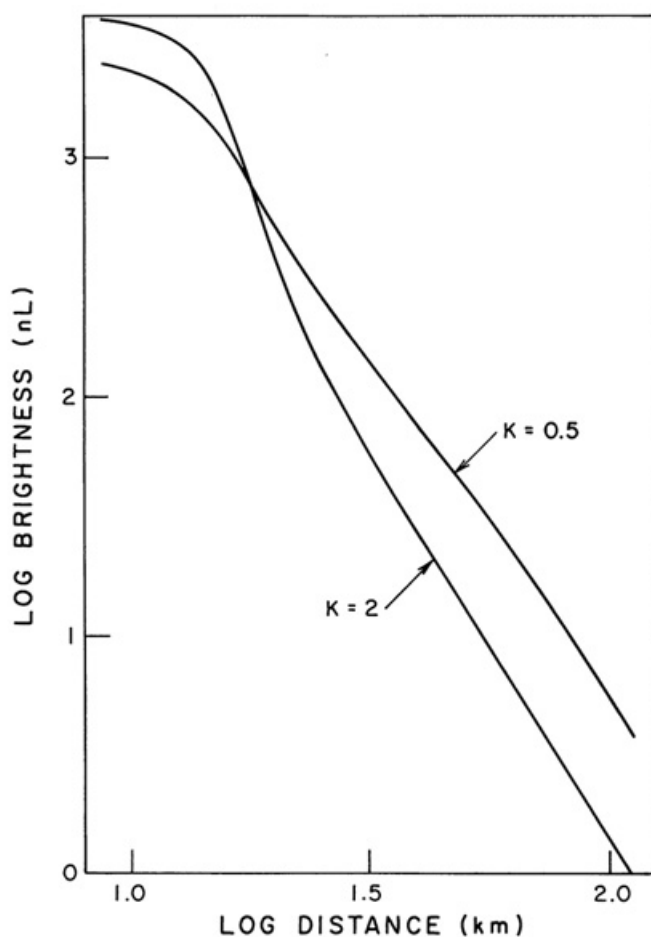


Figura 2.2 Relazione brillantezza-densità. La brillantezza del cielo (in nanolambert) allo zenit è riferita alla città di Denver, calcolata per $L=1500$ lumen pro-capite, senza considerare il fondo cielo naturale. (Garstang, 1986)

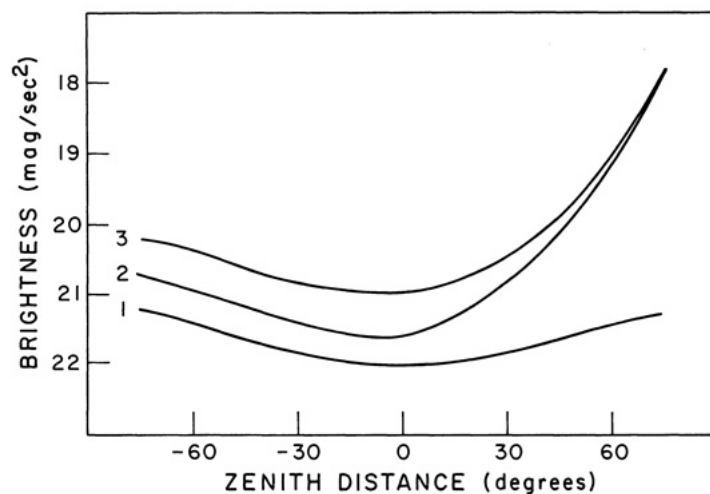


Figura 2.3 Relazione distanza zenitale-brillanza. Angoli negativi corrispondono ad una direzione della linea di vista opposta rispetto al centro della città. (Garstang, 1986)

2.4 Modello di Soardo

Uno studio che ha condotto Soardo sulla città di Torino ha messo in discussione la compatibilità tra il modello di Garstang con la realtà degli impianti di illuminazione per quanto riguarda sia l'intensità che il flusso luminoso. L'emissione per piccole inclinazioni rispetto al piano orizzontale non sembrano essere rappresentate correttamente dal modello di Garstang, che prevede valori troppo elevati sia dell'intensità luminosa sul piano orizzontale sia del rapporto medio di emissione superiore.

Una città illuminata emette una radiazione luminosa dovuta sia all'emissione diretta da parte degli impianti di illuminazione che alla riflessione di superfici illuminate. Soardo propone un nuovo modello, detto "Cavità", apportando una modifica alla formula di Garstang introducendo un termine lambertiano da

$$I(\varphi) = \frac{1}{2\pi} [2a_1 \cos(\varphi) + 0.554a_2\varphi^4]$$

a

$$I(\varphi) = \frac{1}{2\pi} [2a_1 \cos(\varphi) + 2a_1(1 - \cos(\varphi)) + 0.554a_2\varphi^4]$$

in cui il primo addendo nella parentesi quadra rappresenta le emissioni diffuse, mentre il secondo e il terzo addendo simulano congiuntamente l'emissione diretta verso l'alto degli impianti di illuminazione.

Secondo questo modello il maggior contributo all'inquinamento luminoso deriva dall'illuminazione stradale (circa il 70%) e dal flusso emesso e riflesso

dalle città in un angolo compreso tra 0° e 20° dall'orizzontale. Nelle città però la maggior parte dell'illuminazione stradale è schermata dagli edifici, e a causa delle molte diffusioni successive l'emissione luminosa verso l'alto ha una diffusione lambertiana. Contrariamente a quanto si pensa infatti, nelle città, l'emissione di luce direttamente verso l'alto non produce sostanziali cambiamenti nella luminosità del cielo in quanto è bloccata dagli edifici. Attraverso misure sul campo, oltretutto, si è visto che la brillantezza artificiale del cielo al di sopra di una città dipende solo dal flusso luminoso installato, mentre l'emissione diretta verso l'alto è minoritaria. Le superfici illuminate contribuiscono in maniera variabile alla luminosità che raggiunge il cielo, ciò dipende anche dalle proprietà dei diversi materiali che vengono investiti dalla luce e dalla loro capacità di riflettere.

Come si è potuto notare della figure 1.3 e 1.4 (provenienti da un articolo di M. Aubé (2015) sulla propagazione dell'inquinamento in presenza di ostacoli, introdotta nel paragrafo 1.2) in città con ostacoli molto alti, o nelle vicinanze di montagne, la diffusione della luce è influenzata. Se si osserva a bassi angoli, coperti per esempio da montagne oltre le quali è presente un centro abitato, si noterà un bagliore diffuso. Se invece ci si alza di quota tanto da oltrepassare l'ostacolo potrebbero diventare visibili le singole sorgenti artificiali.

Su questo modello c'è però ancora dibattito, soprattutto da parte di Cinzano, il quale spiega che gli impianti luminosi vengono schermati dagli edifici cittadini solo in limitatissimi casi (comunicazione privata) poiché:

1. Longitudinalmente le strade non sono schermate;
2. Per poter schermare gli apparecchi è necessario che si combinino strade strette vicino ad edifici molto alti (per esempio, strade con una larghezza minore di 10 metri ed edifici più alti di 4-5 piani). Questo può avvenire solo nei centri città, mentre la maggior parte degli impianti è situata in periferia o in piccoli paesi;
3. Le misure da satellite confermano che le città hanno un'intensità maggiore a bassi angoli;
4. Misure da terra della parte predominante della luminanza artificiale del cielo (LAC) rispettano le previsioni di Garstang e Cinzano che suppongono funzioni di emissione non lambertiane;
5. Osservazioni visuali da aerei e fotografie riprese da posizione sopraelevate mostrano per lo più emissioni provenienti dai singoli apparecchi. La schermatura degli apparecchi si nota solo nei centri delle maggiori città e a bassi angoli sopra l'orizzonte ($0 - 2^\circ$).

Cinzano conclude sostenendo che le emissioni che contribuiscono maggiormente ad aumentare la luminosità del cielo notturno sono quelle che proven-

gono direttamente dagli apparecchi, cioè quelle emesse a bassi angoli sopra l'orizzonte.

Capitolo 3

Mappe dello stato del cielo in Italia e in Veneto

3.1 Italia

L'analisi e le immagini che seguiranno in questo capitolo sono state create utilizzando i dati ottenuti da satellite alla fine degli anni '90 (Cinzano, "Report ISTIL 2001"). I dati utilizzati non sono recenti e quindi non si può essere certi del tasso attuale di variabilità annua dell'inquinamento luminoso fornito dall'autore, pari ad un 10%.

Le seguenti mappe sono state calcolate per un'atmosfera limpida nella banda fotometrica V e per una brillantezza allo zenit.

Brillantezza artificiale al livello del mare

Una mappa che traccia la brillantezza artificiale del cielo notturno al livello del mare può risultare utile per identificare le porzioni di territorio più inquinate e le maggiori sorgenti, confrontando i livelli di inquinamento luminoso in atmosfera, sia prodotti dalle varie sorgenti che analizzando le varie aree. In questa mappa l'altitudine non è presa in considerazione, ma il suo effetto è abbastanza piccolo. Ad esempio, salendo ad una quota di 1350m la brillantezza del cielo in corrispondenza del Monte Ekar, ai bordi della pianura veneta, diminuirebbe solo di circa il 20%. Questa mappa è però usata più che altro per monitorare l'inquinamento luminoso, in genere molto maggiore nelle città e nei luoghi limitrofi, che nella maggior parte dei casi si trovano sul livello del mare. Le aree di colore arancio indicano approssimativamente le zone in cui è molto difficile vedere la Via Lattea ad occhio nudo in notti limpide. Il limite dell'invisibilità sta all'incirca tra l'arancio e il rosso (dove la brillantezza artificiale è quasi sei volte la brillantezza naturale di riferimento).

I livelli di brillantezza artificiale sono espressi come frazione della brillantezza naturale di riferimento.

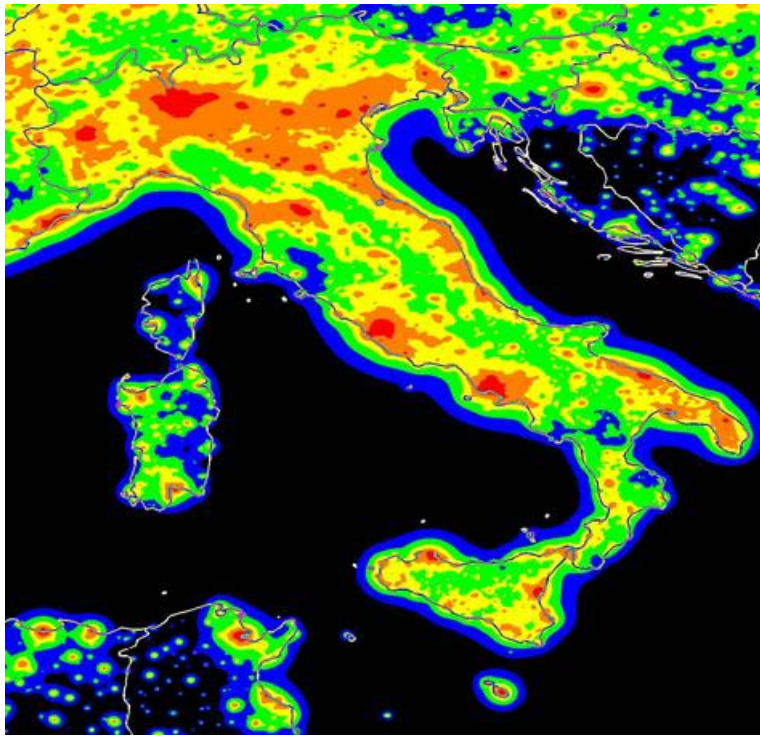


Figura 3.1 Brillanza artificiale livello del mare (www.lightpollution.it)

< 11%	nero
11 – 33%	blu
33 – 100%	verde
100 – 300%	giallo
300 – 900%	arancio
> 900%	rosso

Brillanza totale del cielo notturno

Questa mappa, al contrario della precedente, è stata creata tenendo conto dell'altitudine e della brillanza naturale del cielo (anch'essa in funzione dell'altitudine). La brillanza naturale dipende dalla direzione di osservazione e dall'altitudine ed è stata ottenuta con i modelli di Garstang (1989), che tengono conto della luce naturale proveniente da tutto il cielo che viene diffusa dalle particelle e dalle molecole lungo la linea di vista dell'osservatore.

Questa mappa è per noi di particolare interesse perché è confrontabile con i dati che è possibile ricavare dell'SQM, utilizzato per questa tesi e che verrà descritto nel seguente capitolo.

I livelli colorati nella mappa corrispondono ad una brillanza totale in magnitudini V per secondo d'arco quadrato di:

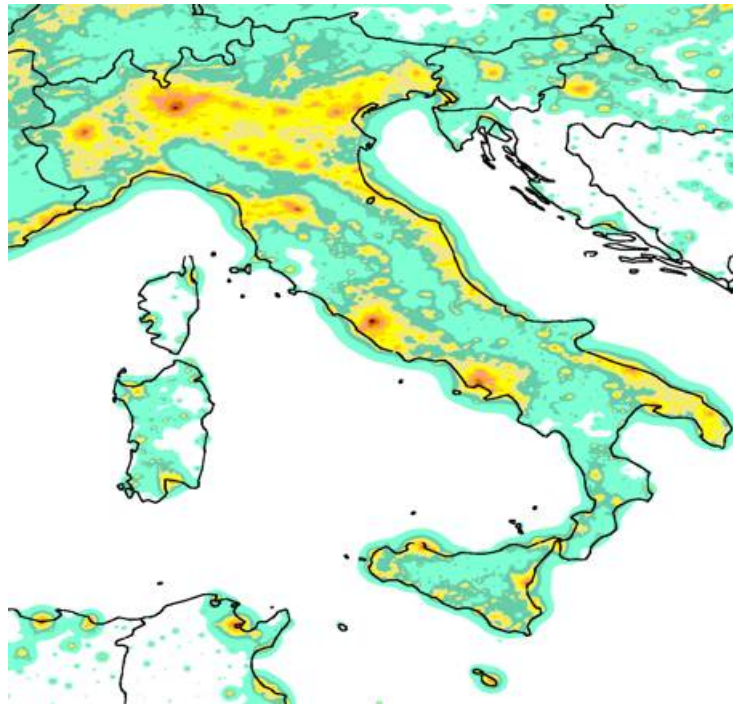


Figura 3.2 Brillanza totale del cielo notturno (www.lightpollution.it)

> 21.5	bianco
21 – 21.5	verde
20.5 – 21	verde scuro
20 – 20.5	kaki
19.5 – 20	giallo
19 – 19.5	giallo scuro
18.5 – 19	rosa
18 – 18.5	arancio
17.5 – 18	marrone
< 17.5	rosso scuro

Come esempio verrà qui di seguito presentata una tabella che associa alla brillantezza del cielo in magnitudini per secondo d'arco un giudizio qualitativo sulla sua luminosità allo zenit.

< 19.5 <i>mag/arcsec</i> ²	cielo fortemente luminoso
20 <i>mag/arcsec</i> ²	cielo molto luminoso
20.5 <i>mag/arcsec</i> ²	cielo luminoso
21 <i>mag/arcsec</i> ²	cielo poco luminoso
21.5 <i>mag/arcsec</i> ²	cielo mediamente buio
> 21.5 <i>mag/arcsec</i> ²	cielo estremamente buio

Visibilità delle stelle ad occhio nudo

La mappa della visibilità delle stelle ad occhio nudo, ossia della magnitudine limite ad occhio nudo, indica la possibilità della popolazione di vedere le stelle di una certa magnitudine. Questa mappa tiene conto dell'altitudine e dell'estinzione della luce delle stelle e della capacità dell'occhio medio di distinguere sorgenti puntiformi su uno sfondo luminoso. Ciò vuol dire che non dà alcuna indicazione sulla luminosità del cielo notturno o sull'inquinamento luminoso perché l'altitudine e l'estinzione della luce confondono i risultati. Ad esempio, le montagne vicino al Nord dell'immagine potrebbero sembrare non inquinate dal momento che la magnitudine limite è la stessa che ci vede nelle zone non inquinate del mare nell'angolo in basso a destra. Tuttavia l'estinzione della luce stellare è minore per un sito in quota rispetto ad un sito al livello del mare, perché la luce incontra meno particelle e molecole diffondenti nel loro tragitto. La magnitudine limite, quindi, aumenta con l'altitudine. In conclusione, il fatto che le montagne abbiano la stessa magnitudine limite delle aree di mare non inquinate indica che le montagne sono inquinate e la visibilità delle stelle in quelle zone è paragonabile a quella che si ha al livello del mare in zone non inquinate.

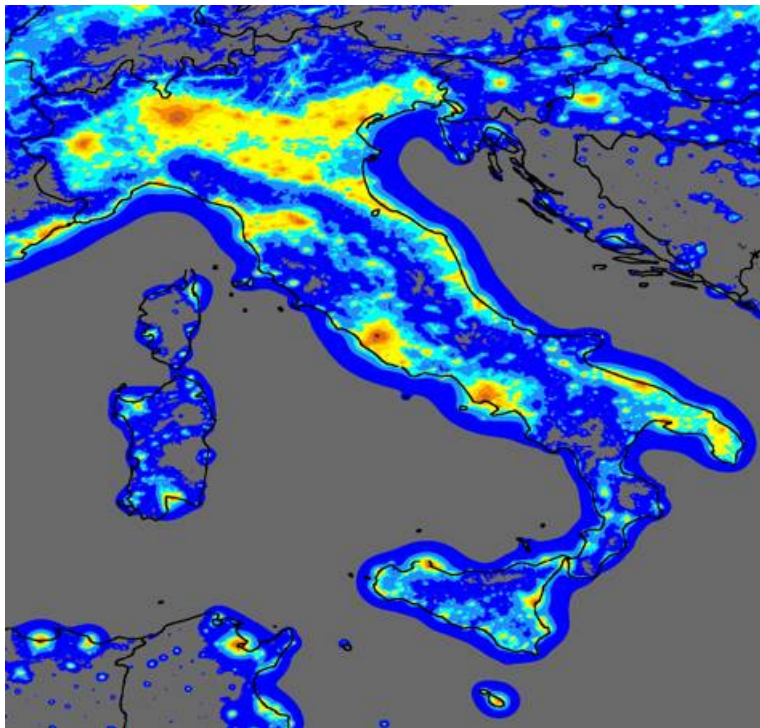


Figura 3.3 Visibilità stelle ad occhio nudo (www.lightpollution.it)

I livelli corrispondono alla magnitudine in banda V:

> 6.0	nero	cielo eccezionalmente stellato
5.75 – 6.0	grigio	cielo ampiamente stellato
5.5 – 5.75	blu	
5.25 – 5.5	blu chiaro	cielo molto stellato
5.0 – 5.25	azzurro	
4.75 – 5.0	giallo	cielo moderatamente stellato
4.5 – 4.75	giallo-oro	
4.25 – 4.5	arancio	cielo poco stellato
4.0 – 4.25	arancio scuro	
3.75 – 4.0	rosso	cielo appena stellato
< 3.75	violetto	

3.2 Focus: Veneto

Il Veneto, come tutta la Pianura Padana, è uno dei territori più inquinati d'Italia. Ha infatti livelli di brillantezza artificiale superiori al 33% di quella naturale. Confrontando i dati del 1971 e del 1998 si vede che la situazione è molto peggiorata e con un modello previsionale nel 2025 non è previsto un miglioramento del trend. Dal 2009, però, in Veneto è in vigore una normativa sul tema dell'inquinamento luminoso, la L.R. 17/2009, che se applicata correttamente sul tutto il territorio regionale, può avere effetti positivi.

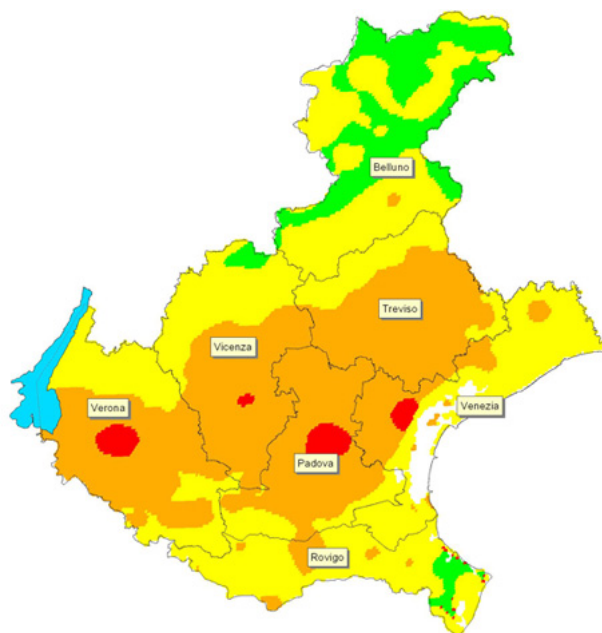


Figura 3.4 Rapporto luminosità artificiale del cielo e naturale media (www.arpa.veneto.it)

Nella mappa della brillantezza viene rappresentato il rapporto tra la luminosità artificiale del cielo e quella naturale media allo zenit.

33 – 100%	verde
100 – 300%	giallo
300 – 900%	arancio
> 900%	rosso

Nel 2013-2016 è stato avviato un censimento nell'applicazione della legge. Dei principali centri urbani veneti interpellati, i Comuni che hanno fornito una risposta affermativa alle nuove norme sono 17, corrispondenti al 68%. Si è però registrata una diminuzione della percentuale, passando dall'85% (23 Comuni su 27) che hanno risposto positivamente nel 2008, al 68% (17 su 25).

Capitolo 4

Strumentazione

4.1 Sky Quality Meter

I dati a disposizione in questo lavoro di tesi derivano dalle misurazioni effettuate con lo Sky Quality Meter (SQM), uno strumento in grado di misurare la luminosità del cielo notturno. In Veneto, a regime saranno a disposizione una dozzina di centraline di monitoraggio. Per ora sono collezionati in un unico database i dati relativi a 5 centraline, da noi analizzate, situate a Cima Ekar e Pennar (UNIPD), Padova e Passo Valles (BL)(ARPAV) e Nove (Venetostellato).



L'SQM è composto da un fotodiodo al silicio (TAOS TSL237S) in grado di registrare la brillantezza media in un'area di cielo definita. Lo strumento è facilmente utilizzabile, una volta puntato verso la zona di cielo che si desidera monitorare, all'accensione del dispositivo segue la registrazione dei valori di brillantezza mostrati nel display. Il valore della brillantezza del cielo è espresso in $mag/arcsec^2$ e la precisione fornita dall'apparecchio è di circa $\pm 0.10 mag/arcsec^2$ (Tesi Vedovato 2013). La risposta del fotodiodo alla luce è limitata all'intervallo di lunghezza d'onda compreso tra i 320 e i 1050nm, con un picco a 680nm. Al fotodiodo si aggiunge poi un filtro di tipo HOYA CM500 in grado di restringere l'intervallo di sensibilità tra 320 e 720nm in modo da poter equiparare meglio la risposta dello strumento alla visione notturna dell'uomo. Grazie ad un sensore interno, l'SQM è in grado di ap-

portare automaticamente le correzioni dovute alla lieve, ma non trascurabile, dipendenza dalla temperatura. Il range di affidabilità delle temperature è fornito dalla casa costruttrice (Unihedron) ed è compreso tra i -25 e i 70 gradi Celsius (Kyba, Ruhtz, Fischer, Holker, 2011). L'SQM semplice (quello che utilizziamo noi) viene orientato verso lo zent ed è in grado di registrare la luce entro un campo visuale di 80°, che corrisponde ad una HWHM (Half Width at Half Maximum, metà larghezza a metà altezza) di circa 42°. 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 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).

4.2 Calibrazione

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

Test condotti in laboratorio (Cinzano, 2005) mostrano che la curva di risposta dell'SQM non corrisponde a nessuna delle curve di sistemi fotometrici standard. Perciò è necessario 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 sistemi fotometrici classici è riportata nel seguente grafico:

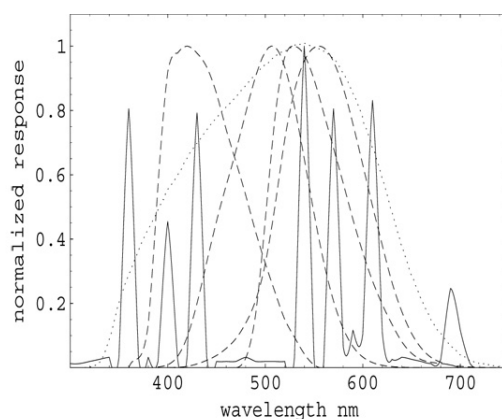


Figura 4.1 Risposta spettrale normalizzata dell'SQM (linea punteggiata), risposta banda passante per B-Johnson, CIE scotopica, V-Johnson e CIE fotopica (linee tratteggiate, rispettivamente da sinistra a destra), spettro di emissione di una lampada ad alta pressione di Sodio (linea continua)

I coefficienti di conversione rispetto alla banda fotometrica V-Jonson per sorgenti tipiche in ambito di luce artificiale, espressi in $mag/arcsec^2$ sono:

- +0.59 Lampada a vapori di Mercurio
- +0.48 Lampada al Sodio ad alta pressione
- +0.54 Cielo naturale
- +0.56 Cielo inquinato

Per ridurre al minimo questi coefficienti, sono stati identificati dei filtri opportuni, applicabili all'SQM, ma non sono attualmente installati sugli strumenti. In generale, per riportarsi al sistema fotometrico UBV-Johnson, per osservazioni allo zenit, con uno strumento standard (senza filtri aggiunti) sarà necessario apportare alle misure una correzione pari a $0-0.3 mag/arcsec^2$ (Cinzano, 2005).

Capitolo 5

Analisi delle curve di brillanza

Gli SQM utilizzati per questa tesi hanno registrato dati ad intervalli regolari, ogni 5 minuti, durante la notte. La ricerca è stata limitata ad un periodo di due anni, 2016 e 2017, nelle stazioni di Cima Ekar, Pennar e Nove, mentre del solo 2016 per Passo Valles e del 2017 per Padova.

Nella seguente tabella sono riportati i mesi a disposizione per ogni stazione.

.	Cima Ekar	Pennar	Padova	Nove	Passo Valles
Gennaio	X	X			X
Febbraio	X	X	X		X
Marzo	X	X	X		X
Aprile			X	X	X
Maggio				X	X
Giugno				X	X
Luglio				X	X
Agosto	X	X	X	X	X
Settembre	X	X	X	X	
Ottobre	X	X	X	X	
Novembre	X	X	X	X	
Dicembre	X	X	X	X	

Parte dei dati utilizzati sono stati ridotti manualmente, mentre un'altra parte è stata ridotta dalla dottoressa Binotto (ARPAV), grazie ad un programma da lei scritto. Sono state selezionate le notti vicino alla Luna Nuova, per evitare il contributo della luce lunare, tra cui quelle serene (con variazioni di magnitudine $\Delta mag < 0,3 mag/arcsec^2$). Le notti a disposizione sono "notti fotometriche", in cui la brillanza del cielo mostra variazioni inferiori a $\Delta m = 0,05 mag/arcsec^2$ tra un punto e il successivo per un minimo di 6 ore consecutive.

Ci si aspetta che la luminosità del cielo sia una funzione abbastanza stabile o con un moderato e graduale cambiamento di pendenza durante la notte, quindi una variazione repentina dei valori può essere causata solo da fattori

meteorologici. Quando, per esempio, ci sono picchi più alti dell'andamento medio con un $\Delta mag > 0,3 \text{ mag/arcsec}^2$ indicano una diminuzione di brillantezza che può essere dovuta a nubi a grandi altitudini. Picchi più bassi, invece, indicano un aumento della brillantezza che può essere causata da una copertura a bassa quota, che è in grado di riflettere e amplificare la luce che arriva da terra. È stato notato che basta il passaggio di un aereo o di un'auto con i fari accesi perché l'SQM registri una variazione, anche minima, di brillantezza (Ortolani, comunicazione privata).

Di seguito vengono riportate alcune curve di brillantezza per dare un'idea di cosa si ottiene da un SQM.

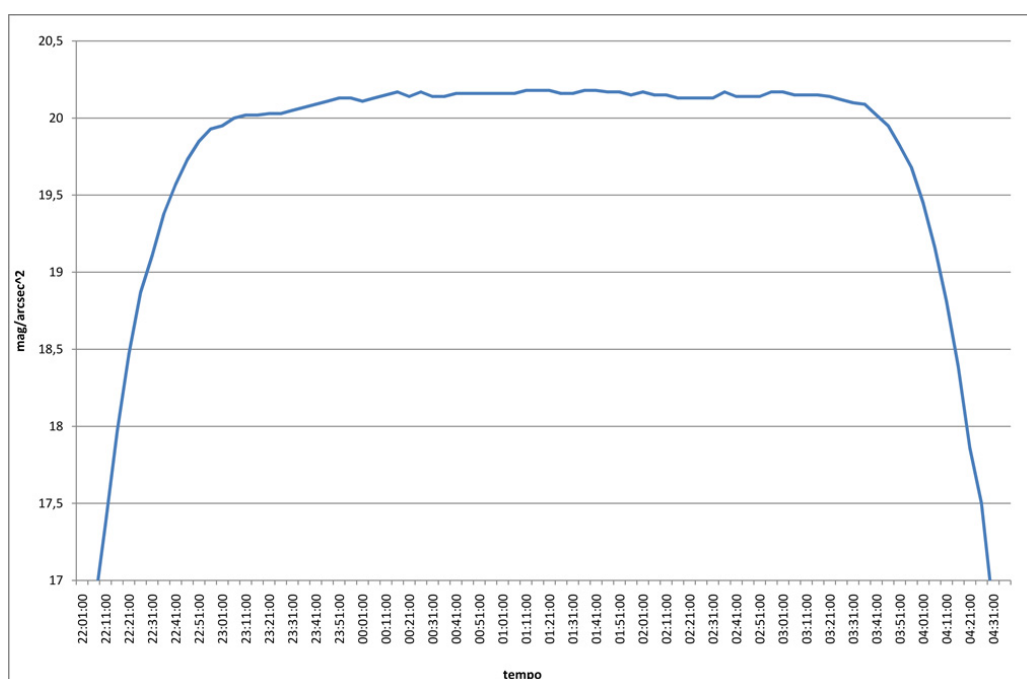


Figura 5.1 Grafico di una curva senza nuvolosità con andamento crescente (Nove)

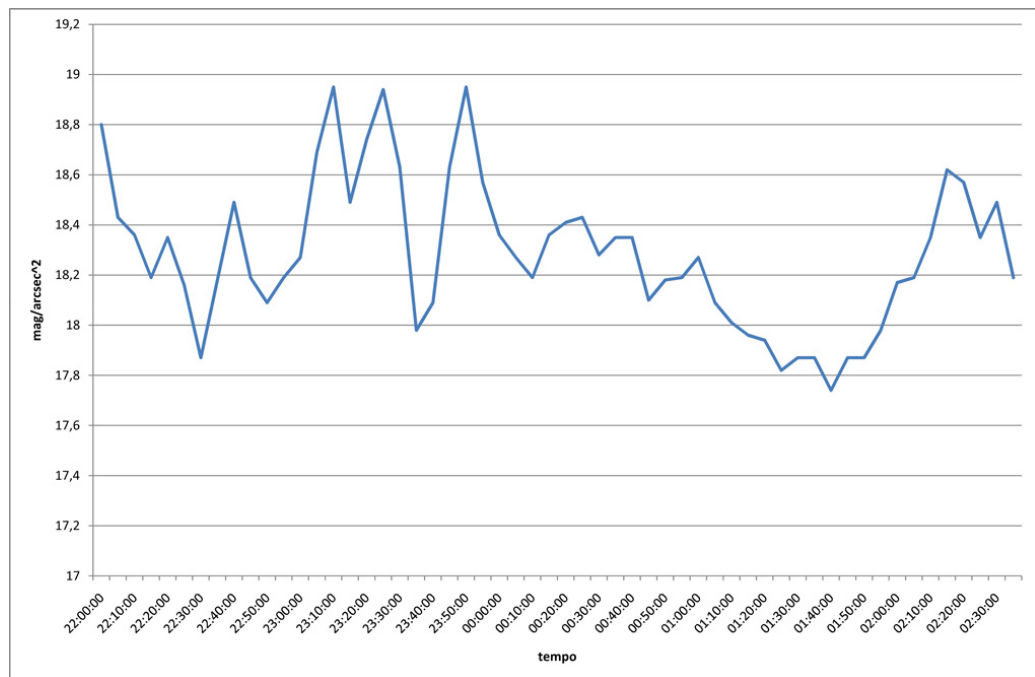


Figura 5.2 Grafico di una curva con accentuata nuvolosità non utilizzabile per questo lavoro di tesi (Nove)

Le curve sono per lo più regolari durante la notte, anche se per alcuni casi certe parti sono irregolari e volta per volta si è dovuta analizzare la situazione. Per un'analisi approfondita, soprattutto in una zona come il Veneto, non sono da sottovalutare fattori meteorologici come l'umidità, e parametri collegati come la temperatura, il vento e la pressione atmosferica. Dato che la brillantezza del cielo è determinata dallo scattering e quest'ultimo è collegato alle variabili appena citate si dovrebbe studiare l'influenza che questi eventi climatici hanno con la variazione della brillantezza del cielo durante la notte. In questo lavoro di tesi, però, questi fattori non sono stati esaminati.

5.1 Studio dell'andamento della luminosità

Le notti ridotte dal programma della dottoressa Binotto sono quelle delle stazioni di Padova, Cima Ekar e Pennar, mentre per le stazioni di Passo Valles e Nove la selezione è stata fatta manualmente. Per queste ultime sono state selezionate le notti vicine alla luna nuova e controllate curva per curva per escludere la presenza di copertura nuvolosa o variazioni maggiori a 0,3 magnitudini tra un punto e l'altro. L'accuratezza del programma è stata verificata attraverso il controllo dei grafici anche per le prime tre stazioni, per assicurarsi che il programma non avesse preso curve errate.

Una volta fatta questa verifica si è passati allo studio della variazione di luminosità. Si nota subito che le curve non hanno sempre una pendenza regolare, quindi la curva è stata divisa in due parti ed è stata calcolata la variazione di magnitudine (all'ora). La prima parte della notte è stata fatta andare dalle 21:00 all'1:00 per le notti invernali, mentre dalle 22:00 all'1:00 per le notti estive. La seconda parte della notte va invece dall'1:00 alle 4:00 per le notti invernali, e dall'1:00 alle 3:00 per le notti estive. Nei mesi di transizione, gli orari di inizio e fine notte variano al massimo di 30 minuti in base alla curva, per evitare che all'interno dell'intervallo cadessero valori di luminosità troppo bassi coincidenti con alba e tramonto.

5.1.1 Descrizione dei grafici

Per questo lavoro di tesi viene usata una scala in magnitudine con valori numerici crescenti verso l'alto nella scala delle ordinate, anche se non è la tradizione dell'astronomia, dove invece si usa mettere la scala delle ordinate con luminosità crescenti verso l'alto.

Nella maggior parte dei casi, i grafici delle notti serene sono costituiti da una curva con magnitudine crescente nella prima parte della notte. Dall'1:00 in poi si assiste invece ad un trend opposto, in più della metà delle notti è presente un aumento della luminosità; negli altri casi la curva rimane con andamento crescente, anche se meno ripido rispetto alla prima parte, o costante. Nel corso della notte i valori sono variabili in un intervallo tra 20 e 21 $mag/arcsec^2$ per Cima Ekar e Pennar, tra 17,5 e 18,5 $mag/arcsec^2$ per Padova, tra 18 e 20 $mag/arcsec^2$ per Nove e tra 20,5 e 22 $mag/arcsec^2$ per Passo Valles.

Dalla Figura 5.4 si può notare come, da una sola notte invernale, sia evidente la correlazione tra Padova, Asiago e Nove, e la somiglianza tra le curve. Tutte presentano un andamento visibilmente crescente nella prima parte della notte e un leggero appiattimento nella seconda.

5.1.2 Analisi delle pendenze medie

Una volta raccolte tutte le pendenze è stata calcolata la variazione di magnitudine oraria media per ogni stazione. Nella seguente tabella vengono riportati i risultati per le due parti della notte:

Stazione	1 ^a parte	2 ^a parte
Cima Ekar	0,036 $mag/arcsec^2 \cdot h$	-0,053 $mag/arcsec^2 \cdot h$
Pennar	0,043 $mag/arcsec^2 \cdot h$	-0,01 $mag/arcsec^2 \cdot h$
Nove	0,271 $mag/arcsec^2 \cdot h$	0,006 $mag/arcsec^2 \cdot h$
Passo Valles	0,085 $mag/arcsec^2 \cdot h$	-0,19 $mag/arcsec^2 \cdot h$
Padova	0,050 $mag/arcsec^2 \cdot h$	0,006 $mag/arcsec^2 \cdot h$

Si nota una crescita globale nella prima parte della notte mentre nella seconda parte l'andamento si differenzia. In siti ad una maggiore altitudine

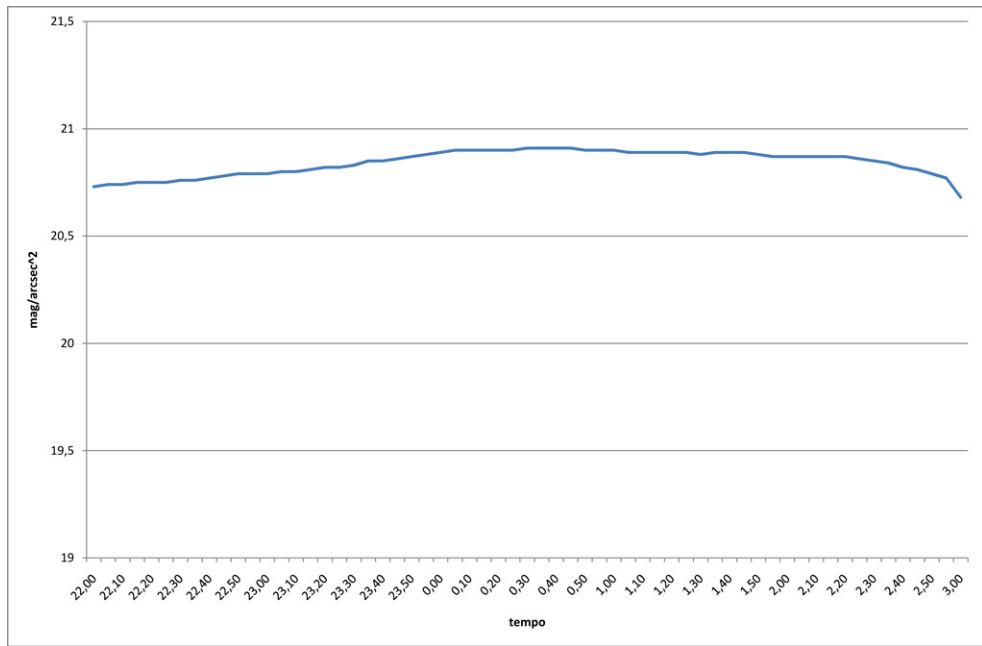


Figura 5.3 Grafico di una curva in cui c'è un evidente cambio di pendenza tra la prima e la seconda parte della notte (Cima Ekar)

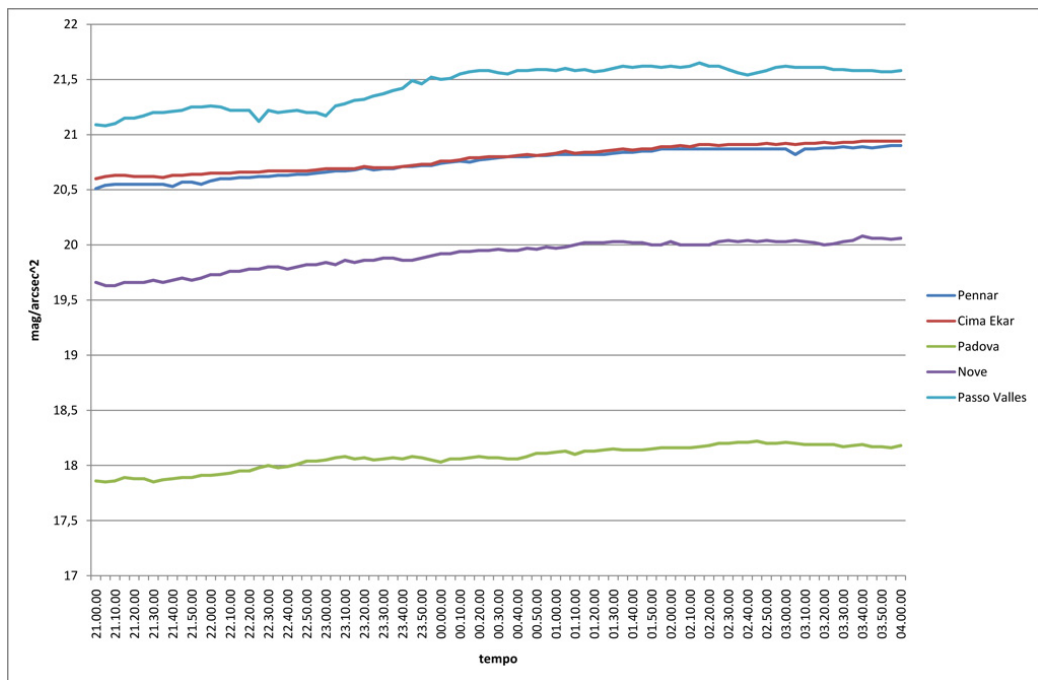


Figura 5.4 Confronto tra le curve di una notte invernale

(Pennar, Cima Ekar e Passo Valles) la luminosità del cielo inizia ad aumentare, mentre in siti a bassa quota (Padova e Nove) la luminosità continua a diminuire. Una prima ipotesi per questo fenomeno può essere che, essendo le ultime stazioni in piena pianura Padana, una grande quantità di luce è presente durante tutta la notte. In pianura ci sono molte tipologie di illuminazione, di cui la maggior parte diminuiscono velocemente durante la prima parte della notte, per esempio le luci delle abitazioni e del traffico automobilistico. Rimangono accese le luci dell'illuminazione pubblica, l'illuminazione degli edifici (palazzi storici, monumenti, attività industriali). Si assiste perciò ad una graduale diminuzione della luminosità per tutta la durata della notte. Vicino alle stazioni di Asiago e Passo Valles, invece, la densità di luce artificiale è ridotta, quindi una volta diminuita la circolazione delle automobili e le luci dei privati, il cielo può essere più facilmente sottoposto ad altri fattori. L'influenza dalla Via Lattea per alcuni periodi dell'anno, soprattutto in inverno, per esempio, è stata già verificata per il cielo di Asiago (tesi Vedovato, 2013). Si ricorda che il fondo della Via Lattea costituisce circa il 50% del fondo naturale. Passo Valles è ad un'altitudine maggiore e ha un cielo più buio, quindi è ipotizzabile che la nostra galassia incida, con la sua luminosità con una percentuale superiore rispetto ad Ekar. Quindi, al contrario delle stazioni in pianura, in quelle in montagna si può assistere ad un'inversione di pendenza della curva, coincidente con un aumento di luminosità.

Guardando le singole pendenze sembra che Nove si comporti in modo diverso dagli altri siti, la pendenza di alcune notti è anche 10 volte quella di Asiago o Padova. Quest'andamento così anomalo può essere causato dal luogo in cui si trova la centralina. Essa è stata collocata vicino ad un fiume e l'elevata umidità può influenzare i valori in modo non indifferente.

Sempre guardando i singoli dati, Passo Valles ha una maggiore variazione di luminosità nella prima parte della notte, confrontata con gli altri siti, escludendo Nove per le motivazioni appena dette. Non essendo densamente popolato come la pianura vi è sicuramente sia un minore traffico automobilistico che una minor illuminazione delle abitazioni private e delle attività notturne, quindi una volta diminuite queste componenti il cielo arriva facilmente a magnitudini molto alte.

Nei seguenti grafici sono rappresentate tutte le notti migliori assieme per ogni stazione, per far notare l'andamento compatto che hanno le curve e la pendenza che tendenzialmente non cambia in uno stesso sito. Questo andrebbe ad escludere che le pendenze siano dominate dalla variabilità di effetti meteorologici.

Si nota inoltre che, mentre Cima Ekar e Pennar mostrano piccole differenze tra e curve, Padova presenta curve discrepanti.

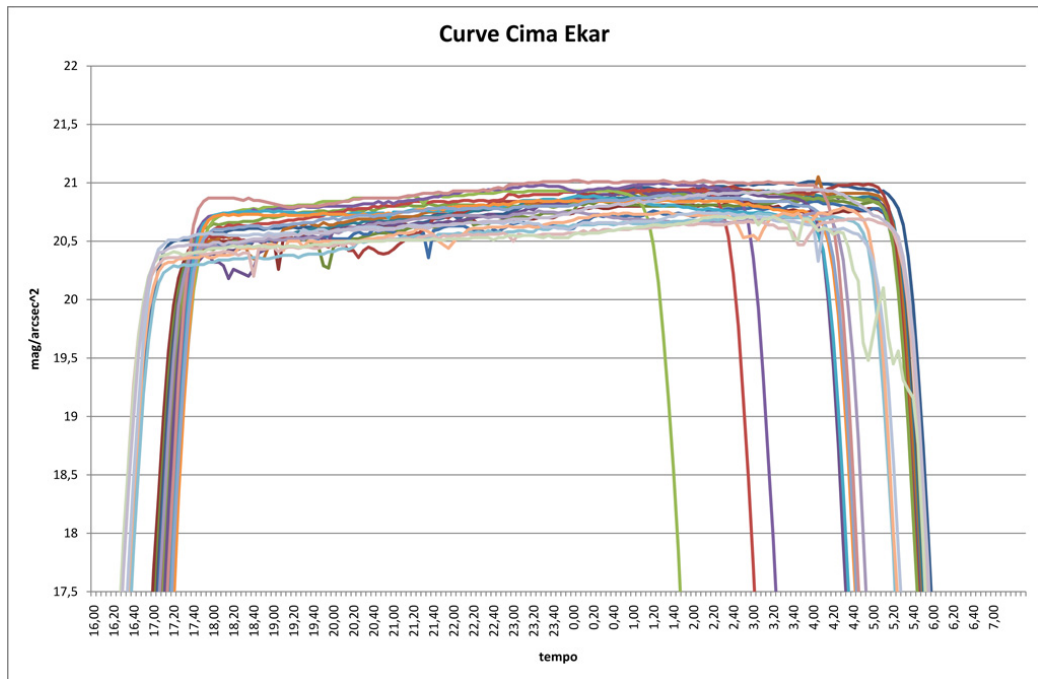


Figura 5.5 Grafico delle notti migliori di Cima Ekar

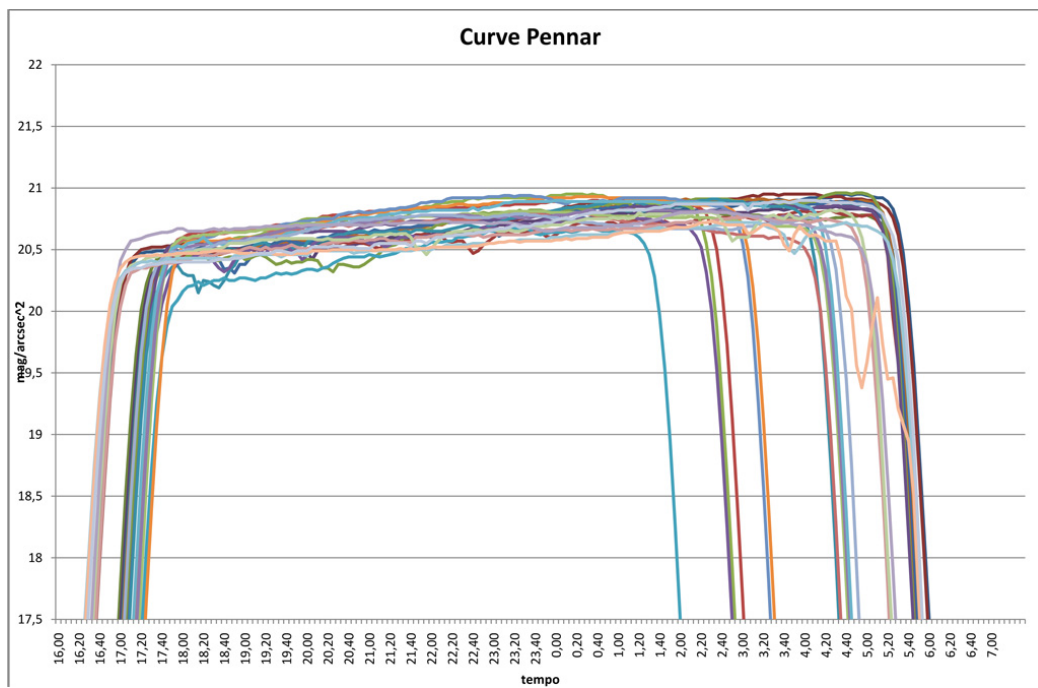


Figura 5.6 Grafico delle notti migliori di Pennar

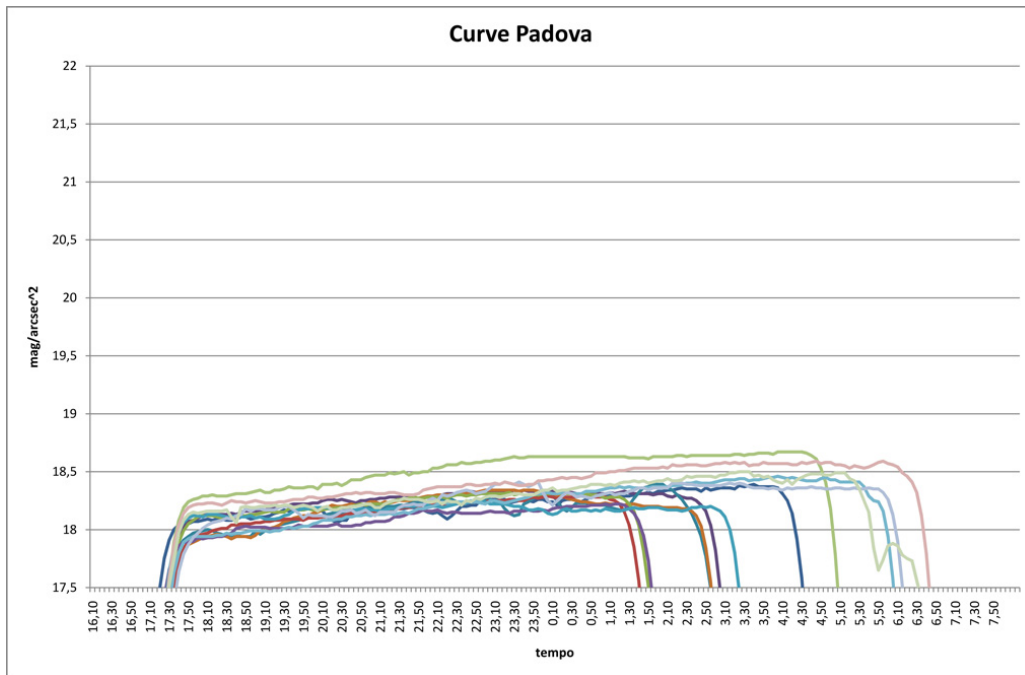


Figura 5.7 Grafico delle notti migliori di Padova

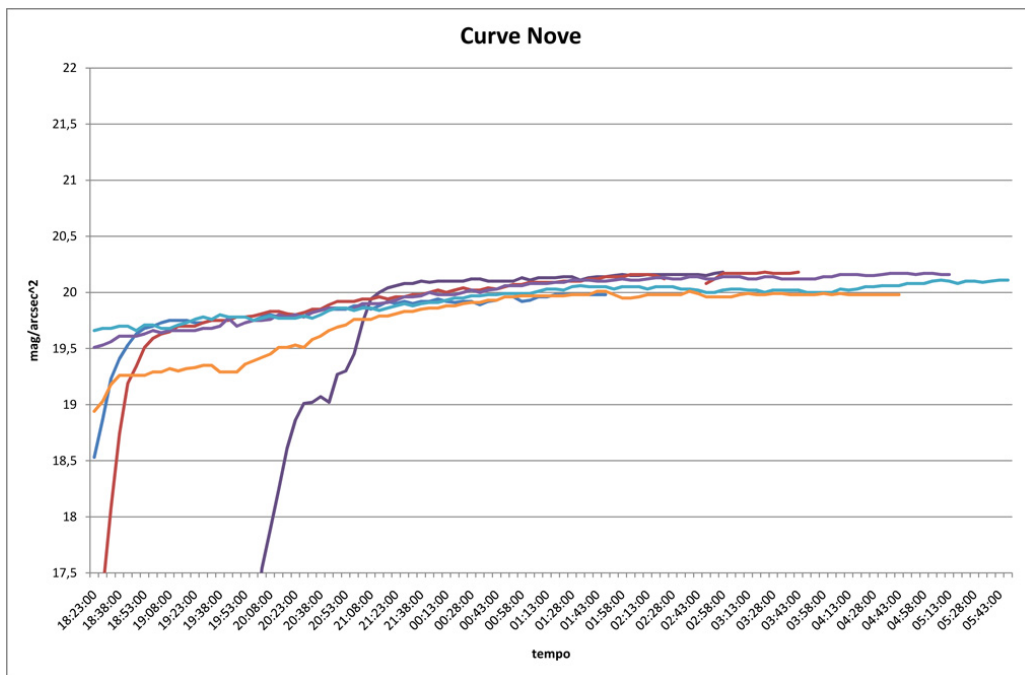


Figura 5.8 Grafico delle notti migliori di Nove

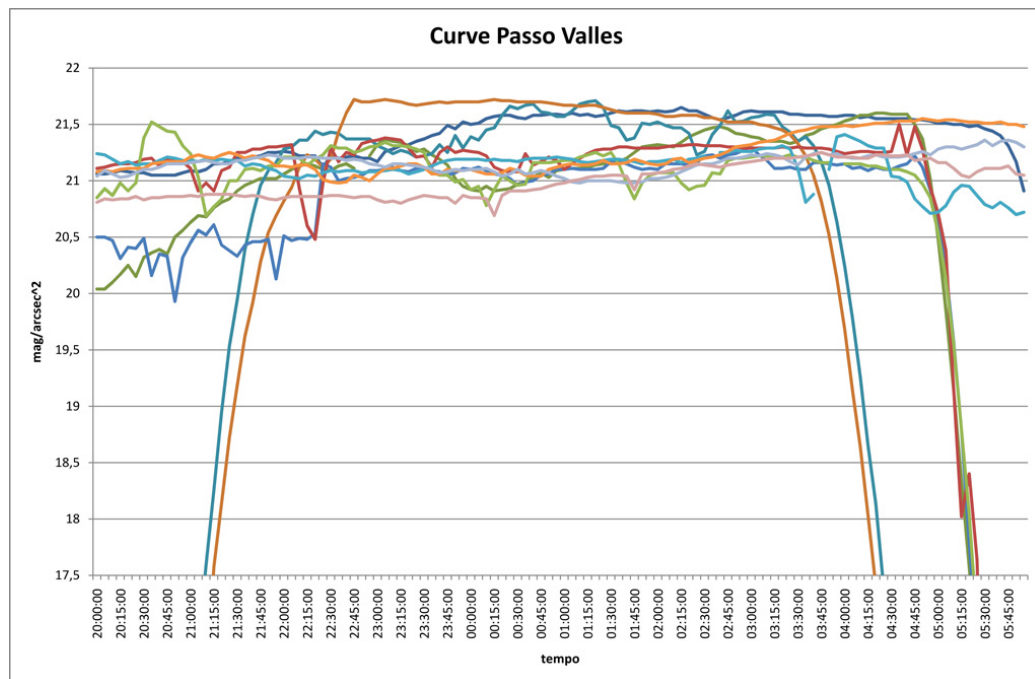


Figura 5.9 Grafico delle notti migliori di Passo Valles

5.1.3 Analisi delle frequenze

Oltre ad un'analisi sulle pendenze medie per stazione, è stata fatta un'analisi sulla frequenza delle pendenze, separatamente tra la prima e la seconda parte della notte.

Per Nove le notti selezionate sono troppo poche, infatti le frequenze maggiori hanno troppi pochi dati e il risultato può non essere realistico. Le classi di frequenza oltretutto non sono distribuite in modo uniforme (vanno da $-0,05 \text{ mag/arcsec}^2 \cdot h$ a $1,3 \text{ mag/arcsec}^2 \cdot h$), al contrario di Asiago e Padova.

Un problema simile a Nove ce l'ha Passo Valles. I valori sono molto diversificati tra loro e ci sono molte notti a pendenza negativa (quasi il 50%), perciò il calcolo delle frequenze è complesso. I valori più frequenti si presentano al massimo tre volte e ai fini di uno studio di questo genere il risultato trovato non è utile.

Per Asiago e Padova la frequenza maggiore coincide abbastanza bene con la media totale, a riprova del fatto che le classi di frequenza sono più uniformi e che i valori sono più coerenti tra loro.

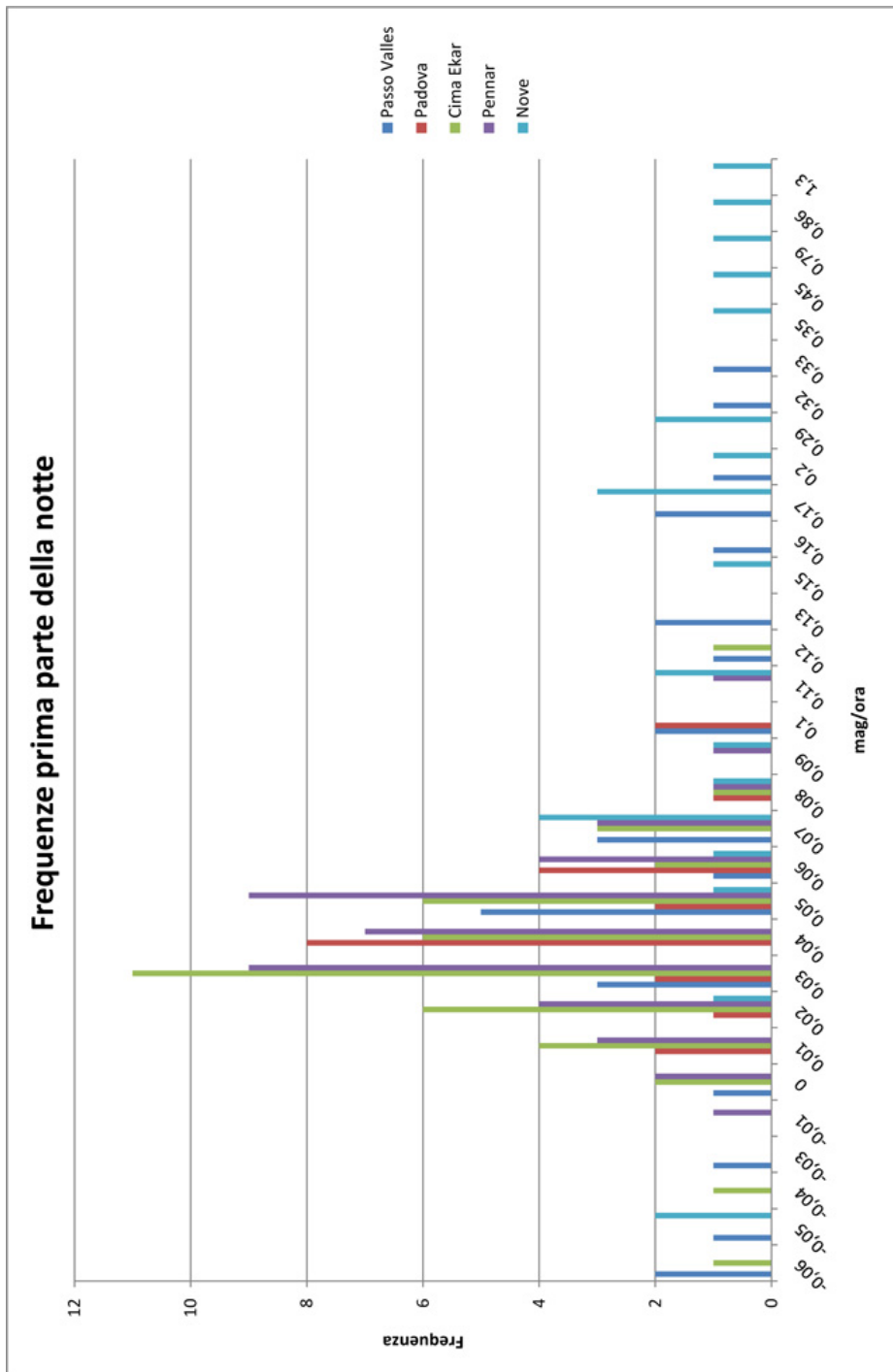


Figura 5.10 Istogramma delle frequenze della prima parte della notte

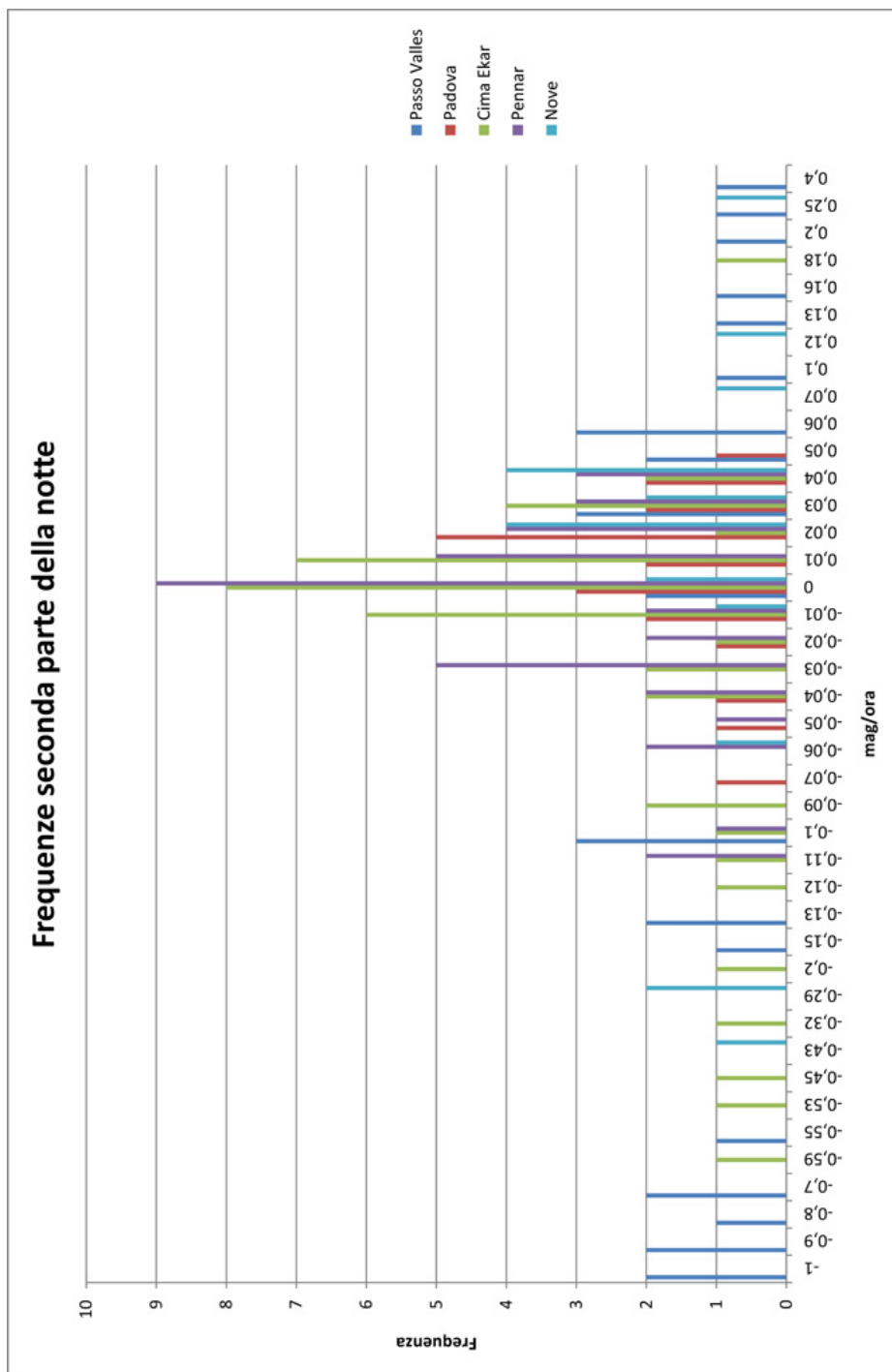


Figura 5.11 Istogramma delle frequenze della seconda parte della notte

Dalla seguente tabella si può vedere quanto appena detto.

Stazione	1^a parte	2^a parte
Cima Ekar	$0,02 \rightarrow 0,05 \text{ mag/arcsec}^2 \cdot h$	$-0,01 \rightarrow 0,03 \text{ mag/arcsec}^2 \cdot h$
Pennar	$0,03 \rightarrow 0,05 \text{ mag/arcsec}^2 \cdot h$	$-0,03 \rightarrow 0,02 \text{ mag/arcsec}^2 \cdot h$
Nove	–	–
Passo Valles	$0,03 \rightarrow 0,07 \text{ mag/arcsec}^2 \cdot h$	$0,03 \rightarrow 0,06 \text{ mag/arcsec}^2 \cdot h$
Padova	$0,04 \rightarrow 0,06 \text{ mag/arcsec}^2 \cdot h$	$0 \rightarrow 0,02 \text{ mag/arcsec}^2 \cdot h$

5.1.4 Analisi delle curve medie stagionali

Per uno studio più dettagliato è stata fatta una divisione stagionale delle notti, calcolate le curve medie per ogni stazione. Per Passo Valles è possibile che lo strumento abbia avuto dei problemi, quindi per l'analisi delle curve stagionali sono state prese notti da anni precedenti (2013), in cui le curve sembrano migliori. La stagione estiva non è stata analizzata per mancanza di dati.

Inverno

Stazione	n° notti
Passo Valles	2
Pennar	6
Cima Ekar	5
Nove	3
Padova	5

Come già visto nel primo confronto tra le curve di una singola notte invernale, anche qui si nota una correlazione tra Padova, Pennar e Nove, che presentano un andamento congruente.

Pennar e Cima Ekar nella prima metà della curva sono quasi sovrapposte e nella seconda metà Pennar tende ad aumentare la sua luminosità, forse per un aumento di umidità localizzato, che causa un leggero aumento di luminosità.

Passo Valles nella prima parte della curva ha una pendenza leggermente più accentuata rispetto a Cima Ekar, probabilmente a causa di un più repentino spegnimento delle poche luci nei dintorni. Nelle prime ore della notte è acceso un faro in un rifugio vicino alla centralina e può essere un fattore che alza la luminosità del cielo ad inizio notte.

La via Lattea in questa stagione entra nel campo visivo dello strumento nella prima metà della notte, circa fino all'1 (tesi Vedovato, 2013), ma tutti i siti nella prima parte presentano la medesima pendenza (Passo Valles, come detto, più accentuata, ma comparabile) e nella seconda parte non c'è un aumento. Se ci fosse, si potrebbe ipotizzare una diminuzione di luminosità

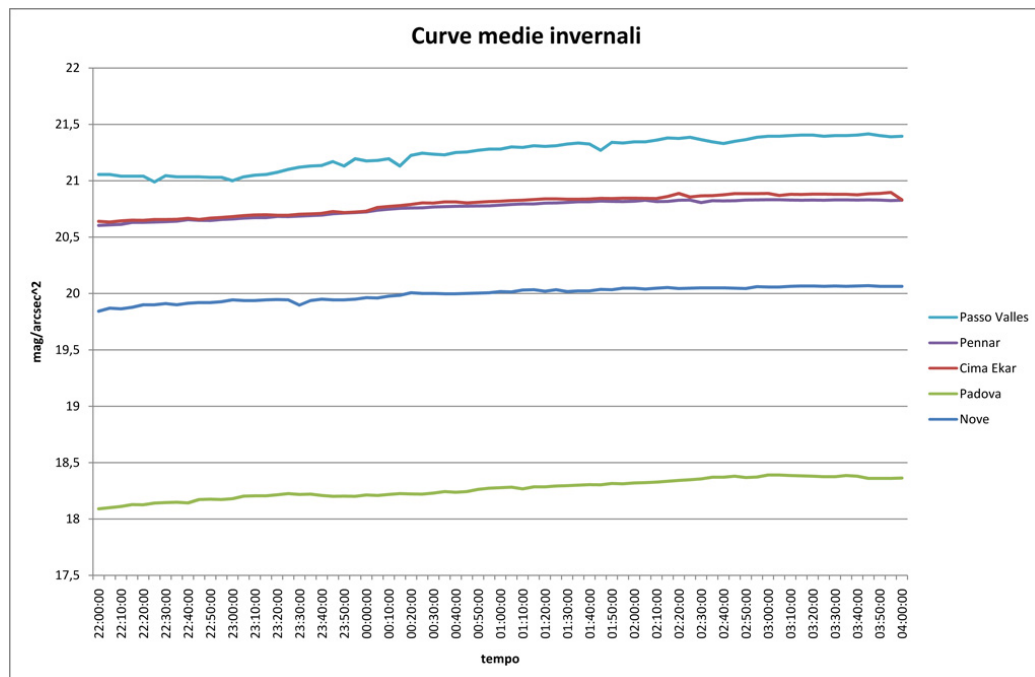


Figura 5.12 Confronto tra le curve medie delle cinque stazioni in inverno

dovuta all'allontanamento della Via Lattea nel campo del SQM. La Galassia quindi non sembra influire in maniera significativa su nessuna stazione.

Primavera

Stazione	n° notti
Passo Valles	2
Pennar	3
Cima Ekar	1
Nove	4
Padova	4

In primavera risulta ancora più evidente la correlazione tra Padova e Asiago. Le tre curve hanno un andamento moderatamente crescente nella prima parte fino a quasi appiattirsi nella seconda parte.

Nove continua ad avere una pendenza positiva, anche se in questo caso in particolare la crescita della magnitudine è molto accentuata e incostante, probabilmente sempre per la grande differenza tra le singole notti.

Anche Passo Valles non presenta una curva con pendenza omogenea, sembra molto pendente nella prima parte della notte per poi invertire in trend nella seconda parte, anche se in modo meno accentuato.

Si può notare che le notti primaverili ad Asiago sembrano essere leggermente

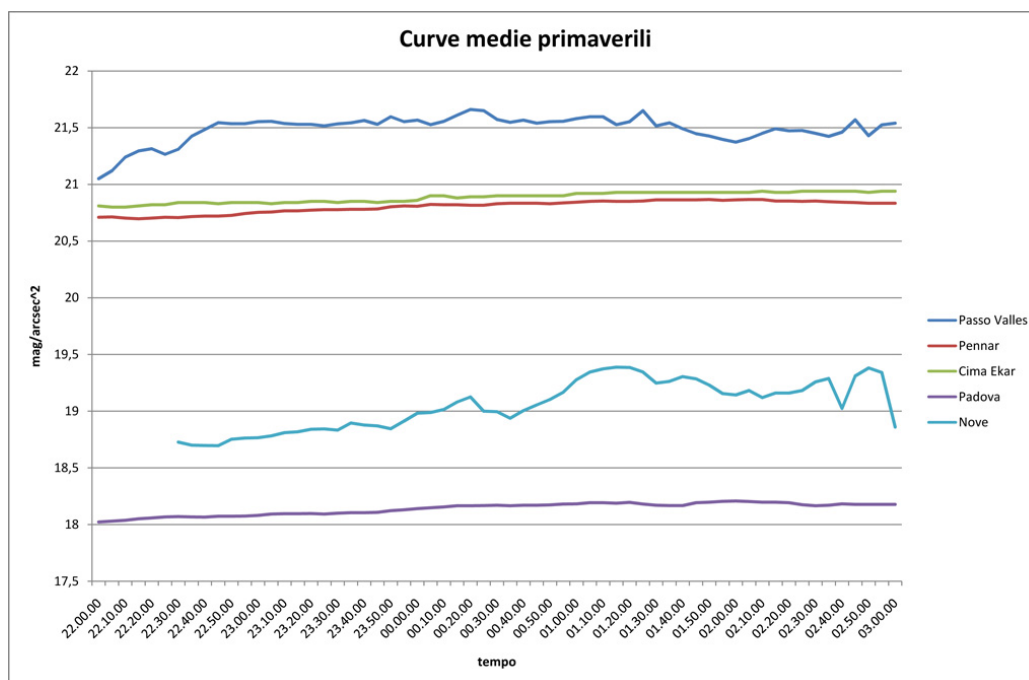


Figura 5.13 Confronto tra le curve medie delle cinque stazioni in primavera

più buie di quelle invernali. Una possibile spiegazione per la minor magnitudine media delle notti invernali è la maggiore illuminazione nel periodo delle festività e per la stagione turistica, o per un maggiore tasso di umidità.

La Via Lattea in primavera non è mai presente nel campo visivo dello strumento se non gli ultimi 30-60 minuti dell'intervallo che si è preso in considerazione (tesi Vedovato, 2013). Quindi anche in questo caso non influisce sulla pendenza delle curve.

Autunno

Stazione	n° notti
Passo Valles	3
Pennar	3
Cima Ekar	3
Nove	2
Padova	3

A conferma dei precedenti grafici, si nota una marcata somiglianza tra Pennar, Cima Ekar e Padova, soprattutto tra Pennar e Padova dove il grafico sembra avere il medesimo andamento. Qui, nella prima parte della notte la luminosità è in leggera diminuzione, mentre nella seconda parte si assiste ad un'inversione di tendenza, la luminosità è in aumento. Pennar in questa stagione ha un cielo leggermente più luminoso di Cima Ekar nella seconda

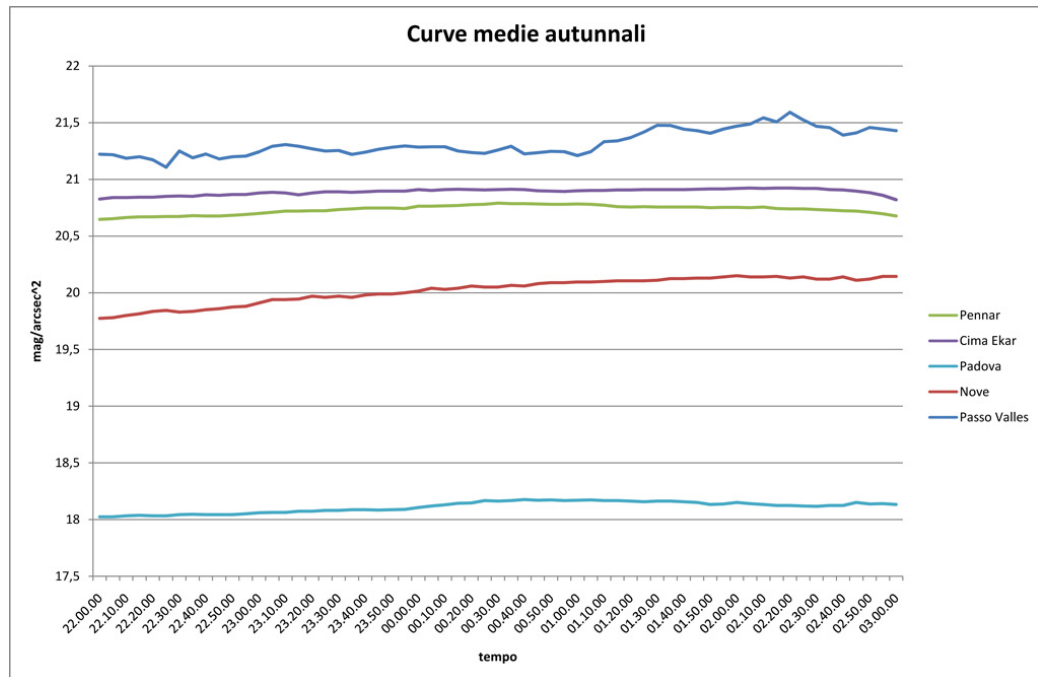


Figura 5.14 Confronto tra le curve medie delle cinque stazioni in autunno

parte della notte al contrario di quanto succedeva nelle altre stagioni dove la distanza tra le due curve rimaneva circa la stessa.

Nove ha un andamento costantemente crescente e più accentuato degli altri siti, mentre Passo Valles ha una luminosità che sembrerebbe avere un andamento costante prima parte e nella seconda aumenta con una pendenza molto simile a Nove. C'è da notare che la magnitudine media del cielo di Passo Valles in autunno è sensibilmente inferiore rispetto alle altre stagioni. Il motivo può essere la costante presenza della Via Lattea nel campo visivo dello strumento, come si può vedere dai dati raccolti dalla Dott. Vedovato nella sua tesi (2013).

Capitolo 6

Confronto con la letteratura

Dall'analisi delle curve stagionali si è trovato che nella prima parte della notte l'aumento di magnitudine non è indifferente e viene riassunto, in termini di percentuale di diminuzione di luminosità, nella seguente tabella:

.	Inverno	Primavera	Autunno
Passo Valles	50%	50%	10%
Pennar	20%	10%	0%
Cima Ekar	20%	10%	10%
Nove	20%	50%	30%
Padova	20%	20%	20%

Come si vedrà, i valori trovati sono in linea con quanto trovato in altri studi.

Per Ashdown (2016) la diminuzione del traffico viene descritta come principale causa della diminuzione di luminosità nella prima parte della notte. Secondo l'autore, in un ambiente urbano una persona media richiede circa 1000- 1500 lumen per capita. Durante la notte i lumen per capita legati al traffico passano da poco meno di 300, ad inizio notte, a qualche unità a metà della notte.

Solo la diminuzione del traffico, secondo l'articolo, è causa della diminuzione del 20%-25% della luminosità del cielo notturno. Il traffico infatti sembra essere in costante diminuzione dalle 20:00 fino all'1:00, mentre rimane costante e quasi nullo dall'1:00 alle 4:00. Il valore percentuale trovato da Ashdown è confrontabile con quello che è stato trovato in questo lavoro di tesi.

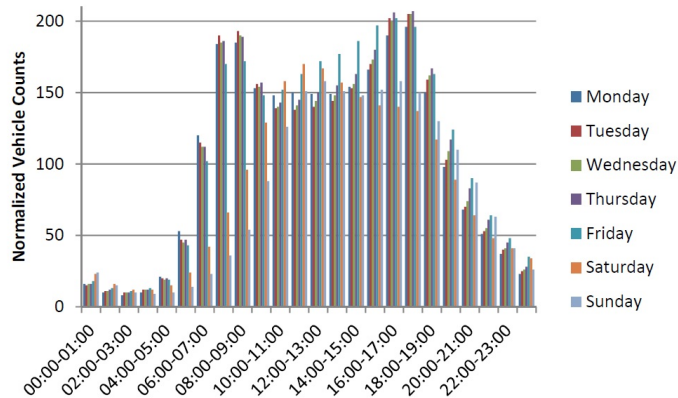


Figura 6.1 Numero di veicoli per fascia oraria (Ashdown, 2016)

Secondo Bará et al. (2017) la diminuzione della luminosità del cielo è dovuta allo spegnimento delle luci interne degli edifici residenziali. Il loro articolo si sviluppa sullo studio di due cittadine spagnole, una è un agglomerato urbano, l'altra è un sito vicino ad una zona industriale.

Per entrambe si parte dall'assunto che le luci dell'illuminazione pubblica rimangono costanti durante tutta la notte, variano invece le luci degli edifici residenziali e dei veicoli.

Per la prima cittadina, dal grafico della radianza normalizzata si vede che questa passa da 0,8 a 1, quindi una diminuzione di luminosità del 20%, e sembrerebbe essere un effetto combinato delle luci residenziali e dei veicoli assieme. Lo studio ha però portato alla stima del contributo dei fattori che possono influire sulla luminosità del cielo, in mcd/m^2 :

Illuminazione stradale	$1,75 \text{ mcd}/m^2$
Luci residenziali	$0,49 \text{ mcd}/m^2$
Luci dei veicoli	$0,03 \text{ mcd}/m^2$

Il contributo massimo dell'illuminazione residenziale è all'inizio della notte astronomica con il 22%, mentre il contributo dell'illuminazione stradale, sempre all'inizio della notte, è del 77%. Il restante 1% è il contributo dei veicoli.

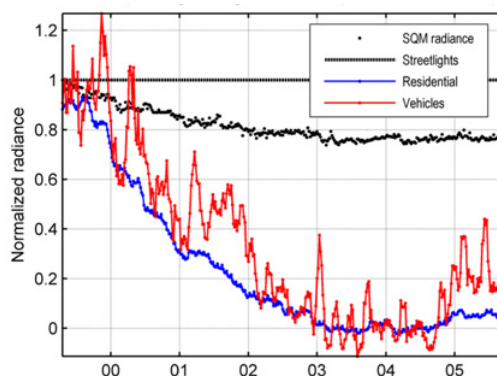


Figura 6.2 Luminosità del cielo normalizzata, con le emissioni urbane dell'illuminazione pubblica, degli edifici residenziali e dei veicoli. In ascissa è espresso il tempo in ore (Bará et al., 2017)

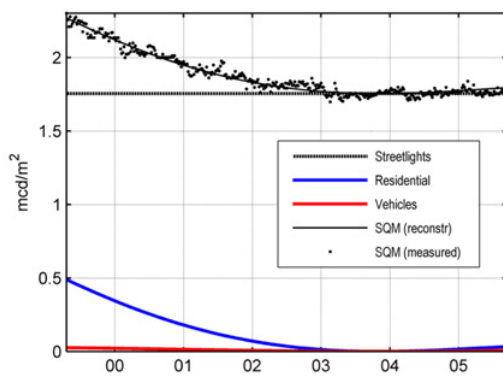


Figura 6.3 Luminosità del cielo notturno in mcd/m^2 con la stima delle componenti artificiali (Bará et al., 2017)

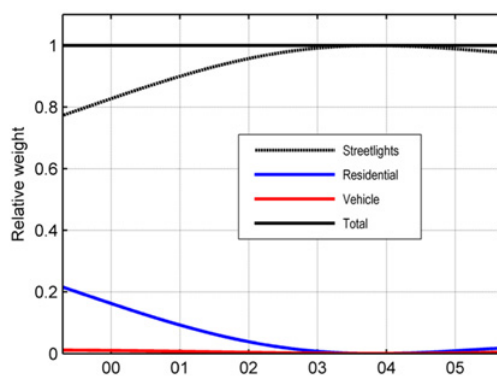


Figura 6.4 Peso relativo delle componenti della luminosità del cielo notturno durante la notte (Bará et al., 2017)

Per la seconda cittadina, sempre attraverso il grafico della radianza normalizzata si nota che il grafico passa da 0,6 a 1, quindi la luminosità del cielo diminuisce del 40% nella prima parte della notte.

Il contributo dei fattori che possono influire sulla luminosità del cielo, in mcd/m^2 è:

Illuminazione stradale	3,00 mcd/m^2
Luci residenziali	1,48 mcd/m^2
Luci dei veicoli	0,09 mcd/m^2
Luci industriali	0,82 mcd/m^2
Luci ornamentali	0,03 mcd/m^2

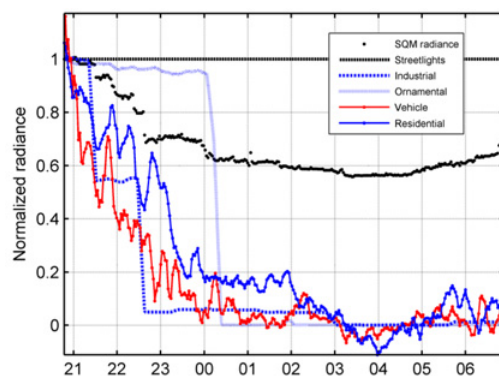


Figura 6.5 Luminosità del cielo normalizzata, con le emissioni urbane dell'illuminazione pubblica, degli edifici residenziali, dei veicoli e delle altre componenti. In ascissa è espresso il tempo in ore (Bará et al., 2017)

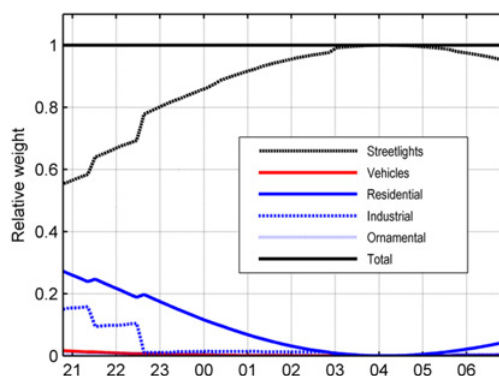


Figura 6.6 Peso relativo delle componenti della luminosità del cielo notturno durante la notte (Bará et al., 2017)

Il contributo dell'illuminazione pubblica è del 55% all'inizio della notte astronomica, nello stesso momento i restanti termini sono al loro massimo

col 27% per le luci residenziali e il 2% per i veicoli. Come per l'altra cittadina il peso dei veicoli e delle luci degli appartamenti diminuisce fino alle 4:00, al contrario il peso dell'illuminazione stradale aumenta fino alle 4:00.

L'articolo spiega infine che sia nelle aree urbane che in quelle industrializzate la luminosità diminuisce a causa del progressivo spegnimento delle luci, con una percentuale del 26% nel primo caso e del 45% nel secondo caso. Luci residenziali e veicoli sono praticamente ininfluenti a partire all'incirca dalle 3:00.

Quanto trovato è coerente con i risultati ottenuti dai capitoli precedenti (tra il 10% e il 30%) dato che nell'analisi fatta non sono stati presi in considerazione siti propriamente industriali. A Padova, per esempio, almeno il 15%-20% degli impianti di illuminazione (in particolare tutti quelli con sorgente LED) riducono i flussi in un orario variabile tra le 22:00 e le 00:00 (Bertolo, comunicazione privata). L'eccezione viene fatta per Passo Valles per cui, secondo quanto scrive Bará et al. dovrebbe essere simile ad un sito industriale. Probabilmente per questo sito ci sono fattori ad inizio notte che influenzano la luminosità del cielo.

Kyaba et al. (2015) ha fatto invece un'indagine più globale e ne ha evinto che in siti dominati dalla luce artificiale, la decrescita media delle componenti artificiali è di circa 5% per ora, sia prima che dopo la mezzanotte. In base a questa affermazione, dalle 22:00 all'1:00 si ha una diminuzione di luminosità di circa il 15%. Il dato è un po' inferiore a quanto trovato in questo lavoro, ma comunque paragonabile.

Infine Luginbuhl et al. (2009) hanno effettuato uno studio sulla città di Flagstaff. Nello studio è stata fatta una divisione in due casi, quando le luci degli impianti sportivi sono accese e quando non lo sono. Per la seconda ipotesi, più vicina allo studio fatto in questa tesi, le percentuali di influenza dei fattori che possono modificare la luminosità del cielo notturno è la seguente: se si fa il calcolo dalle 23:00, 53% per gli edifici commerciali, 14% per gli edifici residenziali, 12% per l'illuminazione stradale e il 21% per l'effetto combinato di edifici industriali, veicoli ed edifici istituzionali. Se il calcolo viene anticipato alle 18:00, i soli veicoli hanno un contributo del 27%.

Dalle 18:00 alle 3:15 infatti il numero dei veicoli, secondo lo studio, passa da 7100 a 170, e per ogni mezzo l'11,2% della luce va direttamente verso l'alto.

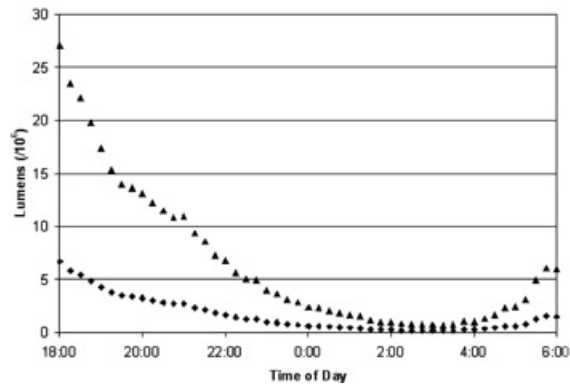


Figura 6.7 Stima dei lumen totali (triangoli) e la componente diretta verso l'alto (quadrati) generati dal traffico stradale di Flagstaff in funzione del tempo (Luginbuhl et al., 2009)

Anche in quest'ultimo caso i valori del traffico automobilistico sono confrontabili con i valori trovati ad inizio capitolo, quindi è ipotizzabile che il traffico abbia una sua rilevanza anche nei siti analizzati in questa tesi. Un'analisi preliminare sui dati di traffico localizzato all'ingresso ovest di Padova indicano una progressiva diminuzione del traffico dalla sera fino alle 2:00, ed una ripresa solo dopo le 6:00-7:00 (Ortolani, comunicazione privata), in accordo alle curve di luminosità.

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro era lo studio dell'andamento della luminosità del cielo durante la notte per valutare alcune componenti variabili dell'inquinamento luminoso, ponendo a confronto quattro siti posti a diverse altitudini: Asiago, Padova, Passo Valles e Nove.

Sono state studiate le singole pendenze per notte e le pendenze delle curve medie stagionali.

Dall'analisi dei dati e delle immagini si nota come ci sia una sovrapposizione di pendenze tra Padova e Asiago, conseguenza di una stessa dinamica nelle cause dell'inquinamento luminoso con una diminuzione di luminosità attorno 20% nella prima parte della notte. Nove, nell'analisi stagionale, è tendenzialmente simile ai precedenti siti anche se con pendenze leggermente più accentuate. L'andamento è sicuramente influenzato dalla luce della pianura Padana nei siti appena citati.

Passo Valles in inverno segue il trend delle altre stazioni, mentre in autunno la luminosità del cielo notturno sembra essere influenzata dalla presenza della via Lattea, che è presente tutta la notte nel centro del campo visivo dello Sky Quality Meter. La via Lattea oltretutto sembra avere influenza solo su questo sito (situato a più di 2000 metri di quota), nelle altre stazioni non sembra avere effetto, non si notano infatti globali aumenti di luminosità durante le notti autunnali.

Tranne che per Passo Valles in autunno, in generale sembra che si possano escludere le componenti naturali come fattori di influenza della luminosità del cielo notturno. Non sono presenti infatti cambi di pendenza in concomitanza con la comparsa o la scomparsa di fenomeni naturali, come la Luce Zodiacale, o il passaggio della via Lattea in inverno.

La causa della variazione di luminosità durante la prima parte della notte è difficile da individuare dato che sia le luci residenziali che le luci dei veicoli hanno il massimo all'inizio della notte e il minimo attorno alle 2:00-3:00. Ci sono anche altri fattori: a Padova, per esempio, durante la notte c'è una progressiva diminuzione dell'illuminazione pubblica durante la notte (Bertolo, comunicazione privata).

Nelle curve medie non ci sono interruzioni significative che facciano pensare al cessato effetto di un singolo fattore, anzi, l'andamento nel più delle volte è omogeneo. Si può quindi pensare che la diminuzione di luminosità, in as-

senza di altri dati specifici, sia causata da una combinazione di più fattori. Ashdown e da Luginbuhl et al. considerano il contributo del traffico circa al 20%, mentre quello degli edifici residenziali circa al 14%, Bará et al. invece considerano un contributo del 20-25% per le luci residenziali e per le luci dei veicoli circa il 2%. Si può concludere che sicuramente fattori artificiali come il traffico automobilistico e le luci interne degli appartamenti contribuiscano all'inquinamento del cielo notturno con percentuali non indifferenti.

Questo tipo di studio è utile per una diagnostica sui fattori di inquinamento, oltre che per aiutare gli astronomi a pianificare e scegliere il periodo dell'anno migliore per le osservazioni di oggetti con una debole luminosità. Le componenti artificiali, infatti, stanno avendo un peso sempre maggiore rispetto alle componenti naturali, come la via Lattea, in tutti i siti urbani. In questo lavoro di tesi si è inoltre notato come anche i siti extraurbani possano essere influenzati dalla luminosità di grandi città, in questo caso la pianura Padana.

Lo studio sui fattori che influenzano la luminosità del cielo notturno è ancora all'inizio e molti sarebbero gli approfondimenti interessanti che potrebbero partire da questo lavoro di tesi. Si potrebbe, per esempio, indagare sull'effetto dell'ora legale, che influisce sulle attività ma non sui fattori naturali, inclusi quelli meteorologici locali, oppure sulla correlazione tra i siti, già evidenziata tra Asiago e Padova. Utile sarebbe uno studio sull'andamento dell'umidità a Padova e Nove, come anche un censimento del traffico per poter quantificare la sua influenza sulla luminosità del cielo durante la notte. Si vorrebbe inoltre sensibilizzare l'opinione pubblica e la ricerca su fattori di inquinamento notturno che comunemente potrebbero essere considerati "insignificanti" come le luci di edifici industriali e residenziali, le luci dei mezzi di trasporto, delle insegne pubblicitarie e di qualsiasi fonte luminosa che non sia necessaria per la salute e la sicurezza dei cittadini.

Ringraziamenti

Il Professor Sergio Ortolani che con competenza, pazienza e disponibilità mi ha seguita in questo lavoro di tesi.

Il Dottor Andrea Bertolo (ARPAV) per avermi fornito parte dei dati e per i preziosissimi consigli.

La Dottoressa Renata Binotto (ARPAV) per aver scritto il programma usato per ridurre le notti utilizzabili e per il sostegno dimostratomi.

L'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV) per avermi fornito i dati.

Gabriele Umbriaco che ha installato della strumentazione, sita a Cima Ekar, utilizzata per la raccolta di una parte dei dati analizzati in questa tesi e si occupa della gestione tecnica della stessa.

Ringrazio inoltre la mia famiglia, e i miei genitori in particolare, per aver sempre sostenuto il mio percorso, le mie decisioni e le mie passioni.

Ringrazio i miei amici che mi sono sempre stati vicini, e in special modo Francesca, con cui ho condiviso gioie e delusioni degli ultimi anni di questa triennale.

Bibliografia

- ASHDOWN I., 2016, <http://agi32.com/blog>, "Mobile light pollution".
- AUBÉ M., 2015, *Phil. Trans. R. Soc. B* 370: 20140117, "Physical behavior of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment".
- BARÁ S. et al., 2017, arXiv, "Estimating the relative contribution of streetlights, vehicles and residential lighting to the urban night sky brightness".
- CINZANO P., 1996, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venezia, "Inquinamento luminoso e protezione del cielo notturno".
- CINZANO P., 2005, Internal Report 9, ISTIL v.1.4, "Night sky photometry with Sky Quality Meter".
- FALCHI F. et al., 2016, *Sci. Adv.* 2:e1600377, "The new world atlas of artificial night sky brightness".
- GARSTANG R. H., 1986, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 98: 364-375, "Model for artificial night-sky illumination".
- HÄNEL A. et al., 2017, arXiv:1709.09558v1 [astro-ph.IM], "Measuring night sky brightness: methods and challenges".
- KNOP E. et al., 2017, *Nature*, Vol 548, pag.206, "Artificial light at night as a new threat to pollination".
- KYABA C.C.M. et al., 2015, *Scientific Reports*, 5:8409, DOI: 10.1038/srep08409, "Worldwide variation in artificial skyglow".
- LUGINBUHL C. B., 2009, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 121:185-203, "From the ground up I: light pollution sources in Flagstaff, Arizona".
- ORTOLANI S., 2016, dispense, "Complementi di Astronomia", Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università degli studi di Padova.
- POMANTE A., 2015, Tesi, "Studio della luminosità del cielo notturno ad Asiago", Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università degli studi di Padova.
- SOARDO P. et al., 2010, *Pub. CIE* 126, "Considerazioni sul modello di Garstang".
- VEDOVATO A., 2013, Tesi, "Misura dell'inquinamento luminoso del cielo notturno ad Asiago", Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università degli studi di Padova.
- VOGEL G., 2017, *Science*, Vol 356, pag. 576, "Where have all the insects gone?"
- <http://www.arpa.veneto.it>

<http://adsbit.harvard.edu>
<http://www.lightpollution.it>

Appendice

Di seguito verranno elencate le pendenze (in *mag/ora*) calcolate per ogni notte a disposizione.

Data	Valles		Nove		Ekar		Pennar	
	1° metà	2° metà	1° metà	2° metà	1° metà	2° metà	1° metà	2° metà
08/01/2016	0,325	0,033						
09/01/2016	0,075	0,4						
11/01/2016	nn	0,033						
12/01/2016	-0,05	0,133						
07/02/2016	0,075	-0,133						
08/02/2016	0,075	0,066						
10/02/2016	0,125	0,066						
08/03/2016	0,05	0,2						
09/03/2016	0,2	0,033						
10/03/2016	0,05	0,1						
11/03/2016	0,175	0,166						
06/04/2016	0,05	-0,133						
07/04/2016	0,175	0						
08/04/2016	0,05	0	0,093	0,043				
09/04/2016	0,05	0,066	-0,05	nn				
05/05/2016	0	-0,1	0,023	nn				
06/05/2016	0,033	-0,1	0,06	nn				
07/05/2016	0,033	-0,15						
08/05/2016	nn	-0,1						
03/06/2016	0,1	-0,95	0,796	-0,295				
04/06/2016	0,1	-0,9						
05/06/2016			0,2	0,123				
06/06/2016	0,066	-1	0,866	0,02				
07/06/2016	0,333	-1,05						
04/07/2016	0,133	-0,8	1,12	0,005				
05/07/2016	0,133	-0,7						
06/07/2016	0,166	-0,7						
07/07/2016	0,033	-0,55	0,504	-0,288				
01/08/2016	-0,066	0,25						
02/08/2016	-0,033	0,05						
03/08/2016	-0,066	0,05	0,17	nn				
27/08/2016					0,02	-0,095	0,056	-0,11
31/08/2016			0,113	0,04				
05/09/2016					0,015	-0,02	0,037	-0,035
25/09/2016							0,025	-0,037
29/09/2016					0,032	-0,324		
30/09/2016			0,295	0,07	0,042	-0,208		
03/10/2016			0,087	0,02				
04/10/2016			0,11	0,023	0,045	-0,093	0,045	-0,107
28/10/2016			0,175	-0,065				
29/10/2016			0,072	0,003	0,01	0,033	0	0,04
30/10/2016					0,02	0,032	0,012	0,043
31/10/2016					-0,062	0,006		
02/11/2016			0,17	-0,01	0,035	-0,003	0,037	0,01
26/11/2016					-0,002	0,033		
28/11/2016			0,295	0,046				
29/11/2016					0,032	0,02	0,025	0,03
02/12/2016					-0,04	-0,013	0,03	nn

23/12/2016				0,045	-0,106	0,042	nn	
26/12/2016				0,045	0,18	0,07	nn	
27/12/2016				0,07	0,04	0,065	0,043	
28/12/2016						0,055	nn	
29/12/2016		0,077	0,03	0,055	0,016	0,062	0,016	
30/12/2016				0,032	-0,033	0,045	-0,033	
31/12/2016						0,055	0,036	
media	0,085357	-0,19067	0,272421	-0,01567	0,023176	-0,03147	0,041313	-0,00867

Figura 6.8 Pendenze 2016

Data	Ekar		Pennar		Padova		Nove	
	1°metà	2° metà	1°metà	2° metà	1°metà	2° metà	1°metà	2° metà
01/01/2017	0,08	0,016	0,08	0,02				
22/01/2017	0,042	-0,013	0,042	0				
23/01/2017	0,06	0,013	0,06	0,016				
24/01/2017	0,05	0,01	0,052	0,013				
25/01/2017	0,052	0,003	0,057	0,013				
26/01/2017	0,052	-0,003	0,052	0,003				
27/01/2017	0,035	0,04	0,04	0,036				
28/01/2017	0,125	-0,003	0,115	0,003				
29/01/2017	0,015	0	0,032	0,003				
25/02/2017	0,065	-0,003	0,062	0	0,017	0,036		
01/03/2017	0,035	-0,456	0,047	nn	0,042	nn		
02/03/2017	0,075	-0,113	0,072	-0,11	0,042	-0,07		
27/03/2017	0,05	-0,59	0,04	-0,02	0,042	-0,006		
28/03/2017					0,08	0,043		
29/03/2017			0,057	-0,052	0,1	-0,043		
30/03/2017			0,057	-0,044	0,062	0,05		
21/04/2017					0,05	0,018		
21/08/2017							0,156	nn
22/08/2017							0,07	0,03
23/08/2017	0,026	-0,125			0,046	0,01	0,073	0,04
24/08/2017							0,056	nn
25/08/2017			0,093	-0,06	0,046	0,025		
20/09/2017			0,05	-0,044				
21/09/2017	0,032	-0,53	0,035	-0,028	0,032	-0,016		
14/10/2017	0,035	-0,046	0,012	-0,067	0,065	-0,02		
15/10/2017	0,027	-0,04	0,012	-0,033	0,1	-0,013		
16/10/2017	0,035	-0,03	0,025	-0,03	0,015	-0,003		
18/10/2017	0,035	-0,01	0,032	-0,013				
19/10/2017	0,075	0,013	nn	0,007				
23/10/2017	0,007	0,016	-0,012	0,023	0,06	0,006		
24/10/2017					0,027	-0,05		
14/11/2017	0,032	0,013	0,02	0,023				
16/11/2017	0,045	-0,013	0,037	0,006	0,052	0,036		
19/11/2017	0,015	-0,01	0	0	0,03	0,02		
21/11/2017							0,355	0,256
16/12/2017	0,022	-0,003	0,037	-0,017	0,042	0,026		
17/12/2017	0,025	0,01	0,032	0,003	0,042	0,023		
20/12/2017	0,057	0,036	0,077	0,026	0,065	0,02		
21/12/2017							0,455	0,023
22/12/2017					0,047	0,043		
media	0,044593	-0,06733	0,045345	-0,01114	0,050182	0,006429	0,194167	0,08725

Figura 6.9 Pendenze 2017