

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Galileo Galilei



Corso di Laurea in Astronomia

Studio della luminosità del cielo notturno ad Asiago

Relatore  
Prof. Sergio Ortolani

Laureanda  
Angela Pomante  
Matricola n. 574531

Anno accademico 2014/2015



A mia Madre



# INDICE

1. INTRODUZIONE .....	6
2. CONTRIBUTI NATURALI ALLA LUMINOSITA' DEL CIELO NOTTURNO .....	7
2.1 La nuvolosità del cielo e la luce lunare .....	8
3. CONTRIBUTI ARTIFICIALI ALLA LUMINOSITA' DEL CIELO NOTTURNO .....	9
3.1 Limiti imposti dalla brillantezza del cielo alle osservazioni fotometriche .....	9
4. STRUTTURA DELL'ATMOSFERA E PROCESSI DI DIFFUSIONE .....	11
4.1 Scattering di Rayleigh e Mie.....	11
5. MODELLI PER LO STUDIO DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO .....	12
5.1 Modello di Walker .....	12
5.2 Modello di Treanor .....	12
5.3 Modello di Garstang .....	13
5.4 Modello di Soardo.....	15
6. STRUMENTAZIONE.....	19
6.1 Calibrazione .....	20
7. ANALISI DELLE CURVE DI BRILLANZA .....	22
8. ANALISI DEGLI ISTOGRAMMI MENSILI .....	29
8.1 Cima Ekar – Nove a confronto .....	33
9. CONCLUSIONI .....	43
10. BIBLIOGRAFIA .....	44
11. RINGRAZIAMENTI.....	45

# 1. INTRODUZIONE

*“Due cose riempiono l’animo di ammirazione e venerazione sempre nuova e crescente: il cielo stellato sopra di me, e la legge morale in me”* I. Kant, Critica della ragion pratica.

Negli ultimi anni si assiste, purtroppo, ad un graduale aumento di una nuova forma di inquinamento: l’inquinamento luminoso dell’atmosfera. Per inquinamento luminoso si intende ogni forma di irradiazione di luce artificiale rivolta direttamente o indirettamente verso il cielo. Alla componente naturale del flusso di fondo-cielo di origine terrestre (es. luce aurorale) o extraterrestre (es. luce zodiacale), si aggiunge la componente artificiale data dall’illuminazione pubblica o privata, aggravata dall’uso di dispositivi obsoleti o mal installati.

La conseguenza più eclatante è che l’aumento della brillantezza del cielo notturno porta alla perdita della possibilità di percepire l’Universo attorno a noi. Gli abitanti delle grandi città non riescono a vedere le stelle, per non parlare della Via Lattea, classificata come patrimonio culturale dall’UNESCO, che non è più visibile da vaste zone abitate del pianeta. Solo quando ci si è accorti che i luoghi della Terra che restavano adatti all’osservazione erano pochi e fortemente minacciati, e che tutti gli osservatori erano limitati nelle loro possibilità di osservazione, si è cominciato a sviluppare un concreto impegno nella lotta all’inquinamento luminoso.

L’aspetto culturale non è il solo a subire le conseguenze dell’aumento della luminosità del cielo notturno: si verificano importanti squilibri sul ciclo naturale “notte-giorno” della flora e della fauna dell’intero ecosistema; anche l’uomo risente dell’aumento della luminosità notturna, il suo ritmo circadiano “veglia-sonno” viene alterato causando squilibri metabolici e disturbi dell’attenzione.

Le osservazioni astronomiche da terra vengono penalizzate ed è diventato fondamentale spostarsi in regioni isolate per cercare siti idonei e sufficientemente bui.

A questo si unisce anche un rilevante fattore economico: almeno il 30% dei costi di elettricità legati all’illuminazione pubblica sono di fatto sprecati sotto forma di inquinamento luminoso.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è studiare l’andamento della luminosità del cielo notturno ad Asiago da maggio 2011 ad agosto 2015, tramite dati presi dallo Sky Quality Meter (SQM), posizionato presso l’Osservatorio di Cima Ekar ad Asiago.

Quest’analisi permetterà di farsi un’idea sull’andamento dell’inquinamento luminoso valutando se le norme regionali in Veneto stanno portando beneficio.

## 2. CONTRIBUTI NATURALI ALLA LUMINOSITA' DEL CIELO NOTTURNO

Il cielo notturno è caratterizzato da una sua luminosità intrinseca, causata da fenomeni del tutto naturali.

I contributi naturali alla luminosità di fondo-cielo hanno natura terrestre o extraterrestre. I contributi di natura extraterrestre sono:

- 1) la Luce Zodiacale è dovuta alla diffusione della luce solare da parte di polveri e particelle solide minutissime, distribuite nello spazio interplanetario, con una concentrazione maggiore sul piano dell'eclittica; nel cielo si osserva un debole chiarore a forma di ventaglio sulla volta celeste in corrispondenza della fascia dello Zodiaco dopo il crepuscolo serale e al mattino, prima dell'alba, quando il cielo è limpido e senza Luna.
- 2) La componente galattica della Via Lattea consiste nella luce integrata delle stelle. La brillantezza dovuta alla luce integrata di stelle varia in funzione della zona del piano galattico osservata, con un massimo in direzione della costellazione del Sagittario (pari a  $250 \times 10^{-6}$  cd/m<sup>2</sup>) ed un minimo in direzione dell'Auriga (pari a  $20 \times 10^{-6}$  cd/m<sup>2</sup>). Considerando che il cielo buio naturale ha una brillantezza di  $100 \times 10^{-6}$  cd/m<sup>2</sup>, si riesce a comprendere il diverso contributo delle due direzioni di osservazione (formula di conversione:  $C = k10^{-0.4B}$ , con  $C = \text{cd/m}^2$  e  $B = \text{mag/arcsec}^2$ ).
- 3) La luce galattica diffusa da particelle di polvere interstellare è una componente piuttosto debole. La luce galattica diffusa è maggiore lungo la Via Lattea dove sia la polvere interstellare sia le stelle raggiungono la massima concentrazione. La brillantezza prodotta dalla luce galattica diffusa è tra  $6 \times 10^{-6}$  cd/m<sup>2</sup> e  $14 \times 10^{-6}$  cd/m<sup>2</sup>, quindi molto poco rispetto alla componente galattica della Via Lattea.
- 4) La luce di sorgenti cosmiche integrate di oggetti che emettono nell'ottico contribuiscono, seppur debolmente, alla luminosità del fondo-cielo.

I contributi di natura terrestre sono:

- 1) Aurore: il fenomeno è causato dall'interazione di particelle cariche (protoni ed elettroni) di origine solare (vento solare) con la ionosfera terrestre (atmosfera tra i 100 e 500 km). Tali particelle eccitano gli atomi dell'atmosfera che diseccitandosi emettono luce di varie lunghezze d'onda. A causa della geometria del campo magnetico terrestre, le aurore sono visibili in due ristrette fasce attorno ai poli magnetici della Terra, dette ovali aurorali. Le

aurore visibili ad occhio nudo sono prodotte dagli elettroni, mentre quelle dei protoni possono essere osservate con l'ausilio di particolari strumenti, sia da Terra sia dallo spazio. Le aurore sono più intense e frequenti durante periodi di intensa attività solare, periodi in cui il campo magnetico interplanetario può presentare notevoli variazioni di intensità e direzione, aumentando la possibilità di un accoppiamento (riconnesione magnetica) con il campo magnetico terrestre. Questo fenomeno è in gran parte circoscritto ad alte latitudini.

- 2) Airglow (luminescenza notturna): si tratta di una debole emissione luminosa dell'atmosfera terrestre. Esso è causato da un insieme di processi negli strati superiori dell'atmosfera, come la ricombinazione degli ioni che sono stati fotoionizzati dalla radiazione solare durante il giorno, la luminescenza derivante dalle collisioni tra i costituenti dell'atmosfera e i raggi cosmici incidenti e la chemiluminescenza associata alle reazioni dell'ossigeno e dell'azoto con lo ione idrossido ad altezze di poche centinaia di chilometri. L'airglow notturno può essere sufficientemente luminoso da essere notato ad occhio nudo ed è generalmente blu in colore. Infatti, sebbene le emissioni siano piuttosto uniformi in tutta l'atmosfera, ad un osservatore sulla superficie appare più luminoso a circa  $10^\circ$  sopra l'orizzonte perché quanto più in basso guarda, maggiore è lo spessore atmosferico nel cammino ottico.

## 2.1 La nuvolosità del cielo e la luce lunare

La luminosità del cielo notturno è caratterizzata anche da altri due fattori: la presenza di nubi nel cielo e la presenza della Luna.

Per quanto riguarda la nuvolosità del cielo notturno, i cieli nuvolosi risultano più luminosi rispetto a quelli limpidi in qualunque località. La variazione temporale della brillantezza è maggiore nelle notti nuvolose rispetto alle notti limpide in tutti i siti con aumento del coefficiente di luminosità da ambiente rurale ad ambiente urbano.

Considerando il contributo lunare, in media la Luna sorge ogni notte 50 minuti più tardi, ma in realtà l'ora in cui sorge varia considerevolmente secondo i mesi. In alcune sere, nel periodo di Luna piena dell'equinozio di autunno (intorno al 23 settembre), la Luna sorge ogni notte con circa 20 minuti di ritardo, perché in quel periodo l'angolo tra l'eclittica e l'orizzonte è minimo. Così abbiamo il chiaro di Luna nelle prime ore della sera per un periodo più lungo del solito.

Il percorso lunare è prossimo all'eclittica (o percorso del Sole), però, mentre il Sole è alto in estate e basso in inverno, la Luna è bassa in estate e alta in inverno. La luminosità del cielo in presenza di Luna cambia in modo considerevole con la distanza angolare della Luna stessa.



### 3. CONTRIBUTI ARTIFICIALI ALLA LUMINOSITA' DEL CIELO NOTTURNO

Le principali sorgenti di inquinamento luminoso sono gli impianti di illuminazione esterna notturna, ma in alcuni casi l'inquinamento luminoso può essere prodotto anche da illuminazione interna che sfugge all'esterno, per esempio l'illuminazione di vetrine.

Le sorgenti principali che possono causare inquinamento sono:

- 1) Impianti di illuminazione stradali;
- 2) Impianti di illuminazione di monumenti, opere, ecc.;
- 3) Impianti di illuminazione di stadi, complessi commerciali, ecc.;
- 4) Fari rotanti;
- 5) Insegne pubbliche e vetrine;
- 6) Traffico automobilistico.

Da tenere presente oltre alla tipologia della lampada anche il contributo dovuto alla riflessione della luce dovuta al suolo. È importante la potenza della lampada: anche se l'impianto è stato realizzato con apparecchi a norma di legge, una sovradimensione della potenza dello stesso incrementerebbe una riflessione verso il cielo della luce emessa.

#### 3.1 Limiti imposti dalla brillantezza del cielo alle osservazioni fotometriche

La luminosità del fondo-cielo influisce su una quantità chiamata *shot noise*. In tutte le misure fisiche la precisione associata alla misura è altrettanto importante che la misura stessa. La precisione è misurata dall'indeterminazione (errore) associata alla misura. La qualità di una misura è definita in termini dell'errore percentuale, ovvero del rapporto tra la precisione e il valore della misura stessa: minore è questo rapporto migliore è la misura. Normalmente si utilizza l'inverso di questa quantità, ovvero il rapporto tra Segnale e Rumore, normalmente scritto S/N. La quantità di cariche è una variabile casuale che dipende dalla corrente media ma con fluttuazioni sopra questa media che sono causa del rumore chiamato shot noise. La statistica degli elettroni generati nel rivelatore segue la distribuzione di Poisson, per cui gode di un'importante proprietà: nella distribuzione di Poisson la varianza ( $\sigma^2 = (x - \mu)^2$ ) è uguale al valor medio ( $\mu$ ) quindi  $\sigma = \sqrt{\mu}$ : il rumore varia con la radice quadrata del segnale. Se  $N_i$  è il numero di elettroni contenuto nell' $i$ -esimo pixel, il segnale ricevuto da una sorgente è:  $S = \sum_{i=1}^n N_i$  in cui  $n$  è il numero di pixel contenuti nell'area circolare. Ma in ogni pixel sono raccolti anche un certo numero di fotoni provenienti dal fondo-cielo che si aggiungono ai fotoni della sorgente. Se  $B$  è il valore medio del

contributo del fondo-ciolo (elettroni/pixel), allora il contributo effettivo della stella al segnale è  $S = \sum_i N_i - nB$ . Se  $N^*$  è il numero totale di fotoni provenienti dalla stella (numero dei conteggi nei pixel nell'area circolare meno il contributo del fondo-ciolo) e  $N_s$  è il valore medio per pixel dei fotoni di fondo-ciolo, i due contributi di "sorgente" al rumore, sono:  $\sigma_{N^*} = \sqrt{N^*}$  e  $\sigma_B = \sqrt{n \cdot N_s}$ . Nel caso ideale, considerando soltanto gli inevitabili contributi statistici della sorgente e del fondo-ciolo, il rapporto S/N, sarebbe dato da:  $S / N = N^* / \sqrt{N^* + n \cdot N_s}$ . Più luminoso è il cielo più aumenta il rumore causato dal fondo. Se a dominare è il contributo del fondo-ciolo si dice che siamo "sky-limited".

Nel caso degli oggetti estesi, ad esempio le galassie, il rapporto tra la loro brillantezza e quella del cielo è costante, e non dipende dal seeing. Costante è perciò anche il rapporto tra il numero di fotoni che arriva dall'oggetto e dal fondo-ciolo. Se la luminosità del cielo cresce, peggiora il rapporto segnale/rumore e si perde accuratezza nella misura. Questo è il caso, ad esempio, delle parti esterne di una galassia.

## 4. STRUTTURA DELL'ATMOSFERA E PROCESSI DI DIFFUSIONE

La parte di atmosfera compresa nei primi 45 km di altezza, che comprende la troposfera e parte della stratosfera è costituita per la maggior parte da azoto e ossigeno (circa 78% e 21% rispettivamente). Sono presenti anche altre componenti come CO<sub>2</sub> e altri gas rari in quantità minime e il cosiddetto aerosol, cioè tutte quelle particelle liquide, solide o miste presenti con concentrazioni decrescenti in funzione dell'altitudine e della distanza dalle zone più densamente abitate; condizioni atmosferiche particolari possono inoltre favorirne una maggiore concentrazione temporanea e locale.

Dette particelle possono avere origine naturale (vulcanica, meteorica...) o essere prodotte dall'uomo (es. risultato di lavorazioni industriali) e fonti di inquinamento atmosferico.

Molecole ed aerosol hanno ruolo fondamentale sulla propagazione della luce in atmosfera essendo responsabili della cosiddetta estinzione, cioè l'attenuazione del flusso luminoso ad opera di fenomeni di diffusione (scattering) e assorbimento.

### 4.1 Scattering di Rayleigh e Mie

Viene indicato con il nome di scattering il processo di deflessione del fascio luminoso causata dalla collisione con molecole o particelle di aerosol. La deflessione avviene in modo casuale e disordinato, a differenza di quanto avviene nei processi di riflessione e diffrazione.

Abbiamo due diversi tipi di scattering: lo scattering di Rayleigh avviene da parte di molecole che hanno dimensioni inferiori a quella della lunghezza d'onda incidente e decresce con la quarta potenza della lunghezza d'onda ( $\propto \lambda^{-4}$ ), lo scattering di Mie avviene da parte di particelle che hanno dimensioni paragonabili o maggiori a quella della lunghezza d'onda incidente e ha una dipendenza complessa dalla lunghezza d'onda, dimensione e natura delle particelle ma, in prima approssimazione, è quasi costante con la lunghezza d'onda ( $\propto \lambda^{-0.8}$ ).

La luce proveniente da una zona di cielo quindi, sarà prodotta dalla somma della luce diffusa dalle molecole e dall'aerosol presenti lungo la linea di vista. Va detto inoltre che una parte di luce incidente su tali particelle proviene direttamente dalla sorgente di inquinamento luminoso (scattering), la parte rimanente invece pur avendo origine dalla stessa sorgente, e già stata diffusa più volte (scattering multiplo) da altre particelle.

## 5. MODELLI PER LO STUDIO DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO

Lo studio dell'inquinamento luminoso riguarda il monitoraggio della variazione nel tempo della componente artificiale della brillantezza di fondo-ciolo. A tal scopo vengono applicati modelli teorici che sono in grado di definire il modo in cui la radiazione originata dai centri abitati si propaghi anche a distanze molto elevate.

Si riassumono, qui di seguito, alcuni dei principali modelli per lo studio dell'inquinamento luminoso:

### 5.1 Modello di Walker

Nel modello di Walker (1977) si assume una relazione inversamente proporzionale tra la brillantezza del cielo dovuta a cause artificiali e la distanza delle fonti di inquinamento stesse.

La formula generale del modello di Walker indica che  $I=CPD^{-2.5}$ , dove I è l'intensità artificiale, P è la popolazione residente in una città presa in considerazione, C è una costante che descrive l'emissione pro-capite della popolazione e la riflettività del suolo e D è la distanza dalla città. La relazione è stata trovata misurando la differenza di brillantezza del cielo a 45° dallo zenith in direzione di una città e nella direzione opposta (in particolare la città americana Salinas, 68600 abitanti).

### 5.2 Modello di Treanor

Nel suo modello, Treanor (1973) considera un'atmosfera omogenea e città puntiformi: l'inquinamento totale è prodotto sia dai raggi provenienti direttamente dalla città sia dalla luce che ha subito scattering. Entrambi i contributi sono soggetti ad una relazione del tipo  $I \propto D^{-2}$ . Il modello di Treanor si riassume nella seguente formula:

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

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; f è una costante che si introduce per tenere in considerazione la luce emessa pro capite dalla popolazione, che dipende dal grado di sviluppo economico della città. Il termine  $U/D^{-2}$  tiene conto dello scattering Rayleigh e il termine  $V/D$  del doppio scattering (Rayleigh e aerosol)

### 5.3 Modello di Garstang

Il modello di Garstang (fig. 5.3.1) considera un'atmosfera non più omogenea la cui densità diminuisce esponenzialmente con l'altezza con una composizione che segue leggi di scala differenti per molecole e aerosol. Considera, inoltre, la città come un'area circolare di raggio R e centrata in C, nel piano orizzontale, illuminata in modo uniforme e situata ad un'altezza H rispetto al livello del mare; l'osservatore posizionato posto in O, ad un'altezza A rispetto al piano della città e a distanza D dal centro della città.

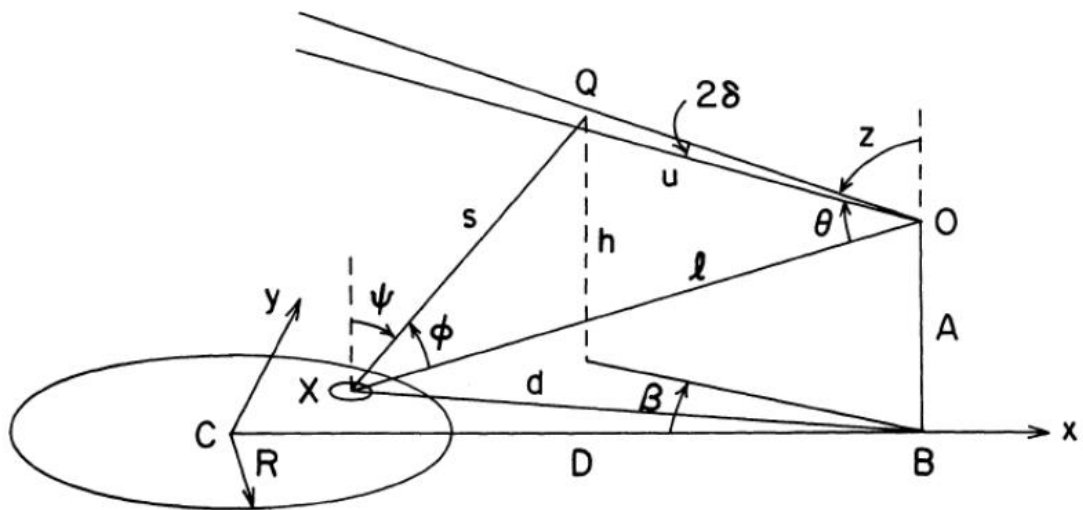


Fig. 5.3.1 Schema dell'impostazione geometrica del modello di Garstang.

La formula che descrive la legge di propagazione dell'inquinamento luminoso secondo il modello di Garstang risulta:

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

Dove P è la popolazione di una città che si trovi a distanza D dall'osservatore, f rappresenta la luce emessa pro capite dalla popolazione, U costante, mentre:

$$DS = 1 + \frac{N_a \sigma_a \{1 - \exp(-a \cdot D \cos z)\}}{a \cdot \cos z}$$

$$\text{con } N_a \sigma_a = 11.778KN_m \sigma_R \exp(-cH)$$

dove z è la distanza zenitale del raggio di luce proveniente dalla città,  $N_a$ ,  $N_m$ ,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_R$  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 della nitidezza dell'atmosfera. (EF) è il coefficiente di estinzione atmosferica calcolato integrando l'estinzione della luce lungo il cammino percorso utilizzando un modello governato da altezze di scala.

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

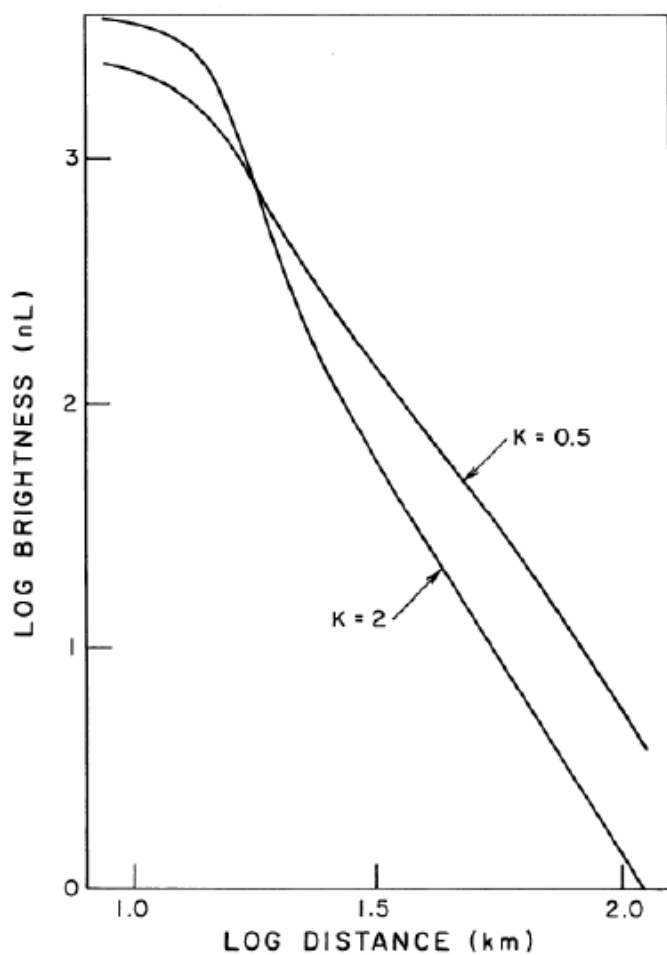


Fig. 5.3.2 (Garstang, 1986) Relazione  
brillanza-distanza.

La brillanza del cielo (in nanolambert)  
allo zenit e riferita alla città di  
Denver, calcolata per L=1500 lumen  
pro capite, senza considerare il  
fondo-cielo naturale.

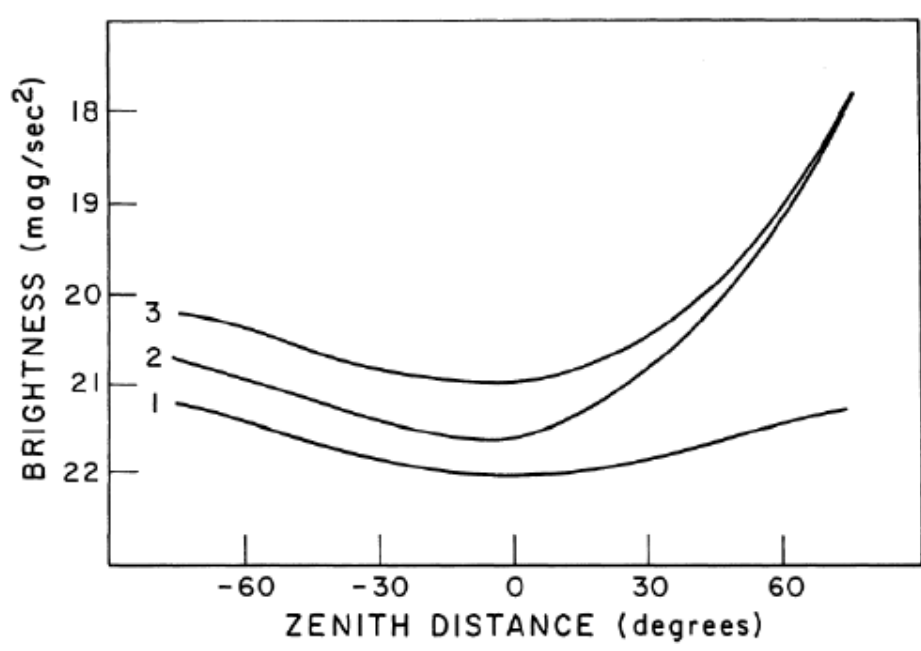


Fig. 5.3.3 (Garstang, 1986) Relazione distanza zenitale – brillanza. Angoli negativi corrispondono ad una  
direzione della linea di vista opposta rispetto al centro città .

La radiazione che raggiunge il cielo è composta in parte dalla luce emessa direttamente dagli apparecchi di illuminazione, in parte dalla luce riflessa dalle superfici illuminate.

Nel modello di Garstang è descritta anche la legge di distribuzione della luce attorno ad una sorgente:

$$I(\varphi) = \frac{1}{2\pi} [2a_1 \cos(\varphi) + 0,554 a_2 \varphi^4]$$

in cui  $I(\varphi)$  è l'intensità luminosa relativa con simmetria di rotazione intorno all'asse verticale e  $\varphi$  l'inclinazione a partire dallo zenit in radianti. Inoltre:

$$a_1 = 0,46 \text{ lm} \quad a_2 = 0,54 \text{ lm}$$

Il primo termine simula le riflessioni diffuse da parte delle superfici illuminate, mentre il secondo rappresenta l'emissione diretta degli apparecchi di illuminazione.

Secondo il modello di Garstang la brillantezza del cielo allo zenit decresce con la distanza in maniera non lineare (fig. 5.3.2, fig. 5.3.3) e l'esponente relativo alla distanza  $D$  diventa più negativo (la luminosità diminuisce sempre più velocemente) al crescere della distanza e per città molto popolate può arrivare anche ad un valore di circa -4 (Tesi Vedovato 2013). L'esponente diventa più negativo anche al crescere dell'aerosol rispetto alle molecole cioè al diminuire della nitidezza dell'aria. L'effetto della foschia e, in generale, l'effetto di un aumento della quantità di aerosol consiste nell'aumentare la brillantezza del cielo allo zenit nelle vicinanze delle sorgenti di inquinamento luminoso effetto dell'aumento della diffusione. Tuttavia la brillantezza decresce in luoghi situati sufficientemente lontano dalle sorgenti per effetto dell'aumento dell'estinzione.

Riportiamo qui di seguito alcune considerazioni sul modello di Garstang dell'emissione luminosa di una città da parte di Soardo.

## 5.4 Modello di Soardo

Soardo propone un nuovo modello, detto "Cavità", apportando una modifica all'equazione di Garstang mediante l'aggiunta di un termine lambertiano:

$$I(\varphi) = \frac{1}{2\pi} [2a_1 + 0,554 a_2 \varphi^4] = \frac{1}{2\pi} [2a_1 \cos(\varphi) + 2a_1 (1 - \cos(\varphi)) + 0,554 a_2 \varphi^4]$$

Il primo termine dentro la parentesi quadra rappresenta le riflessioni diffuse, il secondo e il terzo rappresentano l'emissione diretta verso il cielo degli apparecchi di illuminazione.

Nel modello di Soardo gli edifici e le strade cittadine si comportano come superfici lambertiane cioè la loro brillantezza, causata dall'illuminamento da parte degli impianti di illuminazione, è

indipendente dalla direzione di osservazione, se la superficie è scabra, con irregolarità di dimensioni maggiori della lunghezza d'onda incidente. L'energia ricevuta invece varia con l'angolo e diminuisce ad angoli piccoli.

Secondo il modello di Soardo il maggior contributo luminoso alla brillantezza del cielo notturno è dato dalla componente della luce diffusa dalle superfici poiché gli apparecchi vengono schermati dagli edifici presenti nella città.

Nelle sue conclusioni Soardo afferma che "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" (fig. 5.4.1).

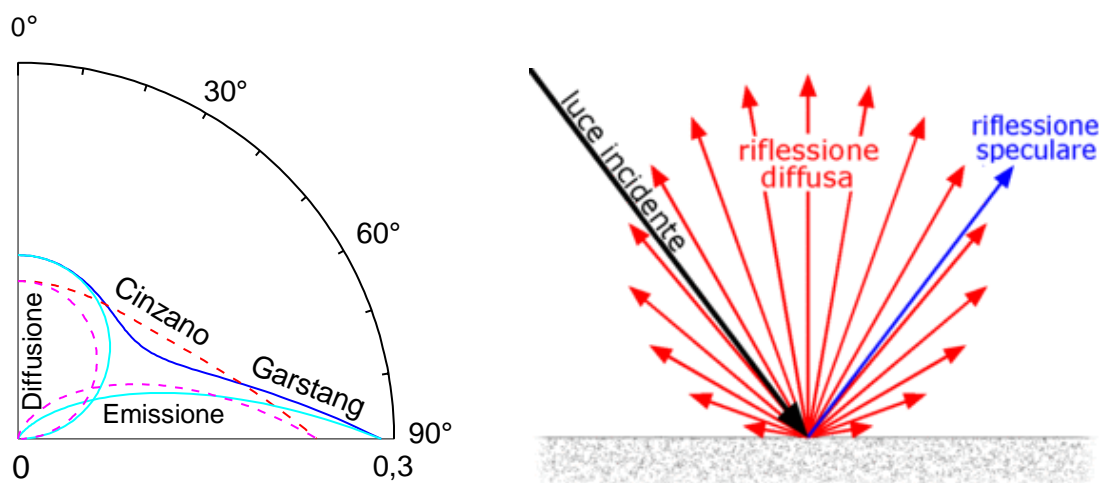


Fig. 5.4.1 A sinistra, ripartizioni relative dell'intensità luminosa di una città secondo Garstang (linee continue) e Cinzano (linee tratteggiate) e loro componenti diffusa ed emissiva, a destra distribuzione della luce riflessa da parte di superfici lambertiane.

In risposta alla proposta di Soardo, Cinzano (comunicazione privata) scrive un rapporto in cui spiega come gli apparecchi luminosi vengono schermati dagli edifici cittadini solo in limitatissimi casi 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 (es. strade con una larghezza minore di 10 metri e edifici più alti di 4-5 piani), ma 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 posizioni sopraelevate mostrano per di 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°)

Cinzano conclude sostenendo che le emissioni che contribuiscono maggiormente ad aumentare la luminosità del cielo notturno sono quelle che provengono direttamente dagli apparecchi, cioè quelle emesse a bassi angoli sopra l'orizzonte (fig. 5.4.2).



Fig. 5.4.2 Esempio di città illuminata vista dall'alto.

Si riporta un interessante grafico (fig. 5.4.3) presente in un articolo di M. Aubé (2015) sulla propagazione dell'inquinamento luminoso in presenza di ostacoli: la diffusione della luce dipende dalla presenza di ostacoli più alti degli impianti di illuminazione. Si nota come per ostacoli bassi di circa 7 metri l'andamento del contributo dello scattering è praticamente uguale al contributo in assenza di ostacoli. Il contributo diminuisce notevolmente per altezze maggiori (nel grafico riportato un esempio di ostacolo alto 10 metri).

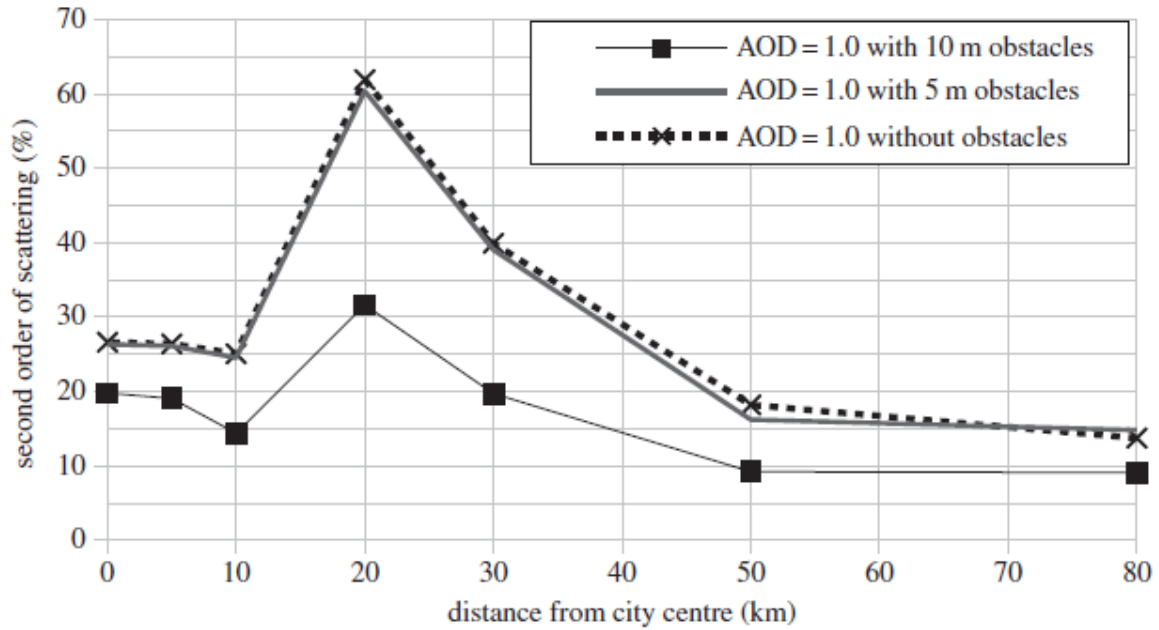


Fig. 5.4.3 Contributo dello scattering in funzione della distanza dal centro città con AOD=1 (Aerosol Optical Depth), cioè atmosfera inquinata. M. Aubé – *Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment*.

Sicuramente la presenza di edifici alti, soprattutto nelle grandi città, influenza quella che è la diffusione della luce proveniente dagli impianti pubblici e da installazioni private. La distribuzione della luminosità può dipendere sia dall'altezza di osservazione sia dalla presenza di colline o montagne attorno alla città. Se osservassimo a basse quote, coperti per esempio da montagne oltre le quali è presente una cittadina, noteremmo il bagliore diffuso senza riuscire a distinguere i singoli apparecchi ma se osservassimo da quote sufficientemente alte da oltrepassare gli ostacoli, potrebbero diventare visibili le singole sorgenti artificiali, soprattutto quelle che non rispettano ancora le norme sulla schermatura al di sopra di un certo angolo di emissione.

Le superfici illuminate possono contribuire in maniera variabile alla luminosità che raggiunge il cielo, e questo dipende anche dalle proprietà dei diversi materiali che vengono investiti dalla luce e dalla loro capacità di riflettere.

## 6. STRUMENTAZIONE

I dati a disposizione utilizzati in questo lavoro di tesi derivano dalle misurazioni effettuate tramite lo strumento “Sky Quality Meter” (in seguito indicato come SQM), un misuratore della luminosità del cielo posizionato a Cima Ekar, a sud-est della città di Asiago, sull’Altopiano dei Sette Comuni. I dati analizzati si riferiscono al periodo dal 6 maggio 2011 al 31 agosto 2015.

Il valore della luminosità o brillantezza del cielo è espresso in magnitudini per arcosecondo quadrato ( $\text{mag}/\text{arcsec}^2$ ). La precisione fornita dall'apparecchio è di circa  $\pm 0.10 \text{ mag}/\text{arcsec}^2$  (tesi Vedovato 2013).



Fig. 6.1: a sinistra un esempio di SQM, a destra il posizionamento nella cupola della all-sky camera (tesi Vedovato 2013).

L’SQM è composto da un fotodiodo di silicio (TAOS TSL237S) in grado di misurare la brillantezza media in un’area di cielo definita. L’SQM di Cima Ekar campiona la luminosità del cielo allo zenit ad intervalli di 5 minuti. La risposta del fotodiodo alla luce è limitata all’intervallo di lunghezza d’onda compreso tra i 320 e i 1050 nm con un picco a 680 nm. Al fotodiodo si aggiunge poi un filtro di tipo HOYA CM500 in grado di restringere l’intervallo di sensibilità a 320-720nm in modo da poter equiparare meglio la risposta dello strumento alla visione umana notturna. Grazie ad un sensore interno, l’SQM è in grado apportare automaticamente le correzioni alle misure dovute alla, seppur lieve, dipendenza dalla temperatura.

L’SQM di Cima Ekar si trova all’interno di una cupola trasparente insieme ad una allsky-camera (fig. 6.1). La finestra ottica è in acrilico (plexiglass), inizialmente scelta per il monitoraggio dell’emissione ionosferica (esperimento di Boston). Le ditte forniscono come prodotto standard, finestre ottiche in vetro. Il plexiglass è caratterizzato dalla maggior trasparenza (coefficiente 0,93)

in confronto al policarbonato (0,80-0,90) e al vetro (0,86). Per quanto riguarda la resistenza, intesa come resistenza agli urti e al peso, il policarbonato risulta migliore del plexiglass che potrebbe indurirsi e creparsi col tempo, e necessita di una buona manutenzione e pulizia, anche perché è facile da rigare. Il policarbonato è la materia plastica più resistente a graffi e urti, oltre ad avere un'elasticità superiore alle altre materie plastiche. Policarbonato e acrilico tendono ad ingiallire a causa dei raggi UV ma esistono trattamenti specifici per rendere più resistenti questi materiali.

## 6.1 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) dimostrano che la curva di risposta dell'SQM non corrisponde con nessuna delle curve di sistemi fotometrici standard. È 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 e riportata in figura 6.1.1 .

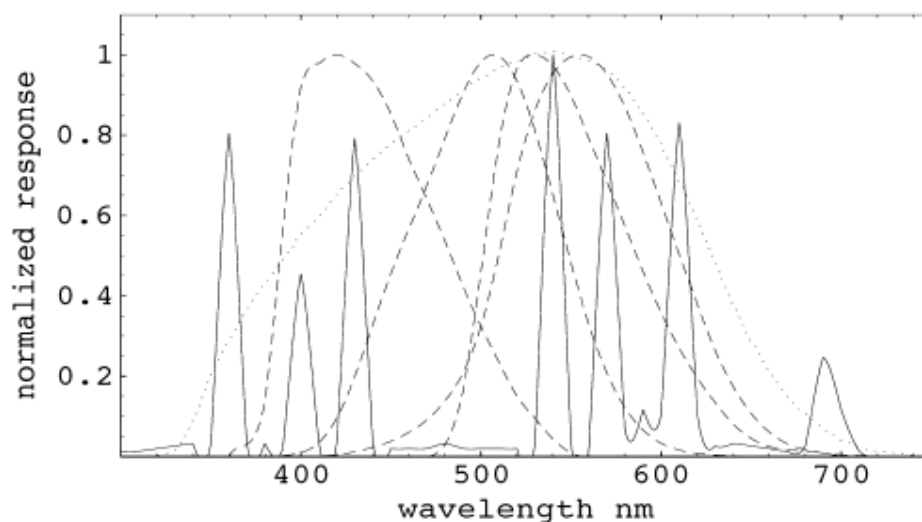


Fig. 6.1.1 Risposta spettrale normalizzata dell'SQM (linea punteggiata) a confronto con la risposta della banda passante B-Johnson, CIE scotopica, V-Johnson e CIE fotopica (linee tratteggiate rispettivamente da sinistra a destra). Spettro di emissione di una lampada ad alta pressione di sodio (linea continua) (Cinzano).

I coefficienti di conversione rispetto alla banda fotometrica V-Johnson per sorgenti tipiche in ambito di luce artificiale, espressi in mag/arcsec<sup>2</sup> sono:

Lampada a vapori di Mercurio +0,59

Lampada al Sodio ad alta pressione+0,48

Cielo naturale +0,54

Cielo inquinato +0,56

Per ridurre al minimo questi coefficienti, sono stati identificati dei filtri opportuni, applicabili all'SQM, ma non attualmente installati sullo strumento. La calibrazione con sorgenti di diverso colore dà circa  $SQM-V \approx 0,25(B-V) - 0,26$ . In generale per riportarsi al sistema fotometrico UBVJohnson, per osservazioni allo zenit, con strumento standard (senza filtri aggiunti) sarà necessario apportare alle misure una correzione pari a  $0-0,30$  mag/arcsec<sup>2</sup> (Cinzano 2005).

## 7. ANALISI DELLE CURVE DI BRILLANZA

La prima parte dell'elaborazione dei dati dell'SQM di Cima Ekar a disposizione consiste nell'analizzare alcune curve di brillantezza del cielo notturno, create prendendo in considerazione notti fotometriche che permettono di osservare chiaramente l'andamento della curve (andamento delle magnitudini durante la serata/notte) e studiarne caratteristiche salienti quali crescita/decrecenza e valori della pendenza.

Ci si aspetta che la luminosità del cielo notturno sia per lo più costante (salvo le variazioni di luminosità dovute a fenomeni naturali quali, per esempio, la presenza della Via Lattea), quindi variazioni notevoli (es.  $\Delta\text{mag} > 0,3 \text{ mag/arcsec}^2$ ) sono riconducibili ad altri fattori come, per esempio, nuvole.

Ho selezionato notti il più vicino possibile alle notti di Luna nuova (nuvolosità permettendo) per evitare il contributo che la luce lunare dà al cielo notturno.

Mettendo a confronto le curve rappresentative di alcune serate (in particolare in primavera, autunno e inverno) dal 2011 al 2014 è possibile iniziare a trarre alcune conclusioni sulle cause che influenzano le curve di brillantezza e sui fattori che possono variare la pendenza delle curve (da fig. 7.1 a fig. 7.5).

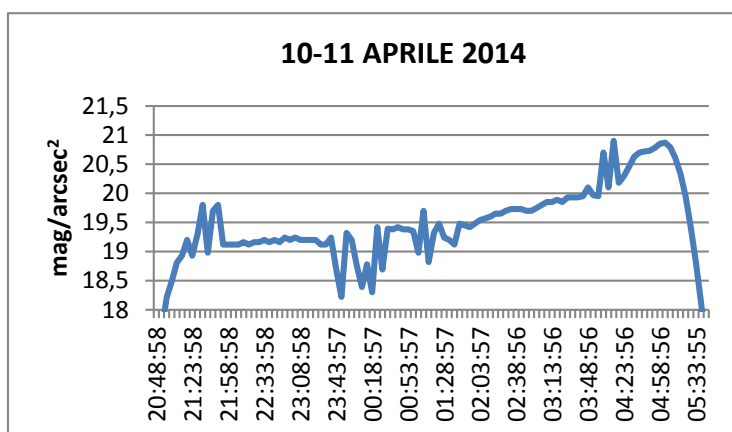


Fig. 7.1: Esempio di notte non fotometrica, con  $\Delta\text{mag} > 0,5 \text{ mag/arcsec}^2$  che fa pensare ad una serata/notte particolarmente nuvolosa.

Riporto qui di seguito alcuni esempi di notti fotometriche, utilizzabili ai fini delle analisi.

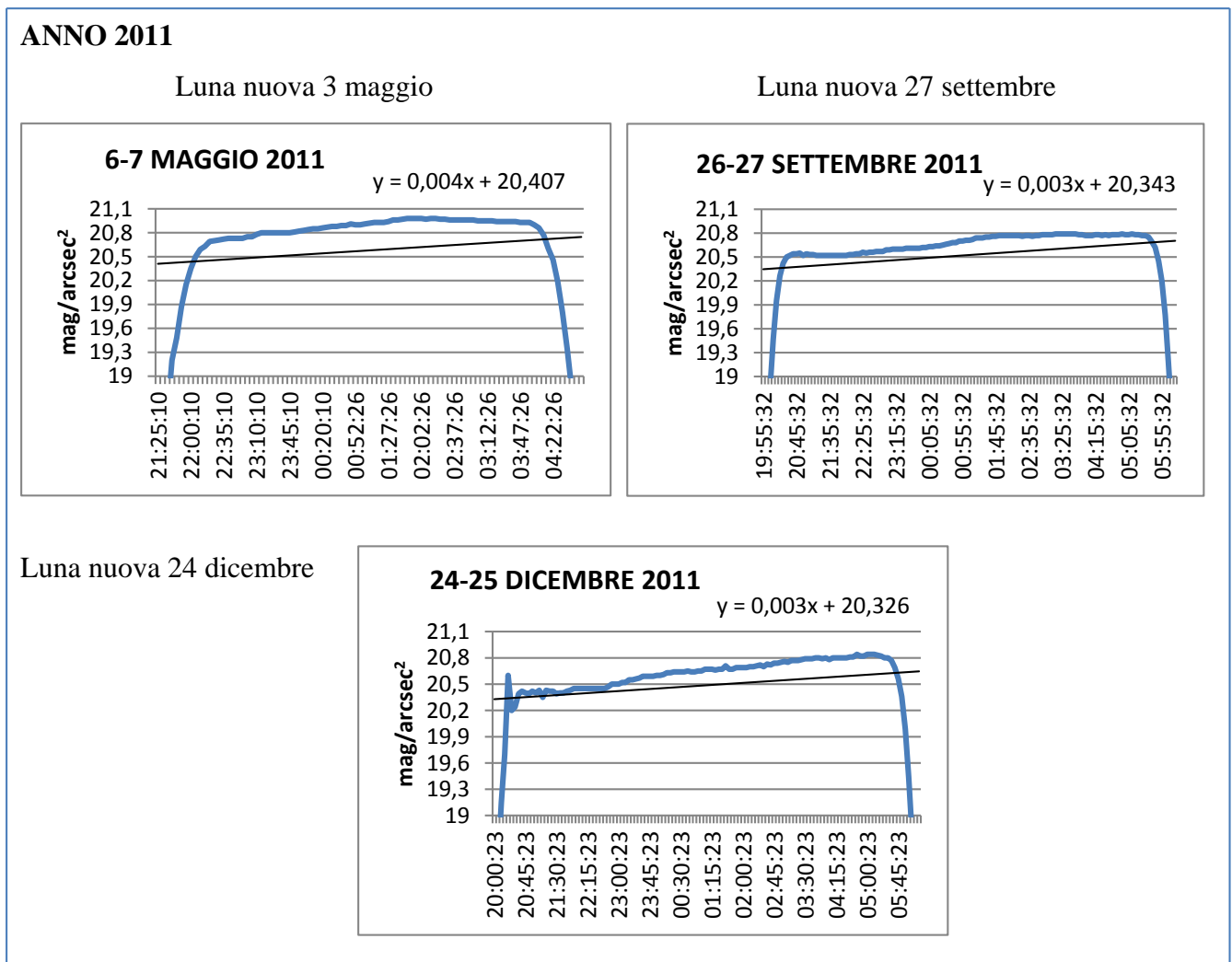
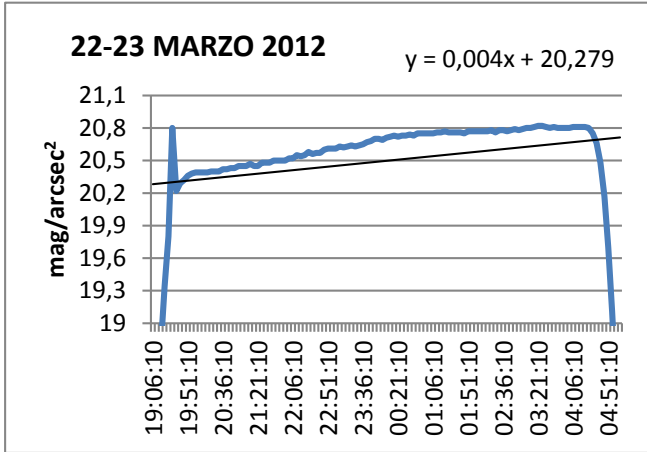


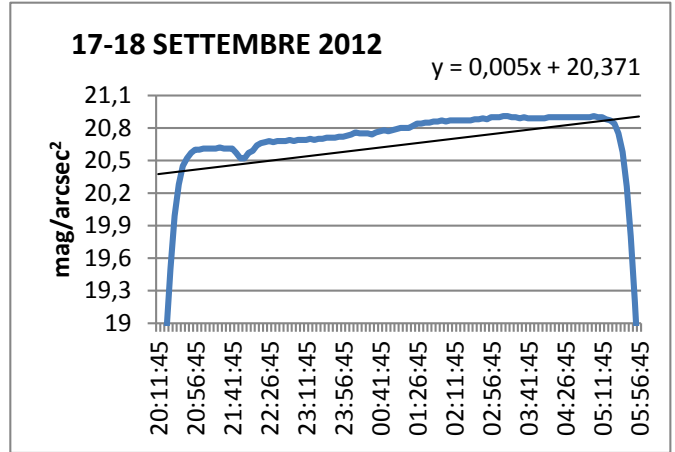
Fig. 7.2: Curve di brillantezza 2011.

**ANNO 2012**

Luna nuova 22 marzo



Luna nuova 16 settembre



Luna nuova 13 dicembre

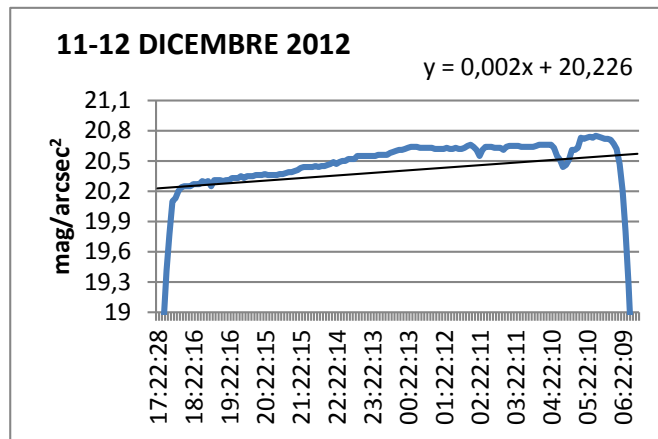


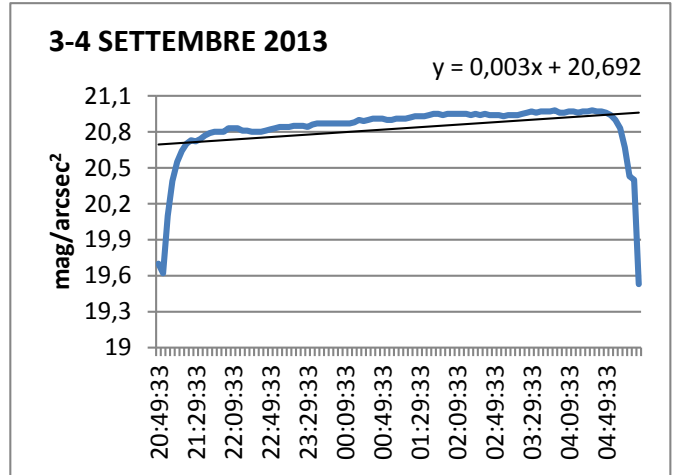
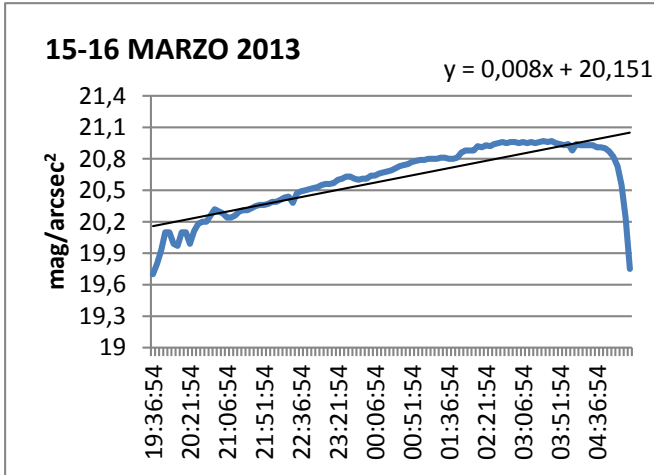
Fig. 7.3: Curve di brillantezza 2012.



**ANNO 2013**

Luna nuova 11 marzo

Luna nuova 5 settembre



Luna nuova 3 dicembre

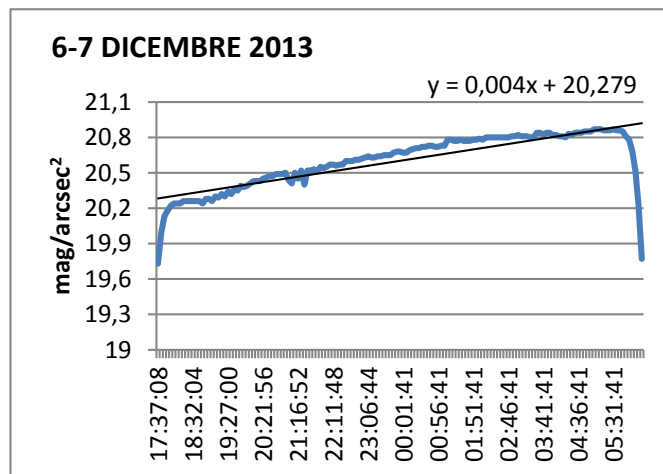
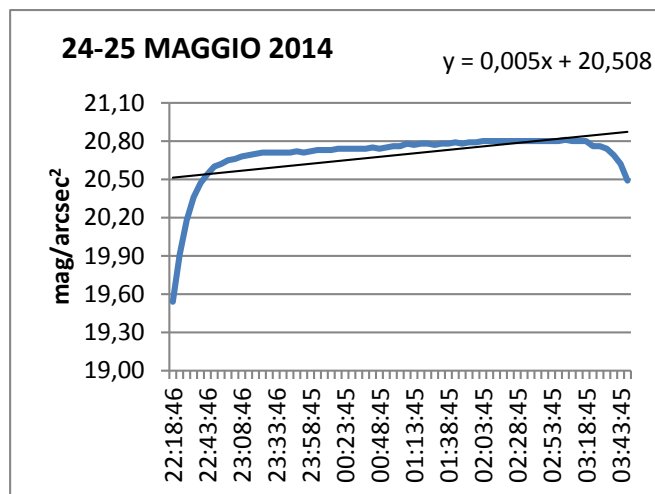


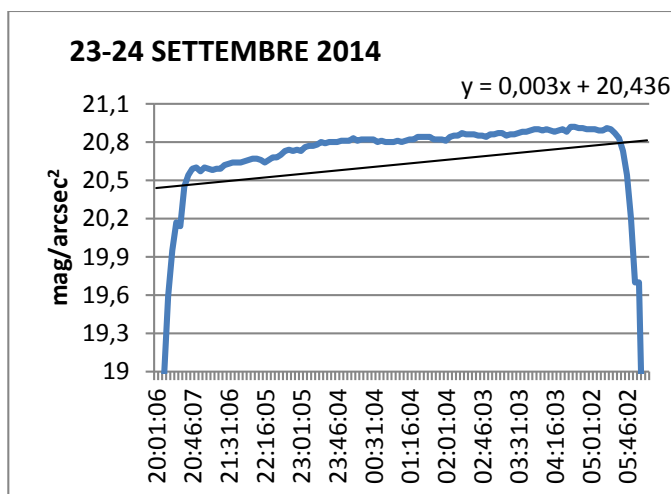
Fig. 7.4: Curve di brillantezza 2013.

## ANNO 2014

Luna nuova 28 maggio



Luna nuova 24 settembre



Luna nuova 22 dicembre

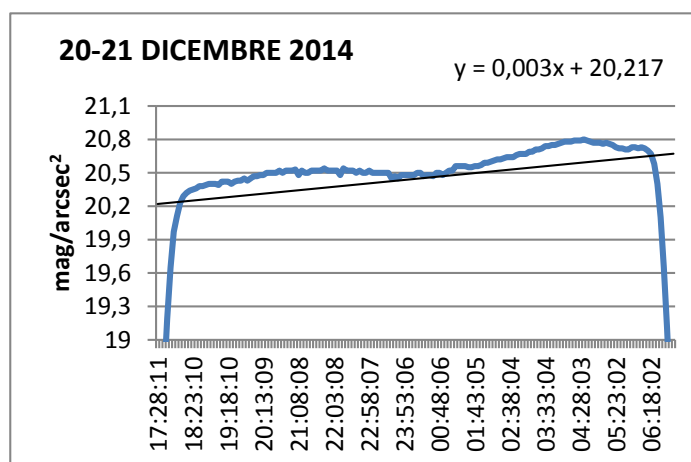


Fig. 7.5: curve di brillantezza 2014.

Non è stato immediato trovare curve di brillantezza che avessero andamenti regolari, perché la maggior parte sono irregolari. Questo fa capire come sia delicato affrontare un'analisi della brillantezza del cielo notturno, poiché sono tante le variabili che possono intervenire durante la notte oltre alla presenza di nubi o Via Lattea. Per un'analisi approfondita, non sono da sottovalutare eventi climatici quali cambio di direzione e velocità del vento, temperatura esterna, (e dello strumento), umidità, pressione, poiché la brillantezza del cielo è causata da scattering che a sua volta è strettamente connesso alle variabili citate che, però, in questo lavoro di tesi non sono state esaminate ai fini di una prima analisi preliminare dell'inquinamento luminoso. Osservando il comportamento delle curve si può ipotizzare quanto sia l'influenza del fattore naturale rispetto

all'inquinamento luminoso, soprattutto se le maggiori variazioni in magnitudine avvengono intorno agli stessi orari, ogni sera, con regolarità.

Nelle figure si nota come le curve siano crescenti e come, in media dopo le ore 22:30, si arrivino a toccare i valori più alti di magnitudine (cioè valori più bui del cielo). Questo comportamento fa pensare che nelle cause della diminuzione della luminosità del cielo sia presente anche lo spegnimento delle luci private, delle insegne e vetrine di locali.

I valori della magnitudine variano da circa 20,50 a 21 mag/arcsec<sup>2</sup> durante la serata/notte, con andamento crescente.

In alcune curve (maggio 2011, settembre 2011) si percepisce una lieve decrescita nelle ore finali della notte, questo potrebbe essere causato dal contributo di oggetti celesti, particolare intensità della luce zodiacale o fenomeni atmosferici.

Per le notti prese in considerazione del 2011, 2012 e 2014 la pendenza delle notti primaverili è maggiore della pendenza delle notti invernali, questo potrebbe essere spiegato dal fatto che le notti primaverili sono più brevi quindi si risente maggiormente della variazione di magnitudine a causa del minor intervallo di dati rispetto a quelli invernali.

Un controllo interessante può essere fatto sovrapponendo curve di brillantezza della stessa serata del mese (o comunque di serate vicine) dei vari anni, perché questo ci permette di vedere se ci sono cambiamenti nelle intensità o nelle inclinazioni delle curve di brillantezza e quindi riuscire a farsi una prima idea generale sull'andamento dell'inquinamento luminoso.

Di seguito (fig. 7.6) riporto il grafico in cui appaiono sovrapposte le curve di brillantezza delle serate del mese di settembre degli anni presi in considerazione.

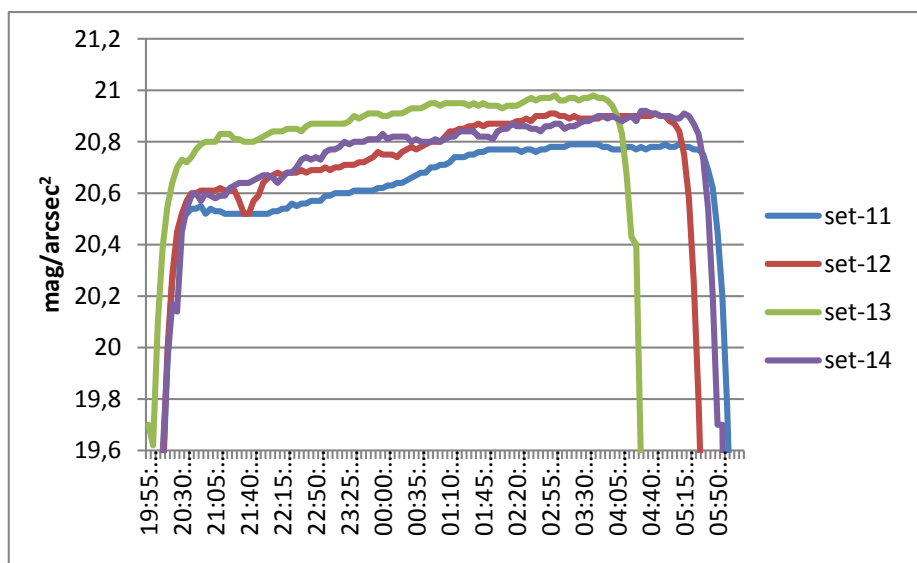


Fig. 7.6: curve di brillantezza settembre 2011-2014 sovrapposte.

Le curve mostrano un andamento simile. Il 2013 mostra una serata più buia delle altre ma le variazioni in magnitudine vanno da circa  $0,10 \text{ mag/arcsec}^2$  a  $0,20 \text{ mag/arcsec}^2$ . Osservando il mese di settembre, quindi, non si registrano particolari aumenti o diminuzioni della luminosità del cielo.

## 8. ANALISI DEGLI ISTOGRAMMI MENSILI

La seconda parte dell'elaborazione dei dati dell'SQM di Cima Ekar consiste nell'analisi degli istogrammi mensili, di ogni anno, e nell'individuazione del picco di magnitudine (quindi del valore modale dei dati).

Per l'analisi dei dati ho creato, mese per mese, dal maggio 2011 all'agosto 2015, un istogramma con le magnitudini registrate e la relativa frequenza con cui si sono verificate durante la serata/notte. Per ogni istogramma ho registrato il picco relativo alla magnitudine che si è ripetuta il maggior numero di volte durante il mese, considerando tutte le magnitudini nell'intervallo tra 19,50 mag/arcsec<sup>2</sup> e 21,50 mag/arcsec<sup>2</sup>, corrispondenti a valori di notti di Luna nuova.

Per far questo ho utilizzato un'utile tabella (fig. 8.1) creata dalla Dott. Anna Vedovato (Dipartimento di Fisica e Astronomia – Università di Padova) che, nel suo lavoro di tesi (anno accademico 2012-2013), ha calcolato le magnitudini medie caratterizzanti le notti di Luna piena, primo quarto, ultimo quarto e Luna nuova che riportiamo qui di seguito:

Asiago (Magnitude per Square Arcseconds)			
Luna nuova	ore 24.00 UT+1		20,69 ± 0,1
	picco istogramma mensile		20,70, $\sigma$ =0,13
	correzione per luce galattica		20,94
Luna piena	ore 24.00 UT+1	distanza zenit tra 67° e 71°	17,02
		distanza zenit tra 26° e 30°	18,73
Primo quarto	Vedere descrizione delle curve al paragrafo 13.1		Impossibile definire un valore univoco
Ultimo quarto	Vedere descrizione delle curve al paragrafo 13.2		

Fig. 8.1 Valori delle magnitudini ottenuti per le diverse fasi lunari nel cielo notturno di Asiago.

Successivamente, per ogni anno, ho creato un grafico con i valori dei picchi mensili degli istogrammi, per poter avere un'idea grafica più chiara dell'andamento della magnitudine di picco durante l'anno.

Mostro qui di seguito alcuni esempi di istogrammi mensili rappresentativi e gli andamenti annuali della magnitudine di picco:

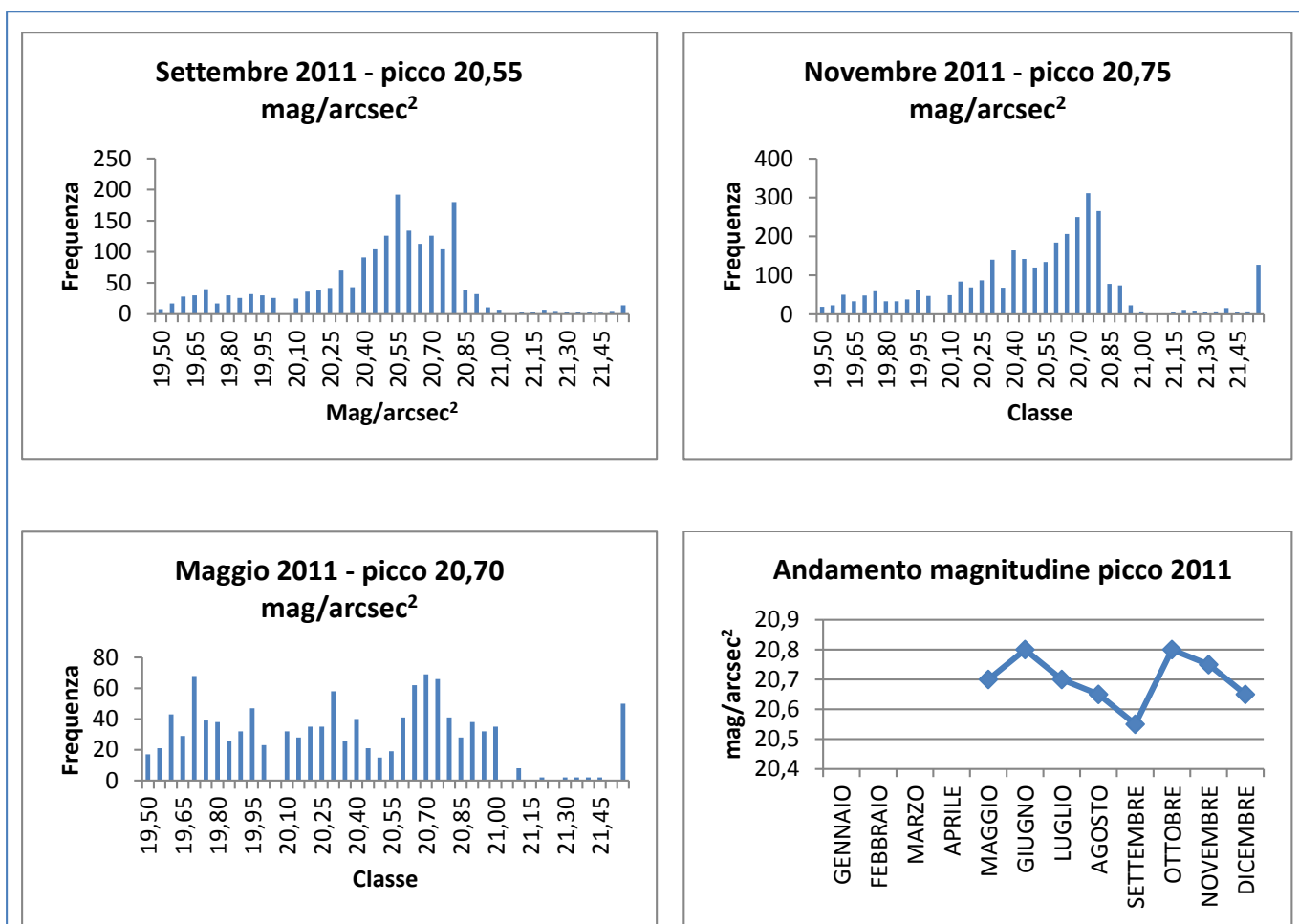


Fig. 8.2: istogrammi mensili e andamento annuale 2011.

Settembre 2011 e novembre 2011 sono esempi di istogrammi che descrivono bene l'andamento della magnitudine perché abbiamo dei picchi ben definiti. Anche gli altri istogrammi del 2011 si sono rivelati buoni ai fini delle analisi di luminosità. Solo i mesi di maggio 2011 e giugno 2011 hanno mostrato una certa dispersione dei valori della magnitudine, e questo può essere causato dalla presenza di poche notti fotometriche (fig. 8.2).

Il 2011 ha dati parziali (da maggio a dicembre) e la magnitudine di picco media 2011 relativa a questi mesi è di 20,67 mag/arcsec<sup>2</sup>.

Per quanto riguarda 2012, 2013, 2014 e 2015 si ha (fig. 8.3):

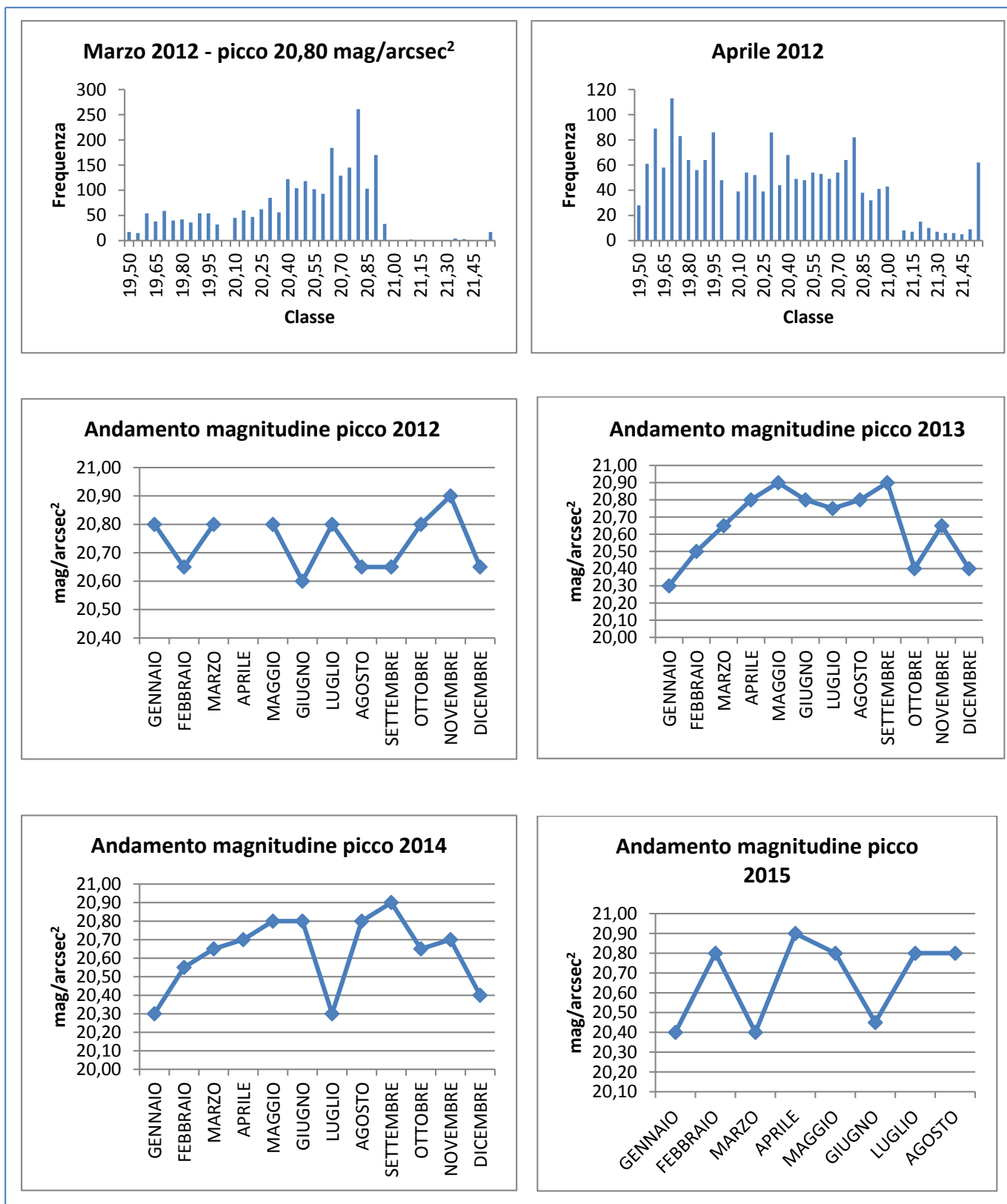


Fig. 8.3: istogrammi mensili e andamento annuale 2012, 2013, 2014, 2015.

Aprile 2012 non è stato un buon mese per questo tipo di analisi poiché le notti fotometriche a disposizione erano molto poche. La magnitudine di picco media del 2012 è 20,74 mag/arcsec<sup>2</sup>, del 2013 è 20,65 mag/arcsec<sup>2</sup>, del 2014 è 20,63 mag/arcsec<sup>2</sup>.

Anche il 2015 ha dati parziali (da gennaio ad agosto) e la magnitudine di picco media relativa a questi mesi è di 20,67 mag/arcsec<sup>2</sup>.

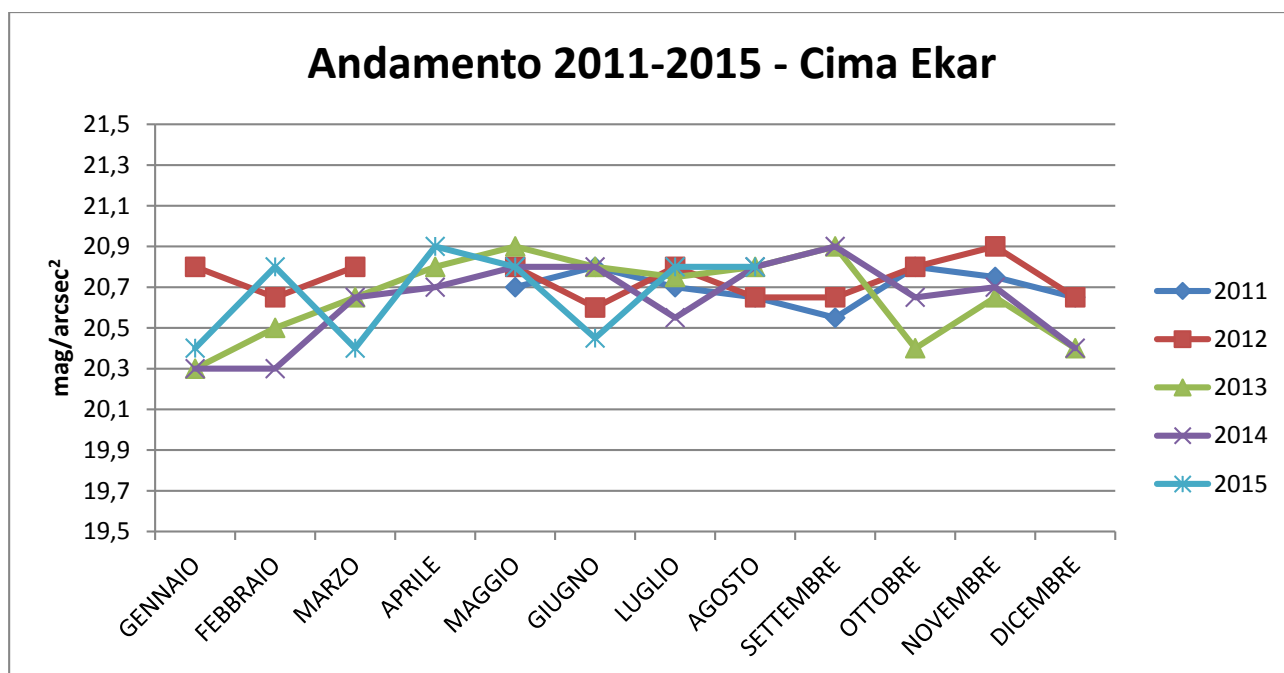


Fig. 8.4: grafico totale delle magnitudini di picco degli anni messi insieme.

L'andamento della luminosità del cielo notturno dal 2011 al 2015 sembra rimanere costante (fig. 8.4), attorno ad un valore medio di 20,68 mag/arcsec<sup>2</sup>. Nella media è considerato anche l'anno 2014 che è stato un anno particolarmente piovoso e che quindi tende a diminuire, nell'ordine del centesimo, il valore della magnitudine media. Nel grafico si nota una certa stagionalità: i mesi invernali dicembre, gennaio e febbraio appaiono più luminosi rispetto agli altri.

Riporto la tabella riassuntiva delle magnitudini medie di ogni anno (tab. 8.1), relative ai dati dell'SQM di Cima Ekar:

ANNO	MAGNITUDINE MEDIA
2011	20,67 mag/arcsec <sup>2</sup>
2012	20,74 mag/arcsec <sup>2</sup>
2013	20,65 mag/arcsec <sup>2</sup>
2014	20,63 mag/arcsec <sup>2</sup>
2015	20,67 mag/arcsec <sup>2</sup>

Tab. 8.1: magnitudini medie mensili Cima Ekar.



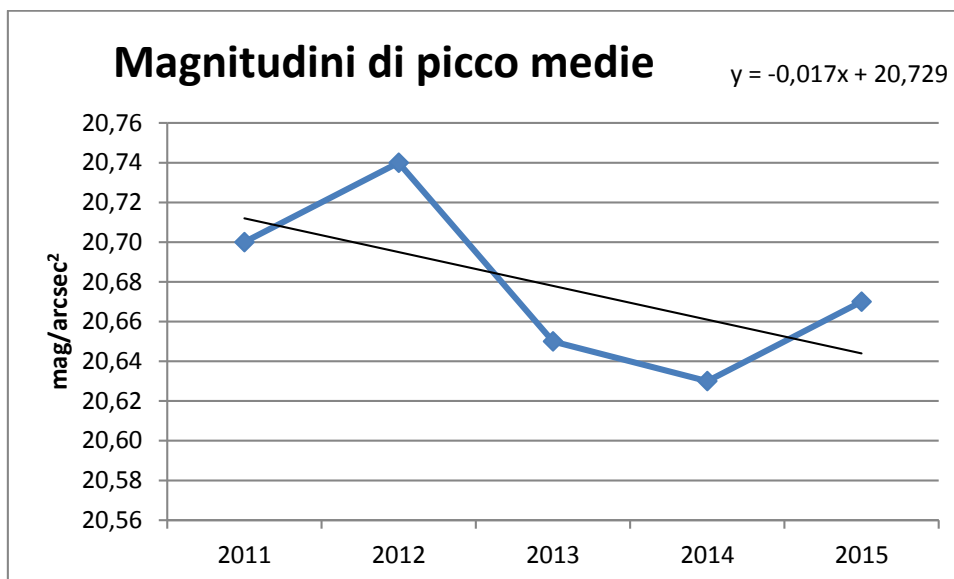


Fig. 8.5: andamento delle magnitudini Cima Ekar.

Purtroppo si nota (fig. 8.5) una lieve diminuzione della magnitudine, dell'ordine del centesimo, ma che fa pensare ad un graduale aumento della luminosità del cielo.

## 8.1 Cima Ekar - Nove a confronto

Oltre ai dati dell'SQM di Cima Ekar, ho a disposizione i dati dell'SQM dell'Osservatorio Astronomico di Nove (VI), dal 2011 al 2015, ottenuti dalla rete CORDILIT. Anche di questi dati, ho analizzato gli istogrammi mensili e ho confrontato l'andamento delle magnitudini di picco di Nove e Cima Ekar. Il confronto è interessante sia per capire se l'inquinamento luminoso varia spostandoci di sito, sia per vedere come l'altitudine dei siti di osservazione influisce sull'andamento della brillantezza del cielo. Cima Ekar si trova a 1366 m s.l.m., Nove a 77 m s.l.m.

Riporto i valori di picco mensili dei due siti, e l'andamento a confronto delle magnitudini, con le medie annuali.

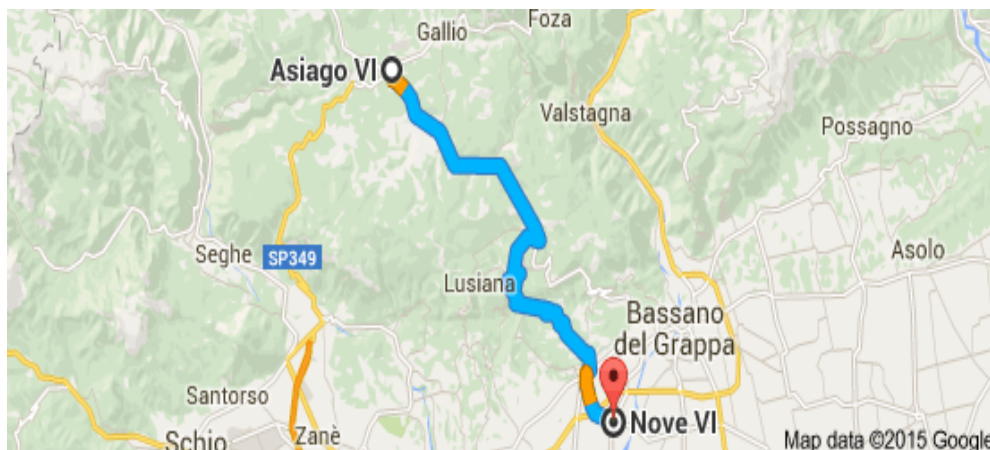


Fig. 8.1.1: posizione geografica di Nove (VI) e Asiago (VI)

Anche per i dati di Nove, mese per mese, ho creato l'istogramma che mostra con che frequenza si presenta ogni magnitudine. Ho considerato il picco di magnitudine, in un intervallo che va da 18,50 mag/arcsec<sup>2</sup> a 21,50 mag/arcsec<sup>2</sup>. Ho aumentato l'intervallo dei valori di magnitudine da considerare perché da una prima analisi, osservando i dati, è già chiaro come il cielo da Nove appaia più luminoso. Nei valori dell'SQM di Nove si nota come i valori tra 18-19 mag/arcsec<sup>2</sup> siano prevalenti rispetto a quelli tra 20-21 mag/arcsec<sup>2</sup>, che invece prevalgono nel caso precedente di Cima Ekar. Per ogni anno ho registrato i picchi mensili e ne ho calcolato le medie annuali. Di seguito riporto i valori, a confronto, di Cima Ekar e Nove e i grafici con l'andamento annuale dei picchi di magnitudine. I mesi che non riporto nelle tabelle e nei grafici sono mesi che hanno mostrato dispersione negli istogrammi.

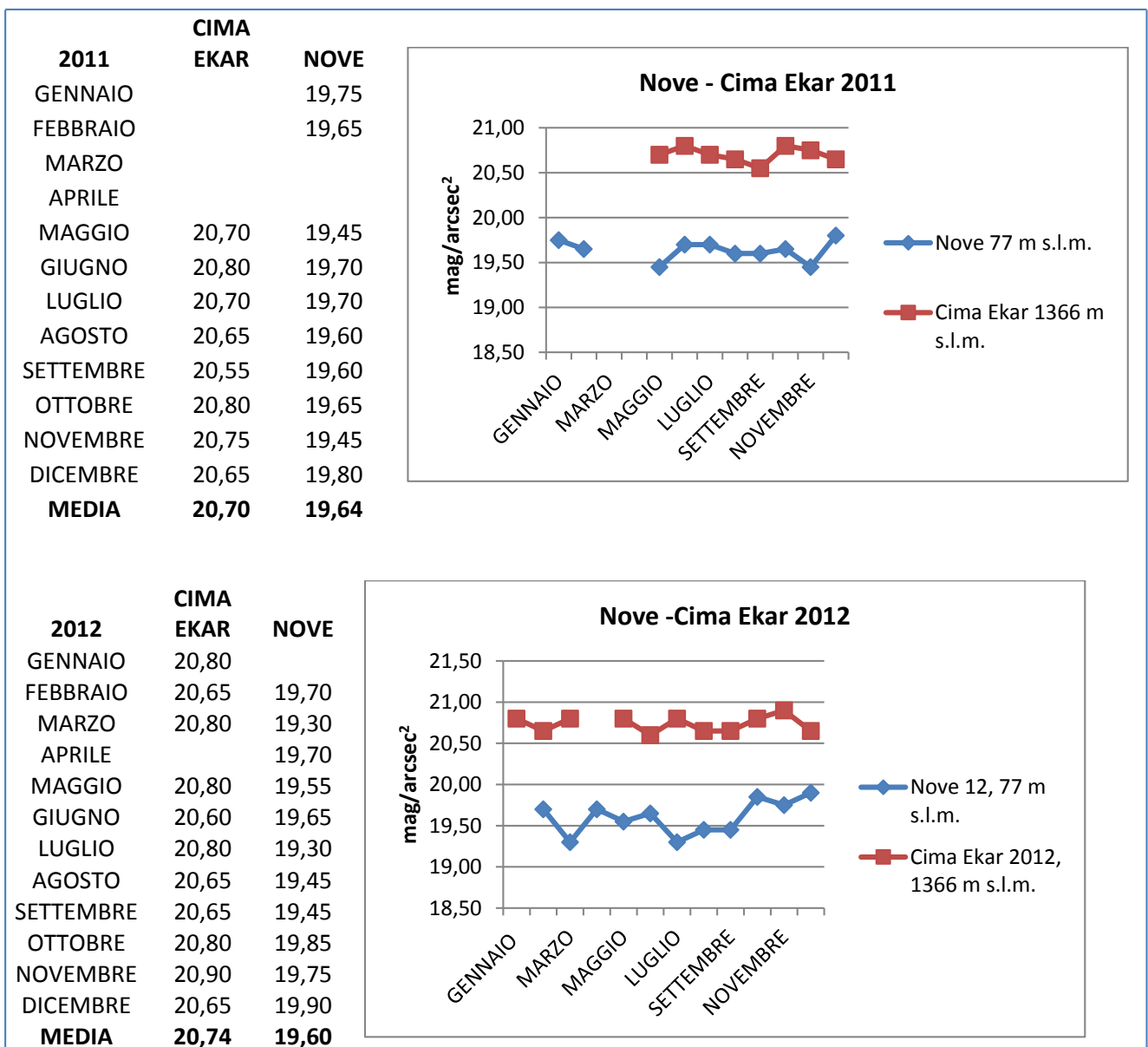


Fig. 8.1.2: andamenti Nove-Cima Ekar 2011-2012.

Innanzitutto si osserva come le magnitudini medie di Cima Ekar e di Nove differiscano per un  $\Delta mag > 1 \text{ mag/arcsec}^2$  (fig. 8.1.2).

Per il 2011, l'andamento delle magnitudini di picco di Nove è compatibile con quello di Cima Ekar. Fatta eccezione per il mese di dicembre 2011 che invece viene registrato dai due osservatori, rispetto al mese precedente, più luminoso per Cima Ekar, più buio per Nove.

Per quanto riguarda il 2012, l'andamento è quasi anticorrelato per l'intero anno. L'andamento delle magnitudini mensili dei due siti è opposto (dove Cima Ekar ha andamento crescente, Nove ha andamento decrescente e viceversa). La causa può essere la presenza di foschia a bassa quota, che riflette e diffonde maggiormente la luce proveniente dalla città (di Nove in questo caso) e che, nello stesso tempo, "scherma" le parti superiori dell'atmosfera e evita che questa contribuisca alla luminosità del cielo ad altitudini maggiori.

Per il futuro, è interessante approfondire il ruolo che la foschia a bassa quota ha nella diffusione dell'inquinamento luminoso, per poter creare dei modelli sempre più dettagliati che permettano di capire il comportamento della luce nell'atmosfera.

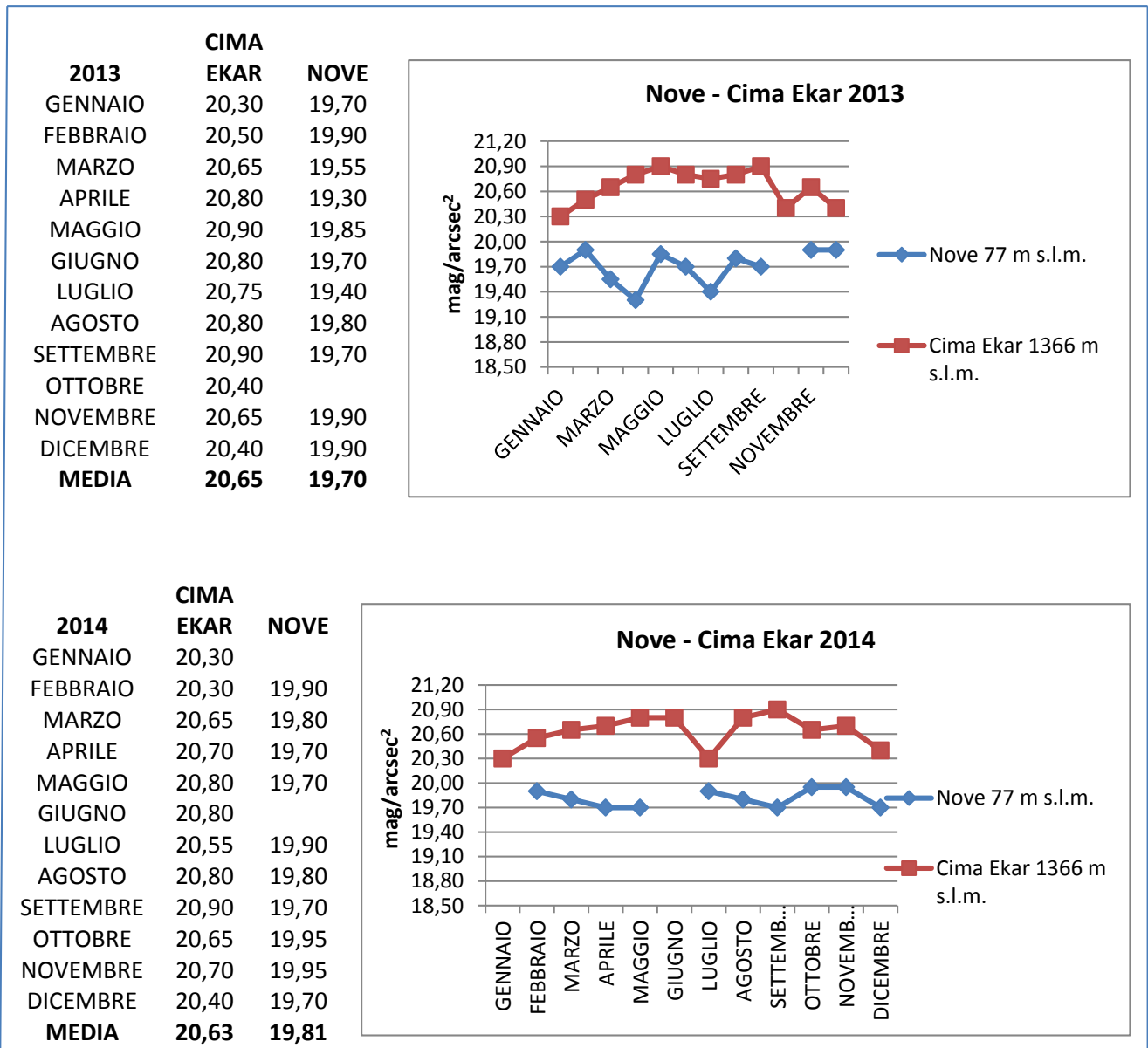


Fig. 8.1.3: andamenti Nove-Cima Ekar 2013-2014.

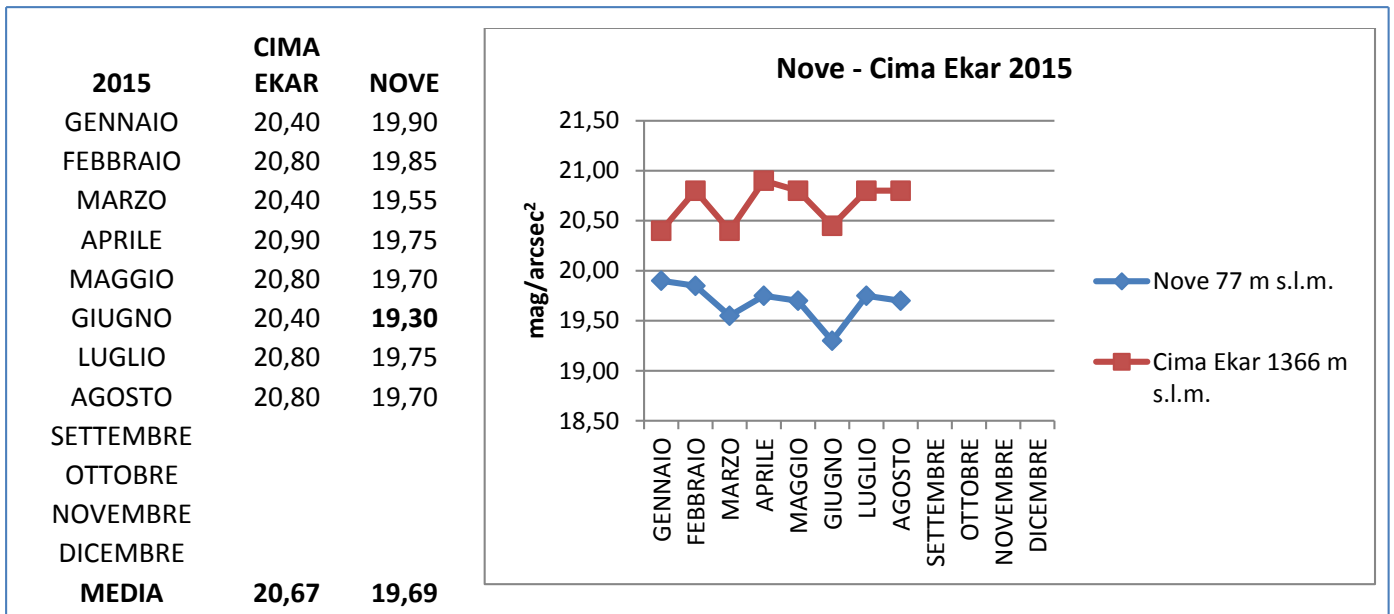


Fig. 8.1.4: andamenti Nove-Cima Ekar 2015.

Per l'anno 2013 non c'è evidenza di correlazione tra i due siti (fig. 8.1.3). L'anno 2014 di Cima Ekar non è compatibile con Nove, tuttavia a partire da ottobre 2014 e per tutto il 2015 (che ha dati parziali) da gennaio ad agosto, il confronto mostra invece una buona correlazione (fig. 8.1.4).

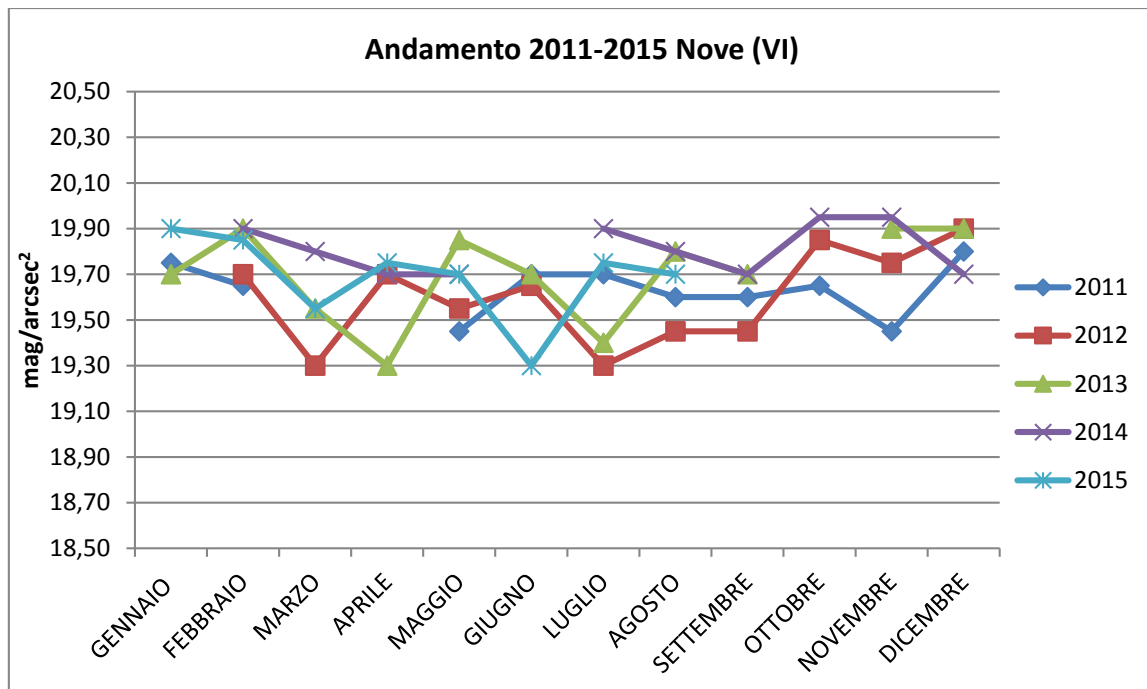


Fig. 8.1.5: Grafico totale dell'andamento delle magnitudini di tutti gli anni.

Anche i dati di Nove sembrano riportare un andamento annuale quasi costante della luminosità del cielo, con valori che variano attorno ad una magnitudine media di 19,69 mag/arcsec<sup>2</sup>, quasi una magnitudine in meno rispetto ai dati di Cima Ekar. Il grafico mostra come, negli anni, i mesi di dicembre, gennaio e febbraio siano più bui rispetto agli altri, da notare che è l'andamento opposto rispetto a Cima Ekar.

Nella seguente tabella riepilogo le magnitudini medie (tab. 8.1.1), di ogni anno, dei dati di Nove con il relativo grafico che mostra l'andamento generale (fig. 8.1.6).

ANNO	MAGNITUDINE MEDIA
2011	19,64 mag/arcsec <sup>2</sup>
2012	19,60 mag/arcsec <sup>2</sup>
2013	19,70 mag/arcsec <sup>2</sup>
2014	19,81 mag/arcsec <sup>2</sup>
2015	19,69 mag/arcsec <sup>2</sup>

Tab. 8.1.1: magnitudini medie mensili Nove.

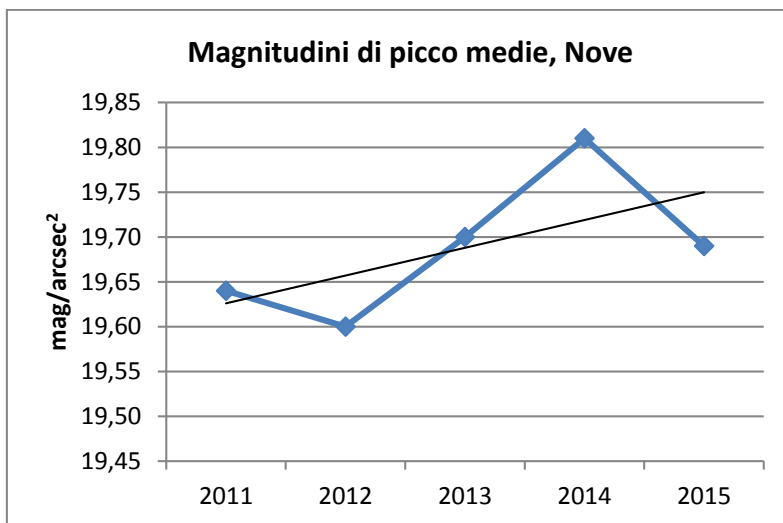


Fig. 8.1.6: andamento delle magnitudini Nove.

Al contrario delle magnitudini di Cima Ekar, la luminosità del cielo visto da Nove sembra diminuire con gli anni. La differenza non trova un'immediata spiegazione. Il lavoro svolto in questa tesi si è concentrato sul calcolo delle mode, registrando il picco di magnitudine con maggiore frequenza. Per il futuro si potrebbe approfondire l'analisi e scartare le notti più nuvolose che possono aver deviato i risultati.

Anche variazioni nelle caratteristiche dell'atmosfera a bassa quota possono aver influito, come per esempio una diminuzione della quantità di nebbia o aerosol nell'aria.

Potrebbero esserci anche cause legate alla strumentazione e ad un eventuale degrado ma, da Nove, hanno comunicato di tenere costantemente pulita la finestra ottica dell'SQM.

Queste sono le prime considerazioni sull'andamento della luminosità del cielo di Nove ma sarebbe interessante continuare ad approfondire lo studio utilizzando tecniche che permettano un'analisi più approfondita dei fattori che influenzano la brillantezza del cielo notturno in pianura.

Osserviamo l'andamento generale della brillantezza del cielo di Cima Ekar e di Nove dal 2011 al 2015 tramite il seguente grafico:

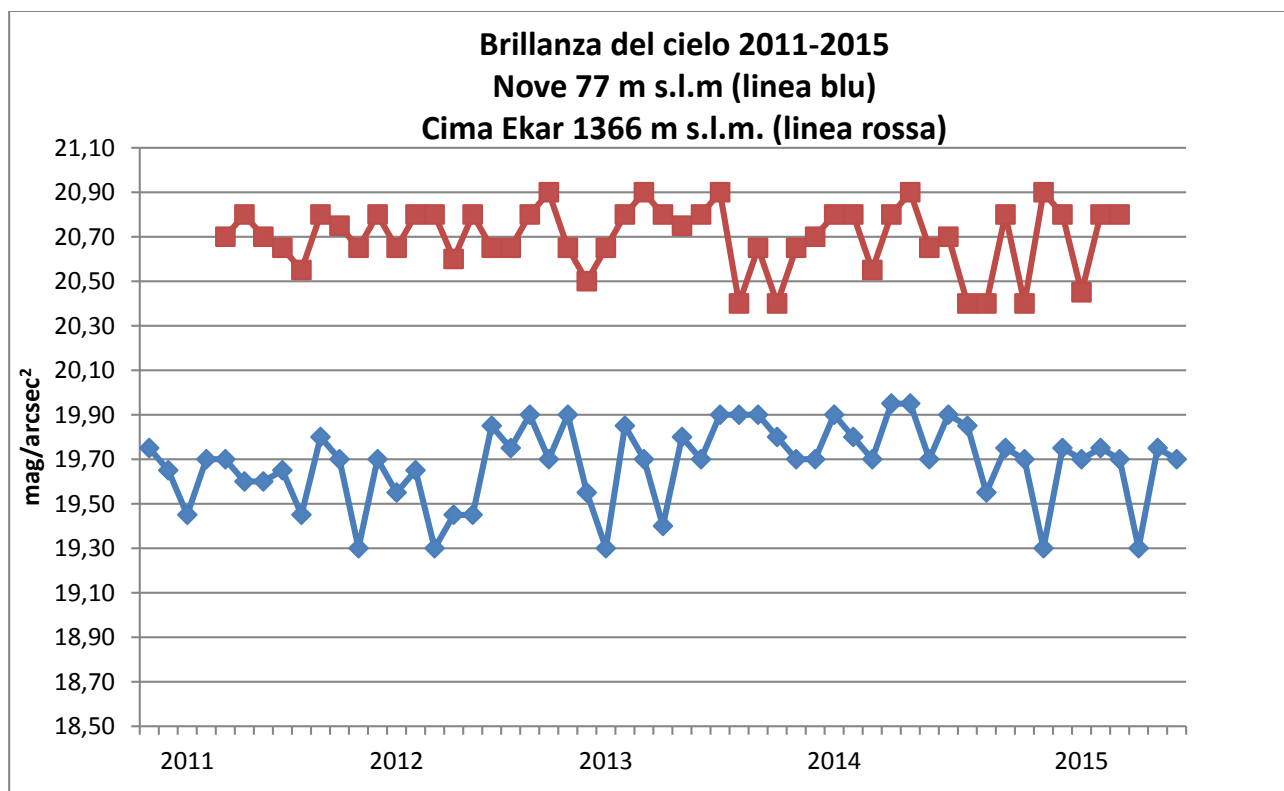


Fig. 8.1.7: andamenti Cima Ekar-Nove, 2011-2015 a confronto. Da notare: 21,30 mag/arcsec<sup>2</sup> limite visibilità Luce Zodiacale, 18,70 mag/arcsec<sup>2</sup> limite visibilità Via Lattea (per Padova la magnitudine media è 18,20 mag/arcsec<sup>2</sup>, quindi Via Lattea non visibile,) (Ortolani, comunicazione privata).

I livelli di inquinamento luminoso, secondo questa analisi, risultano stabili (fig. 8.1.7): la magnitudine media del cielo di Asiago varia attorno ad un valore di 20,68 mag/arcsec<sup>2</sup>, quella di Nove attorno a 19,69 mag/arcsec<sup>2</sup>.

Negli anni sono aumentati sia il numero di impianti pubblici e privati (incremento di circa +6-7% ogni anno), sia la luminosità emessa dagli impianti (+ 2,4%) (Ortolani, comunicazione privata). Da notare che la luminosità emessa ha un incremento minore rispetto al numero di nuovi impianti, probabilmente per il diverso tipo di lampade usate (es. led).

Cima Ekar mostra una dispersione dei dati che aumenta col passare degli anni. Questo potrebbe essere dovuto o a problemi legati alla manutenzione dello strumento (l'ultima manutenzione risale a maggio 2015 ma la finestra ottica di Cima Ekar è quotidianamente monitorata da un fisheye) oppure a particolari cambiamenti climatici che influiscono sulle caratteristiche dell'atmosfera.

I dati di Cima Ekar mostrano una lieve tendenza, negli anni, verso un cielo notturno sempre più luminoso di circa il +2%. L'esame degli istogrammi annuali (fig. 8.1.8 e 8.1.9) mostra un andamento diverso da quello trovato con l'analisi mensile (diminuzione luminosità di circa 2%).

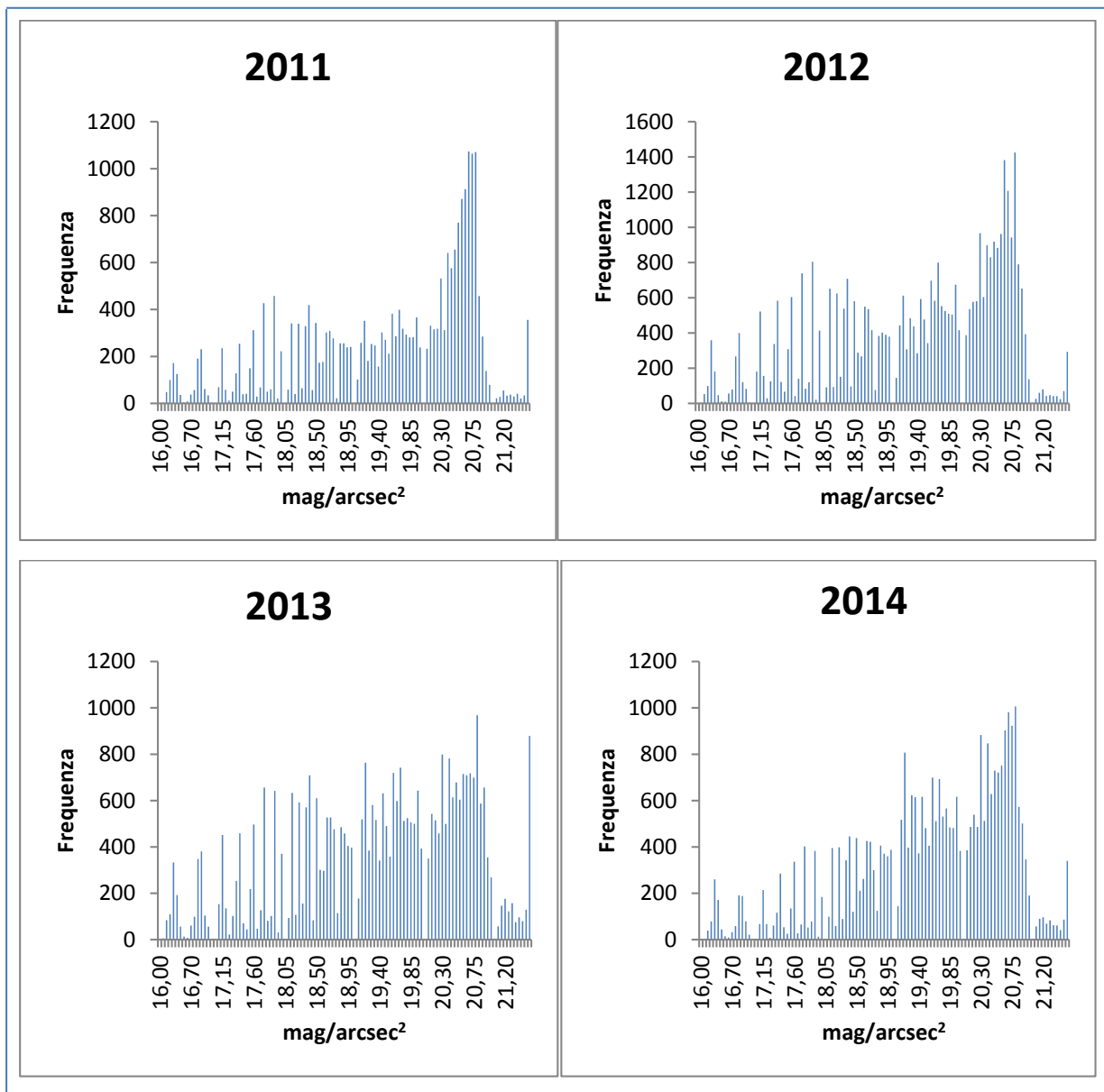


Fig. 8.1.8: grafici annuali Cima Ekar.



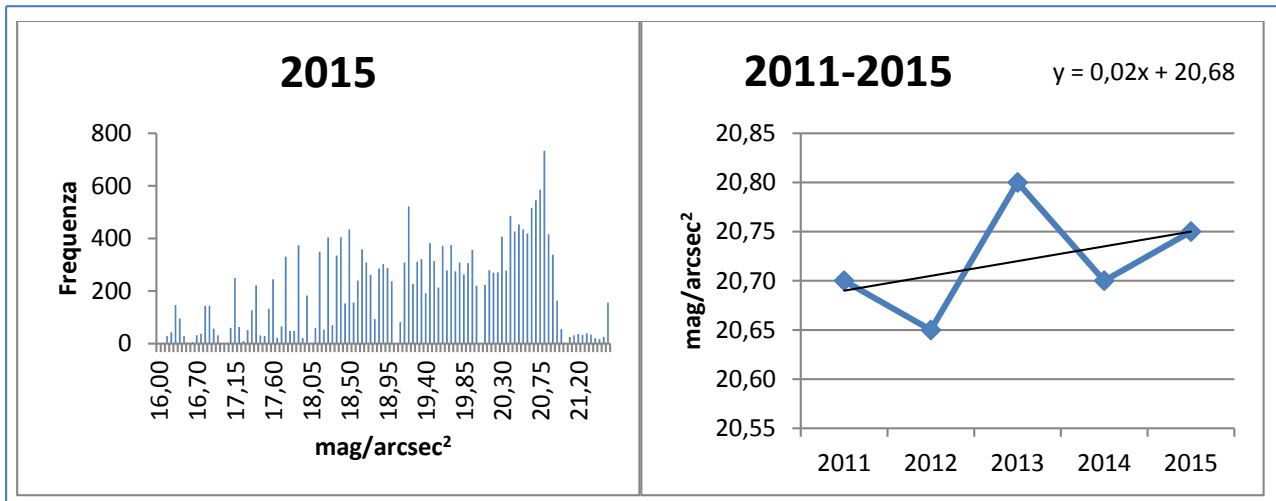


Fig. 8.1.9: grafici annuali Cima Ekar.

Nove invece sembra tendere verso un cielo più buio (-3% di luminosità) forse a causa di variazioni nelle caratteristiche dell'atmosfera a bassa quota o presenza di troppe notti non fotometriche che alterano i dati. Tuttavia il 2015 mostra un cambiamento di tendenza. L'esame degli istogrammi annuali (fig. 8.1.10) conferma questo andamento.

Nove è caratterizzato da una certa dispersione dei dati presente costantemente durante gli anni, durante tutto l'anno. Questo può essere causato dalle caratteristiche dell'atmosfera a bassa quota, che ha una densità maggiore rispetto a quella di Cima Ekar, a causa delle diverse altitudini. Con la diversa densità dell'atmosfera cambiano anche i processi di diffusione dell'inquinamento luminoso e questo potrebbe spiegare il diverso andamento delle magnitudini.

Tra la fine del 2014 e l'inizio del 2015 si nota un vero e proprio "scalino" nel valore della magnitudine che passa da una media di 19,85 mag/arcsec<sup>2</sup> a una media di 19,75 mag/arcsec<sup>2</sup>. Dal febbraio 2015, a Rosà, in una cittadina limitrofa, hanno acceso una parte dell'illuminazione pubblica che era stata spenta tra nel 2013 e 2014. Questo potrebbe aver causato la variazione di tendenza, portando ad un cielo più luminoso.

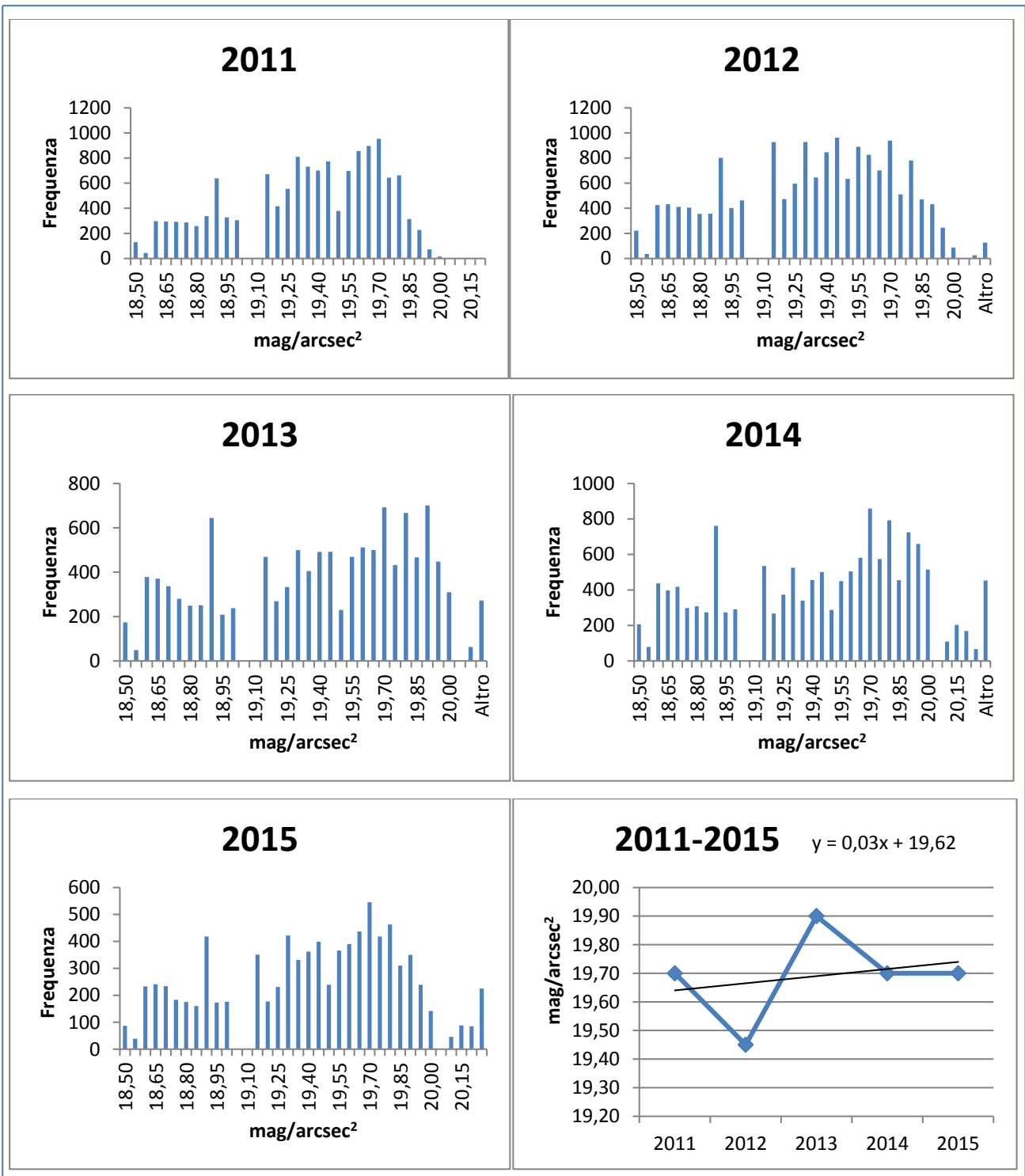


Fig. 8.1.10: grafici annuali Nove.

## 9. CONCLUSIONI

Il lavoro svolto in questa tesi ha l'obiettivo di studiare l'andamento della luminosità del cielo di Asiago, attraverso l'analisi dei dati registrati dall'SQM di Cima Ekar (VI), dal maggio 2011 all'agosto 2015. Lo studio è stato effettuato valutando l'andamento modale delle magnitudini, quindi prendendo come valori di riferimento quelli che mostrano una maggiore frequenza. Questo tipo di lavoro ha evidenziato un valor medio di  $20,68 \text{ mag/arcsec}^2$ , con lieve aumento della luminosità del cielo di Asiago negli anni, nella misura di circa +2% se si considerano i valori modali mensili. L'analisi dei valori modali annuali è più irregolare e dà invece una diminuzione della luminosità di circa il 2%.

Con il passare degli anni aumenta la dispersione nei valori delle magnitudini ( $\sigma \approx 0,13 \text{ mag/arcsec}^2$ ) e questo fa pensare o alla degradazione dello strumento (che però viene quotidianamente monitorato) o a particolari cambiamenti climatici che vanno ad influire sulle caratteristiche dell'atmosfera.

Ho a disposizione anche i dati registrati dall'SQM dell'Osservatorio Astronomico di Nove (VI), dal 2011 al 2015, quindi ho potuto confrontare gli andamenti della brillantezza del cielo con un analogo studio delle magnitudini. I due siti di osservazione si trovano a due altitudini diverse, Nove a 77 m s.l.m. e Cima Ekar a 1366 m s.l.m., a circa 30 km di distanza.

Nove dà un valor medio di  $19,69 \text{ mag/arcsec}^2$  con andamento irregolare, con dispersione di circa  $\sigma \approx 0,13 \text{ mag/arcsec}^2$ .

I grafici di Nove e Cima Ekar a confronto mostrano correlazioni e anticorrelazioni mensili che sono probabilmente legate a fattori complessi (caratteristiche dell'atmosfera e densità alle diverse altitudini, manutenzione dello strumento, diversa distribuzione delle luci locali, ecc.).

Benchè l'andamento pluriennale sia irregolare, c'è tendenza ad un lieve aumento di luminosità a partire da fine 2014 di circa  $0,15 \text{ mag/arcsec}^2$ .

In conclusione, la brillantezza del cielo notturno ad Asiago e a Nove dal 2011 all'agosto 2015 non mostra significativi cambiamenti. C'è tuttavia indizio di un possibile aumento di luminosità, di qualche centesimo, nei due siti, comunque inferiore a quello dell'aumento della luminosità degli impianti installati, che è dell'ordine di + 2-3%.

Per il futuro è interessante approfondire lo studio della brillantezza del cielo di questi siti (e di altri), non solo per capire i meccanismi di diffusione della luce nell'atmosfera (in funzione della distanza dalla città, angolo di osservazione, ecc.), ma anche per comprendere meglio come la diversa altitudine dei siti o la loro diversa posizione geografica influenzi l'andamento della brillantezza del cielo notturno.

## 10. BIBLIOGRAFIA

AUBÉ M., 2015, *Phil. Trans. R. Soc. B* 370: 20140117, “Physical behavior of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment”.

FALCHI F. et. al., 2015, *Scientific Reports*, 5:8409 DOI: 10.1038/srep08409, “Worldwide variations in artificial skyglow”.

GARSTANG R. H., 1986, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98:364-375, “Model for artificial night-sky illumination”.

OPTALE A., 2012, Tesi, “La luminosità del cielo notturno”, Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”, Università degli studi di Padova.

ORTOLANI S., “Complementi di Astronomia”, dispense, Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”, Università degli studi di Padova.

PATAT F., 2010, CIE Conference “Light Quality and Energy Efficiency”, arXiv: 1011.6175, “The effects of improper lighting on professional astronomical observations”.

RIZZATO M., 2011, Tesi, “Analisi del cielo notturno in ottico ad Asiago”, Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”, Università degli studi di Padova.

SOARDO P., ROSSI G., IACOMUSSI P., *Pub. CIE* 126 (2010) Considerazioni sul modello di Garstang.

TREANOR P.J., 1973, *Observatory*, 93, 117.

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.

WALKER M.F., 1977, *Pub. 2*, 672 A.S.P., 89, 405.

<http://www.lightpollution.it>

<http://www.arpa.veneto.it>

## **11. RINGRAZIAMENTI**

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

Il tecnico Gabriele Umbriaco per aver fornito i dati dell'SQM di Cima Ekar.

Il Dott. Andrea Bertolo (ARPAV) per il suo contributo allo studio dell'inquinamento luminoso.

CORDILIT – Coordinamento italiano per la raccolta dati sull'inquinamento luminoso, l'Ing. Andrea Giacomelli e il Sig. Leopoldo Dalla Gassa dell'Osservatorio Astronomico di Nove per aver fornito i dati dell'SQM.

Un ringraziamento ai miei genitori e alla mia famiglia, che, con non poche difficoltà, mi hanno permesso di iniziare questo cammino, permettendomi di realizzare un sogno.

Un grazie speciale a Damiano, che non ha mai smesso di credere in me, sostenendomi nei momenti più difficili, e alla sua famiglia che mi ha sempre accolta e che sempre ci sarà.