



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA

IN INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA

CICLO XXXIII

*Parametrizzazione delle superfici urbane nella modellazione  
aerodinamica per la qualità dell'aria*

Settore Scientifico Disciplinare  
ICAR/01 IDRAULICA

Candidato: Luca Salvadori

Coordinatore del Corso di Dottorato: Prof. Ivan Blečić

Supervisori: Prof. Simone Ferrari e Prof. Giorgio Querzoli

Esame finale Anno Accademico 2019-2020



*Ai miei nonni, sempre parte di me, e alla loro delicatezza.*

*Credo che, alla fine di un percorso impegnativo, un indicatore della sua buona riuscita sia trovarsi a pensare con un sorriso a quante persone ne hanno fatto parte, rendendolo un progetto condiviso, determinando la crescita personale che può conseguire solo a un'esperienza ricca di rapporti in evoluzione, e che si desidera quindi ringraziare sentitamente. Simone, amico oltre che supervisore. Per l'accessibilità che ha sempre garantito ai nostri confronti e alle nostre conversazioni, per tutte le volte che mi ha suggerito una direzione, e per tutte quelle in cui mi ha dato la possibilità di provare a seguirne una mia, di imparare, e migliorare coscientemente. Per la saggia pacatezza che mostra di fronte a problemi e imprevisti, che provo a fare anche mia. Maria Grazia, esempio di precisione, di cui ho cercato di osservare al meglio la capacità di analisi degli argomenti e di disamina critica dei risultati ottenuti. Per l'impostazione del lavoro, e per l'immane disponibilità durante tutto il suo sviluppo. Il Prof. Querzoli, ricca fonte di idee, abile nel vedere possibili strade e approfondimenti a partire da spunti che occhi meno esperti come i miei potevano reputare secondari. Per averle condivise con me nei nostri lunghi confronti. Michela, per il suo sguardo vigile e l'aiuto nei delicati momenti dell'inizio del cammino, quello che ti può fornire chi ha fresche le sensazioni che si provano in quella circostanza. Antonio, con la sua contagiosa energia e passione. Per le piacevoli chiacchierate sui temi più disparati, oltre che per il grande aiuto sul lavoro. I due compagni de "L' Ufficio DTM", Dario e Alessandro, che al di là delle utili discussioni sugli argomenti sotto mano di ognuno in quel periodo, sono sempre riusciti a regalarmi momenti di riposo tra rubriche musicali, resoconti filmografici e leggerezza quanto basta. Tutti i colleghi del Dipartimento con cui ho condiviso un momento di pausa, un pranzo o un caffè. Annalisa Di Bernardino, per aver fornito gran parte dei dati usati nel lavoro, e per la cortesia e disponibilità che mi ha sempre riservato quando ho avuto bisogno di chiarimenti sulla loro struttura. I revisori della tesi, il Prof. Monti e la Prof.ssa Trini Castelli, per l'attenzione che hanno dedicato al lavoro e per i loro consigli su come migliorarlo, oltre alle indicazioni generali di cui avrò cura di far tesoro anche per il futuro. La mia famiglia, il punto fermo di sempre, il porto sicuro. I miei genitori, per la prontezza che dimostrano sempre nell'offrire un aiuto concreto in qualunque occasione in cui ci sia bisogno. Per l'immane e fondamentale conforto di mia madre, sempre presente quando le inevitabili pressioni della vita mi portano a parlare e parlare, pronta ad ascoltare e ascoltare. Per la saggezza di mio padre, per tutte le volte in cui mi aiuta a ridimensionare gli eventi, a dare il giusto peso a tutte quelle cose che nel quotidiano ci capitano e, a volte, non ci rendiamo conto di*

*quanto siano piccole. Mio fratello, costante compagno di giochi: da una vita, per la vita. Anche se questi cambiano, diventando così seri e impegnativi, il divertimento con lui è sempre lo stesso. Per quelle volte in cui, nonostante le spiccate differenze d'ambito, parlare con lui mi ha ispirato e fornito utili strategie per il mio lavoro. Il gruppo di tutti i miei amici, fortunatamente tanti da rendermi difficile nominarli uno per uno, la mia seconda casa. Per la reciproca stima che ci lega, per tutti i diversi punti di vista che mi offrono con le loro esperienze, e per l'affetto che mi dimostrano nonostante molti di loro si ritrovino a conoscermi e tollerarmi da quando eravamo dei ragazzini. E, chiaramente, Laura, la mia preziosa compagna di viaggio. Metaforicamente, come anche realmente. La persona con cui esploro il mondo, e che per questo mi permette di sentirmi così adulto e così bambino allo stesso tempo. La mia migliore amica, che sa tutto di me, e quindi anche cosa significa per me questo momento. Perché ha visto gli alti e bassi più di chiunque altro, e ha saputo non solo stare in equilibrio in queste montagne russe, ma anche spronarmi e motivarmi con una dolcezza che, contemporaneamente, ne smorzava le oscillazioni.*



## *INDICE*

Abstract .....	4
1        Introduzione .....	6
1.1    Tema trattato .....	6
1.2    La morfometria urbana e gli ambiti di applicazione .....	11
1.3    Stato dell'arte dell'analisi morfometrica.....	15
1.4    Lo stato attuale dello studio dei profili di velocità.....	21
1.5    Obiettivi .....	25
2        Metodi .....	27
2.1    Analisi morfometriche .....	27
2.2    Evoluzione dell'analisi della morfometria urbana, necessità di maggiore rigore e generalizzazione.....	30
2.3    Profili di velocità del vento.....	40
2.4    Le motivazioni della scelta delle equazioni di MacDonald come base .....	41
3        Casi studio.....	44
3.1    Prime applicazioni su larga scala e confronto tra stili architettonici .....	44
3.2    Applicazione del metodo topologico per l'analisi dei canyon.....	55
3.3    Il caso studio di Villa Pamphili a Roma .....	56

3.4	Il caso studio del Dipartimento di Fisica a Roma, La Sapienza, edificio Enrico Fermi .....	59
4	Risultati .....	64
4.1	Analisi su larga scala, primo confronto Cagliari – Roma.....	64
4.2	Somiglianza dei parametri tra zone architettonicamente confrontabili .....	74
4.3	Analisi dei canyon urbani utilizzando il metodo topologico .....	77
4.4	Profili di velocità, prove condotte su Villa Pamphili.....	82
4.5	Profili di velocità, analisi su edificio Enrico Fermi .....	92
5	Discussione finale e conclusioni .....	104
A	Appendice (calcolo del parametro $\lambda_f$ ).....	107
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	110



## Abstract

Uno dei temi attualmente di maggiore interesse rispetto al concetto di sostenibilità e sviluppo sostenibile, e rispetto alla tutela della salute umana, è quello dello studio della qualità dell'aria ambiente nelle aree cittadine. In particolare, è importante lo studio del ruolo che rivestono, in questo senso, le diverse configurazioni architettoniche possibili dei tessuti urbani. In conseguenza di questo fatto, a partire dagli anni '90, si sono consolidate diverse prassi con l'intento dell'assegnazione di una caratterizzazione schematica alle superfici urbane, al fine di una descrizione delle forme degli edifici e dei rapporti reciproci tra essi: il tema prende il nome di *morfometria*, e include la definizione di specifici parametri e indici.

Questa è funzionale agli studi sulla qualità dell'aria nei centri urbani, intervenendo in diversi aspetti, quali la predisposizione dei modelli per le prove di laboratorio, la definizione delle informazioni in ingresso nella modellazione numerica, e la modellazione del profilo verticale di velocità del vento in ambito urbano. Gli obiettivi della tesi si focalizzano quindi sulle valutazioni morfometriche delle superfici urbane, a partire dalla ricerca di quale possa essere, attualmente, lo schema operativo più opportuno da seguire per ottenere una caratterizzazione accurata e, possibilmente, applicabile a un qualunque sito, sulla base di un insieme di dati di facile reperibilità. Si considerano inoltre alcune possibilità di semplificazione, nel senso di associazione dei valori dei parametri morfometrici a contesti urbani di cui siano note le caratteristiche costruttive generali, e di verifica dell'esistenza di tendenze comuni sulla larga scala, almeno per alcuni parametri. Si sono infine analizzati diversi modi di includere i parametri descrittivi del tessuto urbano nella modellazione del profilo di velocità del vento.

In riferimento a tutti i punti fondamentali della tesi, i metodi utilizzati si sono basati, inevitabilmente, sull'analisi territoriale e l'elaborazione dei dati relativi alle altezze degli edifici. Sono naturalmente necessari altri approfondimenti e altre verifiche ma, come si riporta più avanti nel corpo della tesi, almeno per alcuni parametri è possibile individuare una certa somiglianza in

riferimento sia a tipologie architettoniche simili, sia alla tendenza su larga scala, cioè considerando grandi centri urbani nella loro interezza.

# 1 Introduzione

## 1.1 Tema trattato

La consapevolezza degli effetti della costante crescita dei centri urbani e delle attività umane entro essi, soprattutto in termini di emissioni di sostanze nocive, e le ripercussioni di queste nei confronti dell'ambiente in generale sono certamente un tema di grande attualità (Tian et al. 2019). È chiaro, poi, che particolare interesse si rivolga ai fattori che, oltre a costituire una minaccia per le matrici ambientali, si identificano come pericolo per la stessa salute degli abitanti di tali centri. A tal proposito, le normative emanate a livello europeo si soffermano sulla definizione dei valori soglia per le concentrazioni delle sostanze pericolose presenti in ambiente urbano, al di sotto delle quali si possa assumere assenza di rischio per i cittadini, e su quali siano gli indicatori più idonei per la descrizione della qualità dell'aria in ambiente urbano (World Health Organization (WHO) 2000; Rolaf van Leeuwen 2002; Vahlsing and Smith 2012). Sono, infatti, sempre maggiori le attenzioni rivolte alla cosiddetta “*respirabilità*” all'interno delle città (Miao and Liu 2019; Mi et al. 2019), e ben note da tempo le ripercussioni che i contaminanti respirati in ambienti poco salubri hanno sulla salute dei cittadini (Dockery et al. 1993; Pope III et al. 2002; Oberdörster et al. 2004). Oggi “l'umanità sta causando la sesta estinzione di massa in 3.8 miliardi di anni di vita sulla Terra”; l'inquinamento dell'aria causa, infatti, da solo, circa 7 milioni di morti premature.<sup>1</sup> Esistono poi problemi correlati, nel senso di non strettamente legati al benessere fisico ma, comunque, di una certa rilevanza. Infatti, esistono comprovati effetti dell'inquinamento su ogni comparto dell'ecosistema urbano. Ne sono un esempio gli edifici, che possono essere soggetti a mutamenti e danni nella loro composizione e nei loro materiali (Brimblecombe 2016), i beni culturali e architettonici (Striegel et al. 2003), come anche la vegetazione, utilizzata in ambito cittadino a vari scopi, tra i quali la stessa mitigazione delle emissioni (Janhäll 2015; Shrestha et al. 2021). Nonostante tali evidenze, vari sono, oggi, i motivi e le forzanti che impediscono o

---

<sup>1</sup> Dal discorso del 6 marzo 2019 di David Boyd, relatore speciale O.N.U. sui diritti umani e dell'ambiente.

quantomeno rallentano l'indirizzo delle collettività verso abitudini e pratiche socioeconomiche e di produzione riconosciute ottimali nei confronti degli aspetti ambientali e della salute. Inoltre, le tecnologie utilizzate anche all'interno degli stessi centri urbani e dagli stessi cittadini, quali quelle per la climatizzazione e per il trasporto, sono caratterizzate da un potenziale inquinante tutt'altro che trascurabile (Streets et al. 2003; Chan and Yao 2008).

Le sostanze pericolose più comuni sono identificate e distinguibili anche per la loro reattività o passività in senso chimico: tra gli agenti non reattivi il "*particulate matter*" è quello su cui si concentra maggiormente l'attenzione, ad esempio nel monitoraggio della qualità dell'aria nei centri abitati, e viene distinto a sua volta a seconda delle dimensioni caratteristiche delle particelle in PM10 e PM2,5. Tra gli agenti che sono, invece, suscettibili di reazioni e trasformazioni si trovano molecole quali l'ozono (O<sub>3</sub>), gli ossidi dell'azoto (NO<sub>x</sub>) e le sostanze carboniose sia inorganiche quali gli ossidi del carbonio (CO<sub>x</sub>) che organiche, come alcuni idrocarburi cancerogeni, tra i vari il benzopirene (BaP) (Vardoulakis et al. 2003).

La gestione delle emissioni inquinanti e degli effetti di queste è un problema complesso. Oltre, ovviamente, a un consistente sforzo nella progressiva riduzione delle quantità emesse (in riferimento a tutte le matrici ambientali e, nello specifico, in atmosfera), come previsto dalla normativa attualmente in vigore (European Parliament, European Union Council 2008), la conformazione del tessuto urbano è un ulteriore fattore sul quale un intervento mirato può portare ad un miglioramento generale della qualità dell'aria nel centro abitato e della già citata respirabilità. Infatti, non è solo la ventilazione della zona in senso stretto a costituire la condizione necessaria per una buona qualità dell'aria, quanto la combinazione tra questa e le forme che caratterizzano l'edificio del centro urbano. In particolare, questa combinazione è importante nella determinazione delle condizioni che si creano alle quote più basse e tra gli edifici; inoltre, anche le distanze reciproche tra gli edifici (Garau et al. 2018) e la forma dei tetti (Badas et al. 2017) sono fattori che devono essere tenuti in considerazione nella valutazione del ricambio d'aria, soprattutto nelle zone abitualmente frequentate dai pedoni. In generale, non è sempre vero che a una maggiore ventilazione della zona corrisponda una minore concentrazione degli inquinanti alle quote più vicine al suolo. Lo

studio delle migliori prassi costruttive per garantire la ventilazione e il ricambio d'aria, sulla base della situazione pregressa ed attuale dei centri abitati, quindi, ha come scopo l'individuazione delle caratteristiche più influenti e delle correlazioni esistenti tra morfologia urbana e qualità dell'aria ambiente. Una tale conoscenza può poi guidare le decisioni sulla pianificazione futura, che potranno includere le considerazioni sulla buona ventilazione degli ambienti urbani.

Esaminare le realtà urbane attuali acquista una certa importanza nell'ottica della considerazione delle evidenze sullo stato della qualità dell'aria ambiente in relazione alle caratteristiche del tessuto urbano nella progettazione dei nuovi centri. L'utilizzo di strumenti previsionali validati consente studi e analisi sui possibili scenari microclimatici delle aree urbane, e può aiutare quindi i pianificatori nelle valutazioni future e nelle decisioni sulle disposizioni per le zone di nuova costruzione (Mauree et al. 2018).

Per i motivi discussi sopra, la comunità scientifica ha rivolto particolare attenzione allo studio della qualità dell'aria ambiente nelle città, sviluppando sia la teoria che il metodo e le tecniche per analizzare i fenomeni che caratterizzano il trasporto dei contaminanti (Chen et al. 2011; Soulhac et al. 2011; Blocken 2015). Lo studio dell'aerodinamica urbana poggia su alcuni strumenti fondamentali, principalmente gli studi sul campo, le prove sperimentali in laboratorio e le simulazioni numeriche. La base teorica del tema trattato è la definizione delle varie parti che compongono lo Strato Limite Urbano, o Urban Boundary Layer (in seguito UBL), definita come la porzione dello Strato Limite Atmosferico (Atmospheric Boundary Layer, ABL) il cui comportamento è influenzato dagli edifici, dalle forme dei centri urbani e dall'ambiente costruito (Fernando et al. 2010; Zajic et al. 2015). L'UBL, localizzato quindi al di sopra degli agglomerati urbani, presenta uno spessore (inteso come altezza rispetto al suolo) variabile in funzione della posizione planimetrica a cui è riferito. Inoltre, è possibile suddividerlo in tre parti fondamentali, proprio in funzione dell'altezza (in Figura 1 si riporta una rappresentazione di questa suddivisione):

- Strato di Copertura Urbana, o Urban Canopy Layer (UCL), che include il flusso che scorre tra le strade e gli edifici;

- Substrato di Rugosità Urbana, o Roughness Sublayer (RSL), situato al di sopra dell'UCL e in cui il flusso è influenzato dalle altezze degli edifici;
- Substrato Inerziale, o Inertial Sublayer (ISL), che è lo strato posto a quota maggiore, in cui le condizioni sono costanti in funzione dell'altezza e si può assumere che il flusso non risenta delle forme e altezze degli edifici.

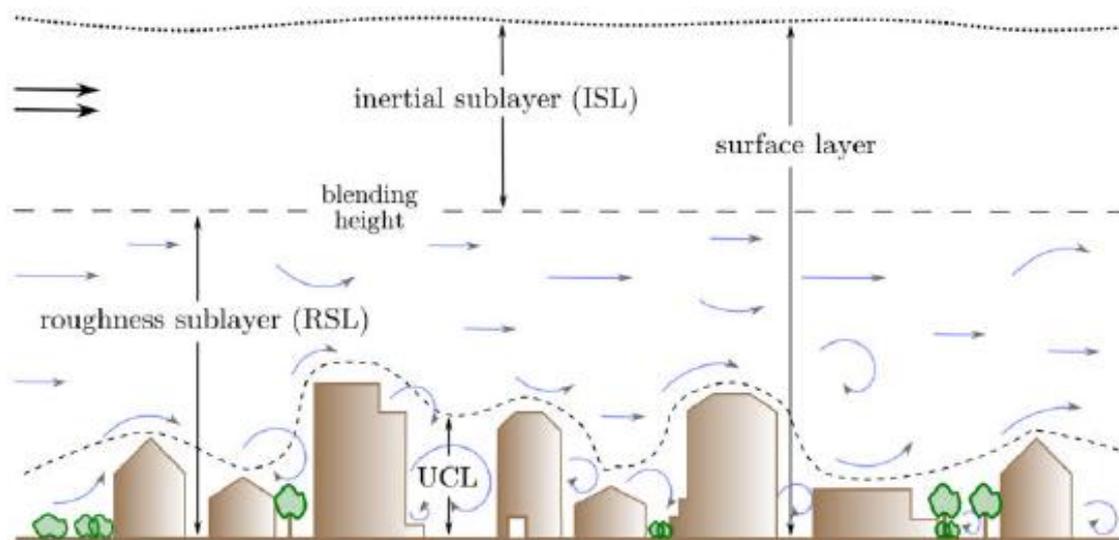


Figura 1: suddivisione dell'UBL (Hertwig 2013).

Ventilazione e trasporto dei contaminanti trovano la loro naturale sede negli strati dell'atmosfera appena descritti, importanti anche nella valutazione del comfort esterno. Infatti, entrambi i temi sono legati alla microclimatica del centro urbano. La modellazione e previsione del comportamento dell'ABL nel complesso è essenziale per la trattazione delle tematiche relative alla qualità dell'aria. Come accennato poco sopra, sia lo spessore dell'intero UBL che quelli degli strati di cui è composto, non possono essere individuati una volta per tutte, ma sono soggetti a una grande variabilità rispetto a parametri quali, tra gli altri, la rugosità dello strato di fondo e la stratificazione termica.

In termini generali, lo studio della qualità dell'aria nei centri urbani coinvolge, per sua natura, differenti scale e differenti strumenti utilizzati: la modellazione dell'ABL e dell'UBL si può riferire a diverse distanze e scale, a seconda di quali siano i fenomeni specifici che si vuole analizzare e il livello di dettaglio che si intende raggiungere (Blocken 2015). La scala globale, caratterizzata da distanze di diverse migliaia di km (fino a 6500 come valore indicativo definito dall'autore), la mesoscala, caratterizzata da distanze dell'ordine delle centinaia di km (circa 200, indicativamente), la microscala (2 km) e le scale di edificio, di componente e di abitante. La microscala comprende e descrive le caratteristiche tipiche degli elementi del tessuto urbano, quali edifici, alberi e simili, ed è il tipico ambito di applicazione della Fluidodinamica Computazionale (Computational Fluid Dynamics, CFD). La mesoscala, invece, si riferisce a fenomeni che interessano dimensioni tipiche di eventi quali cicloni e tifoni, ed è ambito di applicazione dei modelli numerici di previsione meteorologica e dei modelli meteorologici di mesoscala. La scala temporale, a seconda di quale sia l'interesse, può andare dalle frazioni di secondo per la cattura delle caratteristiche dei vortici più piccoli, ai giorni per lo studio dei macro-fenomeni che si esplicano su grandi estensioni.

È da considerare che, spesso, il monitoraggio diretto delle concentrazioni dei contaminanti può essere difficoltoso, dispendioso e, comunque, rappresenta solo un'informazione parziale, tanto spazialmente rispetto all'intera estensione del centro urbano, che temporalmente rispetto all'intero periodo che caratterizza i fenomeni di trasporto. In conseguenza a queste difficoltà, si è affermato sempre più un approccio di tipo modellistico, al fine di determinare, o almeno stimare, sia le grandezze aerodinamiche che le concentrazioni dei contaminanti (che dipendono strettamente dal flusso governato dalle prime) anche dove gli strumenti per la loro misura effettiva siano assenti o dove non possa materialmente aversi informazione, in relazione a motivi tecnici e pratici (Soulhac et al. 2012, 2017). Inoltre, la modellazione numerica è oggi utilizzata come ausilio anche per lo studio del comfort esterno e del fenomeno dell'isola di calore urbana (Hwang et al. 2019).

La letteratura riporta una prima classificazione dei modelli di mesoscala che considerano il canyon urbano come unità elementare semplificata: *"single layer"* (Masson 2000) e *"multi-layer"* (Martilli et al. 2002), con una crescente complessità di caratterizzazione delle superfici urbane e un

impatto sul risultato ottenuto dimostrato, rispetto a precedenti parametrizzazioni meno dettagliate utilizzate (Salamanca et al. 2018). In particolare, la schematizzazione “*multi-layer*” prevede la considerazione di diverse classi omogenee di edificato, e la caratterizzazione, classe per classe, acquista notevole importanza, visti i buoni risultati ottenuti utilizzando questo tipo di schematizzazione (Best 2006; Cao and Lin 2014).

In riferimento alla CFD, si sottolinea (Blocken 2015) come una modellazione accurata dell’ABL sia essenziale per simulare in modo accurato e affidabile i processi fisici che si svolgono in ambito urbano (Richards and Hoxey 1993; Richards and Norris 2011), in particolare relativamente alla specificazione della rugosità delle superfici. Si suggerisce, infatti, l’utilizzo di cinque aree per cui si debba specificare il parametro, in funzione della distanza dal nucleo di edifici modellati esplicitamente che si sta analizzando. Infatti, l’implementazione diretta di tutte le geometrie richiederebbe degli sforzi computazionali attualmente non sostenibili, e questo porta alla necessità di considerare implicitamente gli effetti delle aree che circondano quella di interesse, attraverso la parametrizzazione che, però, rappresenta solo in parte il fenomeno (Yuan et al. 2016). Migliorando quest’ultima, comunque, si possono conciliare i due estremi. Per alcune di queste aree di interesse si suggerisce di basare l’attribuzione dei valori della rugosità su quanto riportato in letteratura (Wieringa 1992). Tuttavia, una parametrizzazione più specifica, nel senso di una maggiore suddivisione in zone è una pratica che si sta consolidando (Liu et al. 2017, 2018).

## **1.2 La morfometria urbana e gli ambiti di applicazione**

L’influenza che lo strato di copertura urbana ha sulla stratificazione dell’ABL descritta al paragrafo 1.1, sulla qualità dell’aria e sulle condizioni di comfort urbano, rende necessaria una sua descrizione schematica e, quindi, una determinazione delle caratteristiche morfometriche del tessuto, intendendo un insieme di parametri che ne descrivono gli aspetti geometrici più rilevanti. Questa caratterizzazione è importante per differenti motivi. Ad esempio, nei modelli di CFD utilizzati sulla microscala, sono necessari, per i casi teorici e generalizzabili, i parametri che descrivono le forme urbane specifiche, che sono materialmente e direttamente computate nella

simulazione, che definiscono la forma dell'unità fondamentale considerata del *canyon urbano*. Si definisce '*canyon urbano*' la struttura costituita da due file di edifici parallele e, idealmente, a sviluppo longitudinale indefinito (per la precisione, si considera lo spazio tra le due file di edifici).

Inoltre, nella simulazione numerica a scala di edificio o di isolato, l'area di interesse e implementata direttamente nel dominio di simulazione deve essere inserita in un contesto più ampio, e questo contorno necessita di una adeguata caratterizzazione. Per le regioni attorno all'area in analisi, che non sono considerate esplicitamente, deve infatti essere specificata la *rugosità* urbana (di cui si tratta nel dettaglio nel seguito), e deve essere ben definita la condizione del vento sul contorno dell'area (Blocken 2015; Pelliccioni et al. 2015).

Uno dei legami caratteristici su cui si può indagare è, quindi, quello tra il profilo di velocità del vento rispetto alla quota in un certo punto (inteso planimetricamente) e le caratteristiche geometriche dell'edificato circostante, importante in relazione, per esempio, alla definizione delle condizioni al contorno nella modellazione su scala ridotta. A questo proposito, stando allo stato dell'arte attuale, un contributo apportabile è quello dello studio dei parametri fluidodinamici caratteristici che influenzano la forma del profilo di velocità, per esempio la rugosità macroscopica della superficie, in contesti in cui non siano disponibili informazioni tabellate del tipo *descrizione qualitativa del tessuto – valore di rugosità*. Al fine di snellire questo tipo di analisi, altro aspetto da curare è lo studio della possibilità di associare in maniera più speditiva il valore dei parametri a determinate classi di tessuto urbano, in relazione anche alla maggiore disponibilità di dati rispetto al momento in cui si sono studiate le prime classificazioni.

La modellazione del profilo di velocità del vento è importante in differenti contesti: deve essere, infatti, inclusa nella definizione dei dati di input per le condizioni al contorno nei modelli di cui si è discusso poco sopra. Ma questa modellazione ha anche una validità a sé stante: infatti, è necessaria anche per altri studi sulla dispersione degli inquinanti che vengono emessi all'interno dei canyon urbani (Tominaga and Stathopoulos 2016), come per la caratterizzazione del campo di moto al livello delle coperture degli edifici, per esempio per lo studio di innovative valutazioni energetiche

(Millward-Hopkins et al. 2013a), e per lo studio del comportamento strutturale degli edifici, soprattutto quelli con altezza rilevante (Tanaka et al. 2012).

Nell'UBL, al di sopra del UCL e in condizioni di stratificazione atmosferica neutra, la forma del profilo di velocità del vento in funzione della quota è generalmente definita attraverso l'equazione:

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right) \quad (1)$$

dove per  $\bar{u}$  si intende la componente media della velocità lungo la direzione di incidenza del vento,  $z$  rappresenta la quota rispetto al suolo,  $k$  è la costante di von Karman e  $z_0$  e  $z_d$  sono le grandezze caratteristiche oggetto della seguente trattazione.  $u_*$ , la velocità d'attrito, è definita in funzione dello sforzo tangenziale alla parete ( $\tau_0$ ): precisamente  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ , dove  $\rho$  indica la densità dell'aria.

$z_0$  è definita come la *rugosità*, o *scabrezza*, di una certa superficie investita da un flusso, e si tratta di una grandezza definita immediatamente e naturalmente nello studio dei flussi che lambiscono una parete: è infatti analoga alla scabrezza equivalente,  $\epsilon_e$ , che rappresenta attraverso un unico valore la dimensione caratteristica degli elementi di rugosità della parete, in generale variabili.

$z_d$ , lo *spessore di spostamento*, è invece un parametro definito in occasione dello studio dei flussi che lambiscono superfici con elementi di rugosità di dimensioni notevoli rispetto alla dimensione caratteristica del fenomeno. A livello teorico, lo spessore di spostamento è definito da:

$$z_d = \frac{1}{u_e} \int_0^\infty (u_e - \bar{u}) dz \quad (2)$$

dove  $u_e$  indica la velocità del flusso indisturbata, riferita a una quota in cui non si risente più dell'effetto della rugosità e dell'attrito alla parete, e  $z$  è la direzione verticale. Quindi lo spessore di

spostamento  $z_d$  si definisce attraverso la valutazione delle perdite di portata, dovute alla diminuzione di velocità per via dell'attrito alla parete, in una situazione ideale in cui tali perdite sono tutte concentrate entro una certa quota rispetto a  $z = 0$  per poi annullarsi (Jackson 1981). In un senso forse più intuitivo, lo spessore di spostamento si può considerare come l'altezza di una superficie formata ridistribuendo il volume degli ostacoli e delle zone di ricircolo che si formano nelle cavità tra essi (Macdonald et al. 1998). Come descritto più nel dettaglio in seguito, la rilevanza dell'analisi morfometrica in riferimento a questi temi deriva dalla possibilità di stimare i parametri fluidodinamici a partire dalla conoscenza dei descrittori geometrici dell'edificato urbano.

Infine, più recenti studi (Wong et al. 2010; Yuan et al. 2014) mettono in evidenza come la parametrizzazione schematica della morfometria urbana possa essere utilizzata per studi sulla ventilazione di larga scala, diversi dalle simulazioni fluidodinamiche. Generalmente, studi di questo tipo si svolgono sulla base della *least cost path analysis*. Si intende con questo termine la definizione del percorso di minimo costo tra un punto di partenza e uno di arrivo. A seconda del caso specifico, quindi, deve essere definito il costo considerato, e, dal punto di partenza, il percorso sino a quello di arrivo sarà determinato da una percorrenza in direzione del minore costo, rispetto a tutte le possibili (nei casi specifici di letteratura riportati, questo procedimento si implementa attraverso la discretizzazione del tessuto urbano analizzato e l'assegnazione ad ogni cella di un valore dell'Indice dell'Area Frontale  $\lambda_f$ , che verrà meglio definito al paragrafo successivo; disponendo del valore di  $\lambda_f$  in forma discreta distribuito su tutta l'area analizzata, questo può essere usato come costo per la costruzione del percorso). La valutazione di quali siano le zone in cui, tendenzialmente, il flusso proveniente da una certa direzione si incanala e di quali, invece, restano maggiormente isolate permette di individuare quelle più a rischio sia per un possibile accumulo di inquinanti che per la formazione dell'Isola di Calore Urbano, ovvero quel fenomeno per cui all'interno delle aree urbane si determina un microclima più caldo rispetto alle aree esterne e rurali, dovuto sia alla differente natura delle superfici antropizzate e ai materiali utilizzati, sia alle emissioni da traffico veicolare, processi industriali e impianti di condizionamento riscontrabili negli stessi centri.

### 1.3 Stato dell'arte dell'analisi morfometrica

In conseguenza della crescente rilevanza dei temi di cui si è discusso al paragrafo 1.2, l'analisi del tessuto morfometrico dei centri abitati acquista particolare importanza. Esiste quindi l'esigenza di rappresentare sinteticamente la geometria dei singoli edifici come anche la disposizione globale delle costruzioni di una certa zona. I *parametri morfometrici*, di cui si è già accennato in termini generici e di cui si darà una definizione rigorosa in questo paragrafo, raggruppano e schematizzano grandezze quali le altezze degli edifici e le distanze tra essi (da cui derivano anche le proporzioni tra ambiente costruito e spazio disponibile). L'importanza dei parametri morfometrici è dovuta anche al fatto che vari studi sperimentali propongono delle relazioni empiriche per la determinazione dei parametri fluidodinamici ( $z_d$  e  $z_0$ , introdotti al paragrafo 1.2) a partire da essi. Già i lavori pionieristici in materia (Oke 1988; Grimmond and Oke 1999) sottolineano la dipendenza delle condizioni di moto dalla morfologia dei centri urbani, e definiscono (o, per alcuni casi, riportano) sia i fondamentali parametri morfometrici che le equazioni empiriche per il calcolo di quelli fluidodinamici. Questi e gli studi a seguire si basano su una schematizzazione dell'edificato: le grandezze che definiscono i rapporti tra gli edifici sono riferite, idealmente, a ognuno di essi considerato singolarmente, mentre nella pratica il calcolo si effettua considerando estensioni, per certi versi arbitrarie, che spesso considerano più di un singolo edificio. Idealmente, comunque, il valore attribuito ai parametri è riferito all'elemento della suddivisione territoriale scelta.

Le grandezze fondamentali attraverso le quali si definiscono i parametri morfometrici sono descritti nell'elenco qui di seguito e schematizzati (si descrivono qui sia i parametri morfometrici in senso stretto, cioè quelli riferiti all'elemento "edificio e area di pertinenza", sia quelli che descrivono la forma dei canyon urbani).

- $H$ : altezza media degli edifici della zona considerata [m];
- $w_c$ : larghezza del canyon, cioè distanza tra gli edifici che lo formano [m];
- $w_b$ : larghezza degli edifici che compongono il canyon, in senso trasversale allo stesso [m];

- $A_P$ : area planimetrica coperta dagli edifici sulla suddivisione territoriale scelta (idealmente, di ciascun edificio) [m<sup>2</sup>];
- $A_F$ : area frontale degli edifici sulla suddivisione territoriale scelta, perpendicolarmente a una certa direzione di provenienza del vento [m<sup>2</sup>];
- $A_T$ : area totale dell'elemento della suddivisione territoriale [m<sup>2</sup>].

Si possono, così, definire alcuni indici su cui si poggia la discussione di seguito:

- $RF_c$ : rapporto di forma riferito al canyon [-];
- $RF_e$ : rapporto di forma riferito all'edificio [-];
- $\lambda_p$ : indice dell'area planare [-];
- $\lambda_f$ : indice dell'area frontale [-];

questi indici sono definiti dalle seguenti relazioni:

$$RF_c = \frac{w_c}{H} \quad (3)$$

$$RF_e = \frac{w_b}{H} \quad (4)$$

$$\lambda_p = \frac{A_P}{A_T} \quad (5)$$

$$\lambda_f = \frac{A_F}{A_T} \quad (6)$$

Inoltre, è possibile una distinzione: per sua natura, infatti,  $\lambda_p$  è indipendente dalla direzione del vento, viceversa  $\lambda_f$  presenta una variabilità in funzione di essa: si possono quindi definire un indice dell'area frontale medio su tutte le direzioni,  $\bar{\lambda}_f$ , e uno riferito invece a una specifica direzione del vento,  $\lambda_{f\,dir}$ .

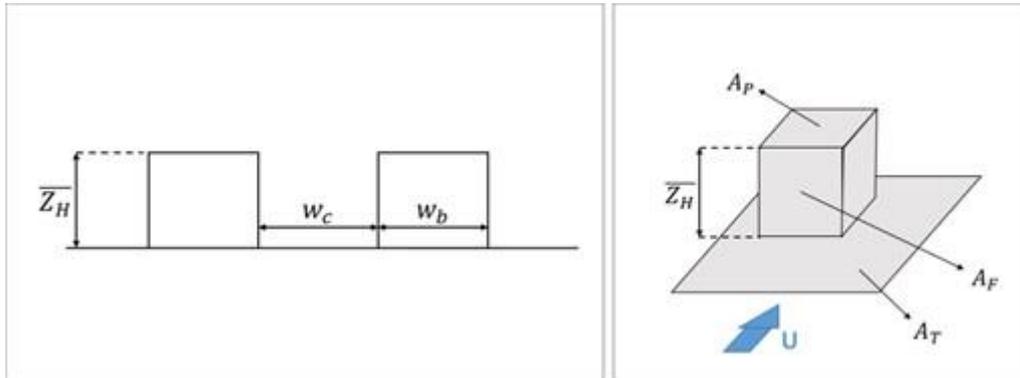


Figura 2: Schematizzazione degli elementi base di riferimento per l'analisi morfometrica.

Il legame tra la velocità del vento in funzione della quota e la morfologia del centro urbano è stabilito da quello tra i parametri fluidodinamici e quelli morfometrici: questo è generalmente espresso attraverso delle relazioni empiriche ricavate durante lo svolgimento di studi sperimentali in galleria del vento. Tra quelle presentate nello studio, quelle maggiormente utilizzate sono quelle di Macdonald et al. (1998), in quanto ricavate in condizioni sperimentali che meglio simulassero la morfologia urbana. Infatti, mentre le configurazioni sperimentali utilizzate nei lavori precedenti a quello di Lettau (1969) riproducevano ostacoli vegetali o disposizioni ordinate di elementi regolari per la schematizzazione degli edifici, in quest'ultimo si è indagato il comportamento del profilo di velocità del vento rispetto a una configurazione di elementi regolari disposti in maniera irregolare, come usualmente succede per le file o i blocchi di edifici in ambito urbano. MacDonald riesamina la formulazione di Lettau, così come descritto al paragrafo 2.4, per superare la limitazione, riconosciuta dalla comunità scientifica, nella non buona applicabilità delle sue equazioni in condizioni di densità degli edifici tali da portare  $\lambda_p > 0.3$ , e per includere lo stesso  $\lambda_p$  nelle relazioni, assicurandone un carattere più generalizzabile e ottenendo le relazioni che ancora oggi sono tra quelle maggiormente utilizzate in ambito urbano (Kent et al. 2018).

Le equazioni di MacDonald sono le seguenti:

$$\frac{z_d}{H} = 1 + \alpha^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1) \quad (7)$$

$$\frac{z_0}{H} = \left(1 - \frac{z_d}{H}\right) \exp \left\{ - \left[ 0.5\beta \frac{C_D}{k^2} \left(1 - \frac{z_d}{H}\right) \lambda_f \right]^{-0.5} \right\} \quad (8)$$

in cui  $\alpha$  e  $\beta$  sono coefficienti empirici e  $C_D$  è il coefficiente di resistenza. Gli autori suggeriscono i valori, rispettivamente, di 4.43, 1.0 e 1.2.

Benché forse la più opportuna per essere utilizzata ai fini di un'analisi teorica del fenomeno, la coppia di equazioni di MacDonald per la definizione del profilo di velocità del vento non è l'unica a poter essere utilizzata. Per completezza, in questo paragrafo si riportano alcune delle altre equazioni maggiormente utilizzate nell'ambito, nonostante tra i risultati si riportino solo quelli relativi all'utilizzo delle equazioni di MacDonald, che si sono rivelati, come previsto, i più rappresentativi. Il riferimento principale da un punto di vista "storico" resta il lavoro di Grimmond and Oke (1999). Recenti sviluppi e altre formulazioni vengono discusse in Kent et al. (2018); tuttavia, si utilizzano specifici dati e informazioni, non disponibili per i casi studio presentati in questo lavoro.

La più semplice delle formulazioni prevede l'associazione diretta di  $z_d$  e  $z_0$  al valore dell'altezza media  $H$ , attraverso una relazione lineare e secondo due coefficienti, indicati rispettivamente con  $f_d$  e  $f_0$  (relazione detta di *Rule of thumb*).

$$R_t z_d \qquad z_d = f_d H \quad (9)$$

$$R_t z_0 \qquad z_0 = f_0 H \quad (10)$$

I valori dei coefficienti empirici  $f_d$  e  $f_0$  sono estrapolati da osservazioni sperimentali e riportati in Tabella 1. È importante specificare che, in realtà, relazioni lineari del tipo della (9) e della (10) sono state sviluppate in riferimento a superfici naturali, e i valori riportati in Tabella 1

sono da considerarsi come valide approssimazioni per la rappresentazione di superfici generiche; tuttavia, non si riscontrano validazioni specifiche su superfici urbane né del tipo di equazione né dei valori proposti per i coefficienti.

*Tabella 1: valori dei coefficienti empirici  $f_d$  e  $f_0$  per le equazioni (9) e (10) secondo diversi autori.*

Autore	$f_d$	$f_0$
Garratt (1994)	0.67	0.10
Raupach (1992)	0.64	0.13
Raupach (1992)	0.80	0.06
Hanna and Chang (1992)	0.50	0.10

Esempi di relazioni più complesse sono quelle di Kutzbach (1961) e Counihan (1971), in cui si tiene conto delle posizioni reciproche tra gli edifici attraverso il parametro  $\lambda_p$ . Le prime sono derivate da prove su una superficie ghiacciata, con elementi di rugosità che rispettassero specifiche condizioni di regolarità della forma, ovvero che  $\lambda_p \cong \lambda_f = \lambda_x < 0.29$ , e sono riportate di seguito:

$$K_u z_d \quad z_d = \lambda_x^{0.29} H \quad (11)$$

$$K_u z_0 \quad z_0 = \lambda_x^{1.13} H \quad (12)$$

Le ultime sono invece ricavate a partire da prove condotte in galleria del vento, e sono differenziate in relazione alla densità ( $\lambda_p$ ) degli elementi; le equazioni proposte e i limiti per  $\lambda_p$  proposti dall'autore sono:

$$C_o z_d \quad z_d = (1.4352\lambda_p - 0.0463)H \quad (13)$$

$$C_o z_0 \quad z_0 = (1.08\lambda_p - 0.08)H \quad (0.1 < \lambda_p < 0.25) \quad (14)$$

$$C_o z_0 \quad z_0 = \left( C_1 + \sum_{j=2}^{10} C_j \lambda_p^{j-1} \right) H \quad (0 < \lambda_p < 0.5) \quad (15)$$

e i valori proposti per i coefficienti sono, a partire da  $C_1$  e aumentando progressivamente il pedice: 0.02677, 1.3676, 15.98, 387.15, -4730, 32057, -124308, 27162, -310534, 14444.

Infine, in Bottema (1995, 1996) si propone un metodo esplicitamente calibrato per aree urbane, da utilizzarsi nei casi in cui il flusso non è perpendicolare allo sviluppo prevalente degli edifici, e richiede informazioni circa l'altezza e l'area di questi ultimi.

$$B_a z_d \quad z_d = \left[ \frac{\sum A_{pb} + \sum (1-p)A_{pt}}{A_T} \right]^{0.6} H \quad (16)$$

$$B_a z_0 \quad z_0 = (H - z_d) \exp \left[ - \frac{0.4}{\left( 0.5 \frac{\sum C_{db} L_{yb} H_b + \sum C_{dt} L_{yt} H_t}{A_T} \right)^{0.5}} \right] H \quad (17)$$

In cui il pedice  $b$  si riferisce agli edifici, mentre il pedice  $t$  alla vegetazione.  $p$  è il coefficiente di porosità per gli alberi, e con  $C_d$  si intende il coefficiente di resistenza aerodinamica.  $L$ , infine, è la dimensione orizzontale degli elementi di rugosità.

#### 1.4 Lo stato attuale dello studio dei profili di velocità

Rispetto alla consuetudine descritta nell'interpretazione dei profili di vento e dei parametri fluidodinamici, si possono segnalare alcune importanti discussioni in merito alla possibilità di modificare l'uso classico delle equazioni (1), (7) e (8). In particolare, si individuano i lavori di Pelliccioni et al. (2015), importante anche perché riferito ai dati sul campo su cui si basa anche una delle analisi riportate nel seguito, Ricci et al. (2017), in cui si riportano delle analisi sui risultati relativi a delle prove in galleria del vento su un modello in scala di un certo settore della città di Livorno, e di Kent et al. (2019), in cui si analizza la sensitività delle equazioni derivate in Kanda et al. (2013) rispetto al tipo di dato in ingresso utilizzato per le altezze degli edifici.

L'idea alla base del primo studio (Pelliccioni et al. 2015) è la seguente: rifacendosi anche a interpretazioni e evidenze di risultati precedenti su studi degli effetti delle forme degli alberi di alcune foreste sul flusso sovrastante, in cui si mostra come si possa ricavare un profilo senza discontinuità tra RSL e ISL (Harman and Finnigan 2007), è possibile interpretare la rugosità  $z_0$  come grandezza variabile con la quota. Assumere, nella formulazione classica, un'indipendenza dalla quota, definendo un nuovo parametro (di cui si vogliono studiare le caratteristiche)  $z_{0L}$ , significa che:

$$\frac{dz_{0L}}{dz} = 0 \quad (18)$$

cioè una dipendenza di ordine 0 rispetto alla quota. Stabilendo, invece, una relazione del primo ordine, la sua forma più generale può essere espressa come:

$$\frac{dz_{0L}}{dz} = \beta' z_{0L} + \gamma' \quad (19)$$

con  $\beta'$  e  $\gamma'$  generiche costanti, che si può integrare separando le variabili:

$$\int_{z_{0s}}^{z_{0L}} \frac{dz_{0L}}{\beta' z_{0L} + \gamma'} = \int_0^z dz \quad (20)$$

in cui  $z_{0s} = z_{0L}|_{z=0}$ . La risoluzione della precedente porta a:

$$z_{0L}(z) = \left( z_{0s} + \frac{\gamma'}{\beta'} \right) \exp(\beta' z) - \frac{\gamma'}{\beta'} \quad (21)$$

Sostituendo  $\alpha = z_{0s} + \frac{\gamma'}{\beta'}$ ,  $\beta = -\beta'$ ,  $\gamma = \frac{\gamma'}{\beta'}$  e  $L_C = \frac{1}{\beta'}$ , si ottiene la forma più semplice:

$$z_{0L}(z) = \alpha \exp\left(-\frac{z}{L_C}\right) + \gamma \quad (22)$$

Quindi  $z_{0L}$  contiene un contributo invariante, indipendente dalla quota e rappresentante il complesso degli elementi di rugosità<sup>2</sup> e un termine variabile con la quota dipendente, tra gli altri, da

---

<sup>2</sup> E, se non matematicamente, quantomeno per significato assimilabile a  $z_d$  (n.d.a.).

un parametro  $L_C$  che può rappresentare la rugosità locale della superficie. Con queste assunzioni, la forma finale del profilo di velocità risulta:

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{\alpha \exp\left(-\frac{z}{L_C}\right) + \gamma} \right) \quad (23)$$

Gli autori, a seguito di una campagna di monitoraggio condotta all'interno del parco di Villa Pamphili, a Roma, utilizzando un sistema RASS/SODAR, hanno collezionato un insieme di dati su intensità e direzione del vento per un'estensione longitudinale compresa tra la quota del suolo e i 200 m di altitudine, con una risoluzione spaziale di 20 m e temporale di 10 minuti; la strumentazione a disposizione comprendeva anche due anemometri tri-assiali posti alla quota di 10 m rispetto al livello del piano di campagna e due termistori, uno alla quota di 1,6 m e l'altro alla quota di 10 m, che hanno consentito la misura della temperatura dell'aria. La frequenza di acquisizione degli anemometri era pari a 4 Hz. La campagna si è svolta da giugno 2006 a luglio 2007. La selezione dei profili ricadenti in condizione di stratificazione neutra si è condotta grazie ai valori registrati di temperatura. Secondo questo criterio, sul totale dei dati a disposizione si sono isolati 36 profili, che si sono utilizzati per costruirne uno rappresentativo, quota per quota, del valore medio della velocità del vento per il periodo e per le condizioni considerate. Questo si è poi confrontato con quello risultante dal modello costruito seguendo la trattazione teorica sopra riportata, e con quelli risultanti dai modelli più comunemente utilizzati in letteratura, come di seguito specificato. Il modello di Pelliccioni et al. (2015) è in accordo con le osservazioni; inoltre, lo è maggiormente rispetto ad alcune delle formulazioni classiche attualmente utilizzate, come si può osservare anche in Figura 3, in cui vengono riportati i profili determinati attraverso l'equazione degli autori dello studio in questione (NM) e attraverso le altre attualmente utilizzate: MGH98 per Macdonald et al. (1998), GO99 per Grimmond and Oke (1999), KR04 per Kastner-Klein and Rotach (2004), CC02 per Cheng and Castro (2002), utilizzate dagli autori per la ricostruzione dei profili verticali di velocità del vento ai fini di un confronto con lo stato dell'arte della formulazione da loro proposta. L'ultima opzione è inoltre studiata considerando  $u_*$  mediata su tutto lo strato superficiale (CC02\_SL) o riferita alla quota  $z_{ref} =$

10 m (CC02\_zref). Ad ogni modo, è necessario considerare alcuni aspetti. In Ricci et al. (2017), la dipendenza dalla quota e il ri-calcolo dei parametri si riconduce al fatto che, per alcuni profili, i punti sperimentali più vicini al suolo si trovano all'interno dell'UCL piuttosto che del RSL (elemento di incertezza, considerato che non si aveva a disposizione nessun mezzo per la determinazione delle altezze degli strati). I due studi di cui si è discusso non avevano l'obiettivo di definire le modalità specifiche con cui la morfometria del tessuto urbano influenza il campo di moto, quanto piuttosto quello di confrontare l'utilizzo di differenti equazioni per il profilo di velocità del vento l'uno e verificare attraverso prove sperimentali alcune assunzioni l'altro. Di conseguenza, i coefficienti sono stimati proprio dalla regressione dei dati disponibili rispetto all'equazione stabilita. Questi parametri stimati sono in effetti validi per il sito in esame, ma non si intendono trasferibili ad altri contesti. Scopo della parte di lavoro descritto più avanti in riferimento ai profili di velocità (paragrafi 2.3, 3.3, 3.4, 4.4 e 4.5) è, invece, quello di determinare nella maniera più precisa possibile l'influenza degli elementi di rugosità sul profilo verticale di velocità, considerando l'idea proposta dagli autori di una differente interpretazione della rugosità in relazione alla quota considerata. L'idea di un' influenza sempre minore all'aumentare della quota apre certamente un importante spazio di riflessione. In particolare, come meglio esposto più avanti, si può investigare su come vari la distanza reciproca tra gli elementi che viene "avvertita" dal flusso alle differenti quote, e come quindi, in sostanza, si possano "aggregare" gli elementi di rugosità. Il fatto che, stando alle conoscenze attuali (Kent et al. 2019) non si siano considerate, da un punto di vista generale, gli effetti della variazione con la quota, lascia aperta la discussione.

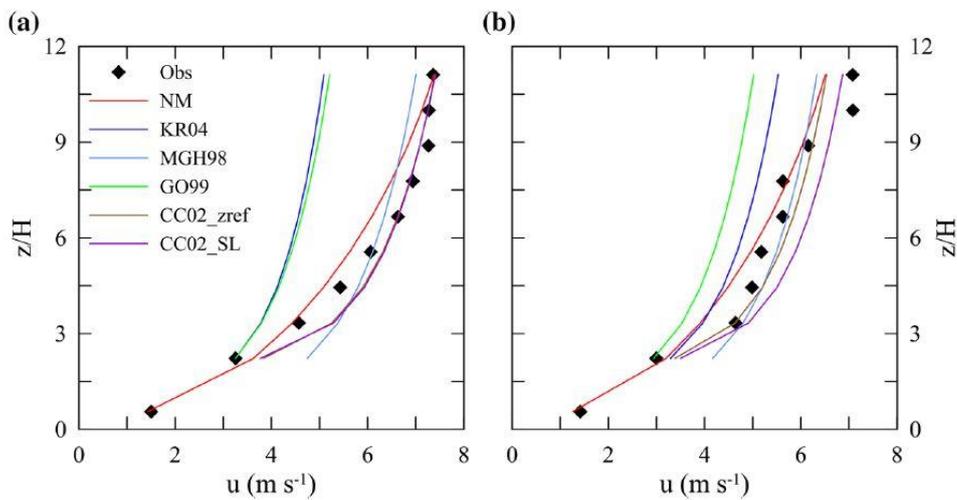


Figura 3: confronto tra la formulazione di Pelliccioni et al., le osservazioni, e le formulazioni classiche per il profilo verticale di velocità. Per l'interpretazione dei diversi profili e della legenda vedere il testo (paragrafo 1.4). Tutti i profili in figura sono riportati da (Pelliccioni et al. 2015).

## 1.5 Obiettivi

Gli obiettivi che ci si pone nello sviluppo della tesi sono legati a contribuire al miglioramento delle capacità previsionali degli strumenti modellistici attualmente a disposizione. Si intendono qui tutti quelli indicati, che coinvolgono sia lo studio della qualità dell'aria a varie scale che la modellazione del profilo del vento in area urbana. Si è riscontrato che, per entrambe le tematiche, esistono differenti possibilità per la suddivisione territoriale a partire dalla quale si calcolano i parametri morfometrici e, di conseguenza, quelli fluidodinamici. L'intento è, quindi, quello di valutare differenti metodi per questa suddivisione territoriale. Si propongono, in particolare, una suddivisione basata sul grafo stradale della zona di interesse, e una basata su presupposti geometrici, in grado di assegnare a ogni edificio una sua area di pertinenza. Le prove condotte consistono nell'applicazione di queste ai campi che si sono elencati al paragrafo 1.2, al fine di analizzare in quali possa portare un contributo nel miglioramento della descrizione delle caratteristiche del tessuto urbano e quali siano, invece, i limiti insiti. Questo aspetto si traduce, quindi, in particolare nello studio di un diverso tipo di griglia utilizzato per le analisi territoriali, rispetto a quelle generalmente accettate attualmente, per lo più regolari e derivanti da suddivisioni predisposte per l'uso dei modelli.

Inquadrato in una tematica più larga della ricerca di una correlazione tra le caratteristiche peculiari del tessuto urbano e la qualità dell'aria in quello stesso centro, la scelta della migliore parametrizzazione delle superfici urbane riveste un ruolo chiave, in quanto presupposto per i successivi passi dello studio, e fornire una migliore rappresentatività del dato in ingresso porta a un miglioramento dell'intero processo. Infatti, nello studio della microclimatica urbana, della respirabilità e dei fenomeni correlati all'aerodinamica in ambito urbano, uno dei maggiori ostacoli rimane, ancora attualmente, la determinazione di grandezze quali  $\lambda_f$  e RF (Jhaldiyal et al. 2018).

Da quanto esposto si possono individuare alcune questioni aperte su cui è possibile indagare, riportate nel seguente elenco.

- Come calcolare  $z_0$  nelle diverse zone, qualora quella di interesse non risultasse ascrivibile alle classi individuate in (Wieringa 1992), o a classificazioni più recenti?
- Come stabilire quale metodo di calcolo per  $z_0$  e  $z_d$ , in particolare in riferimento alla suddivisione territoriale, sia il più adatto per la descrizione del profilo di velocità del vento in funzione della quota all'interno di un certo centro urbano?
- È possibile una classificazione che consenta un'associazione speditiva di un valore di  $z_0$  ad una certa area, in maniera più specifica di quanto proposto nelle classificazioni esistenti?
- È possibile ottenere una rappresentazione precisa e dettagliata (nel senso di scala alla quale si riferisce il dato) dei parametri descrittivi dei canyon urbani per un generico tessuto urbano?

## 2 Metodi

### 2.1 Analisi morfometriche

In riferimento all'elenco conclusivo di questioni al paragrafo 1.5, alcuni degli aspetti affrontati su cui ci si è concentrati sono il tipo e la forma di griglia più idonea per la rappresentatività dei valori e la possibilità di una classificazione di tessuti urbani caratterizzati da valori simili. Si sono predisposti gli strumenti necessari per effettuare le analisi morfometriche dei tessuti urbani a un qualunque caso studio di cui si abbia a disposizione il dato sulle altezze degli edifici, in riferimento ai parametri precedentemente elencati e descritti<sup>3</sup>. Questa è, infatti, una base essenziale per ogni tipo di indagine sulla morfologia urbana. Le elaborazioni dei parametri morfometrici si svolgono sul dato iniziale dei Modelli Digitali delle Superfici (Digital Surface Models, DEMs) (Ratti and Richens 2004). Attualmente in letteratura vengono utilizzate delle griglie regolari per la suddivisione del territorio (Ratti et al. 2002, 2006; Burian et al. 2002). Questo fatto non deve stupire, dal momento che è proprio il criterio utilizzato per la suddivisione del dominio per la modellazione di mesoscala (in sostanza, la stessa partizione territoriale utilizzata per la risoluzione delle equazioni del moto è utilizzata anche ai fini della caratterizzazione). Al dominio regolare dei modelli di mesoscala, però, si possono in effetti associare le statistiche dei parametri calcolate in differenti maniere, e, in generale, il tipo di griglia utilizzato influenza sicuramente la descrizione sintetica del centro considerato. Come descritto, attualmente la tendenza è quella di considerare valori univoci dei parametri morfometrici e di  $z_0$ , di conseguenza, per classi di tessuto urbano. È però necessario tenere in considerazione anche altri possibili sviluppi e differenti metodi per la ricostruzione tridimensionale dei tessuti urbani, almeno in forma di dato distribuito su grigliato (Li et al. 2020); tuttavia al momento queste tecniche permettono di raggiungere risoluzioni non sufficienti per un impiego su scala ridotta.

---

<sup>3</sup> A questo proposito, un utile database è quello relativo al progetto Copernicus: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/building-height-2012>.

Le prime analisi svolte, riportate per esteso ai paragrafi 3.1 per la descrizione del caso studio e 4.1 per la discussione dei risultati, sono riferite a un algoritmo di calcolo fondato sulla disponibilità di due tipi di dato. Oltre il già citato DEM della zona considerata, infatti, è necessario anche il dato di tipo vettoriale relativo agli elementi stradali del centro urbano. Questo è generalmente reperibile da varie fonti<sup>4</sup>, ed è rilevante sia ai fini della suddivisione territoriale per il calcolo di  $\lambda_p$  e  $\lambda_f$  sia per il calcolo di  $RF_c$  e  $RF_b$  e, in generale, dei parametri relativi ai canyon urbani. Trovandosi in forma vettoriale, nello specifico, è possibile disporre dell'insieme dei tratti stradali suddivisi in diversi elementi lineari. A partire da questi, è possibile sia creare dei poligoni che possono essere utilizzati per la definizione delle aree di pertinenza degli edifici (chiamati *isolati*), che utilizzare questi stessi elementi per analizzare le distanze, in senso perpendicolare rispetto all'asse stradale, tra gli edifici che si affacciano a quel tratto stradale e le altezze di questi ultimi, al fine di poter determinare i rapporti di forma. Alcune specifiche sul calcolo dei parametri  $\lambda_p$  e  $\lambda_f$  sono riportate all'appendice A.

In riferimento al primo punto, è necessario specificare che basarsi su dati geospaziali vettoriali creati in contesti diversi da quello dello studio morfometrico delle superfici urbane porta a delle variabilità intrinseche degli elementi poligonali che si possono costruire a partire dal grafo stradale cittadino. Infatti, considerando ogni poligono creato dai cicli semplici estraibili dal grafo stradale<sup>5</sup>, alcuni di essi includeranno un solo edificio, secondo quanto comunemente inteso nella definizione delle aree di pertinenza come da letteratura (Grimmond and Oke 1999), mentre altri ne comprenderanno diversi, deviando dalla concezione usuale. Ne è un esempio quello riportato in Figura 4, tratto dalla città di Cagliari, e racchiuso entro il tracciato giallo. Si può notare come, nonostante all'interno della zona non si trovino elementi stradali, gli edifici siano distanti tra loro e, in conformità alla descrizione dell'area di pertinenza data poco sopra, dovrebbero essere considerati

---

<sup>4</sup> Per esempio dal sito web di *OpenStreetMap*.

<sup>5</sup> Si intende con ciclo semplice una catena che unisce un insieme di nodi e non passa mai due volte per lo stesso, secondo l'usuale glossario della teoria dei grafi.

separati. In riferimento all'ultimo punto, invece (analisi delle distanze delle facciate degli edifici rispetto all'asse stradale), l'approccio è per certi versi simile a quello descritto in Jackson et al. (2016), in termini anzitutto di tipologia di dato utilizzato: a partire dall'informazione vettoriale sulla posizione e sulle caratteristiche geometriche di strade ed edifici e dell'informazione circa le altezze di questi ultimi rispetto al piano stradale, gli autori hanno infatti ricostruito i parametri dei canyon per la città di Londra. Un'idea ripresa anche nei metodi proposti in questa tesi è in particolare quella di fissare, rispetto all'asse stradale, un'estensione massima di ricerca per le facciate degli edifici, oltre la quale si deduce automaticamente che la sezione stradale considerata non fa parte di un canyon urbano, ma ricade in altre tipologie di elementi quali ad esempio le piazze. Di fatto, come riportato anche in seguito, la definizione a priori di questa estensione massima non solo costituisce un punto aggiuntivo di arbitrarietà nell'analisi, ma è anche di difficile applicazione, dovendo variare in base alla zona urbana considerata e alle sue estensioni specifiche dei canyon.



*Figura 4: esempio di una zona (all'interno del tracciato giallo) che non viene suddivisa in isolati a causa della mancanza della rete stradale (in verde) al suo interno, nonostante gli edifici siano separati tra loro. Tratto da una panoramica sulla città di Cagliari. Scala 1:6000.*

L'individuazione degli elementi necessari per la caratterizzazione dei canyon urbani è riportata in Figura 5. I dati sulle altezze degli edifici possono essere trasferiti dal raster a un vettoriale che raggruppa i valori simili e contigui all'interno di diversi poligoni. A partire dal riferimento dell'asse stradale (in giallo in figura), è possibile tracciare le perpendicolari e individuare i punti di

intersezione tra queste e entrambi gli edifici che formano il canyon; sia i più vicini (in rosso) che i più lontani (in verde), intesi come i punti che demarcano l'interruzione di continuità della parete dell'edificio e la presenza di uno spazio vuoto. Sulla base di queste informazioni, le distanze sono definite come quelle tra i punti rossi di una certa sezione ( $w_c$ ) e tra i punti verdi e rossi, considerati in due coppie contigue ( $w_b$ ). Determinati i punti di intersezione, è possibile determinare anche le altezze degli edifici.

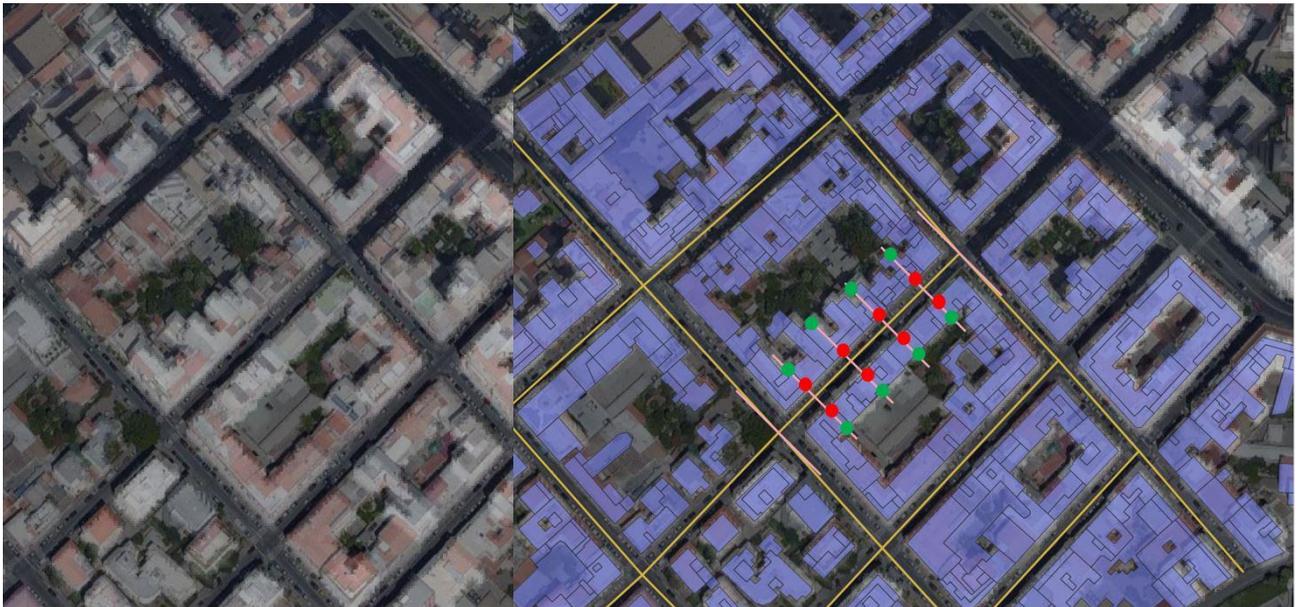


Figura 5: individuazione degli elementi per il calcolo dei rapporti di forma del canyon urbano dai dati geospaziali. Per la descrizione approfondita vedere il testo.

## 2.2 Evoluzione dell'analisi della morfometria urbana, necessità di maggiore rigore e generalizzazione

I risultati ottenuti attraverso il metodo al paragrafo 2.1 sono in generale rappresentativi dei casi studio considerati e descritti in seguito, conferendogli attendibilità. Tuttavia questo è, per alcuni aspetti, poco efficiente e non si presta a una generalizzazione per una applicazione ad altri contesti. La prima difficoltà che si incontra attenendosi a questo procedimento è quella relativa alla definizione rigorosa di *canyon urbano* quando si analizzano i dati relativi a un certo tessuto. Infatti,

soprattutto quando le statistiche di interesse sono quelle relative alla lunghezza dei canyon, parametro utilizzato per alcune applicazioni della teoria dei canyon urbani (Samsonov et al. 2015), una definizione e individuazione dei punti terminali precisa degli elementi considerati è essenziale. Nelle analisi svolte seguendo il metodo precedentemente descritto (paragrafo 2.1) e di cui i risultati sono riportati al paragrafo 4.1, questo inconveniente si è potuto trascurare a causa dell'interesse generale sulle statistiche riconducibili, in definitiva, alle altezze che si affacciano al canyon stesso e alla sua larghezza. Infatti, considerando la distribuzione dei valori di questi parametri entro una zona di indagine definita (che può intendersi come una zona urbana estesa o come aree di minore estensione per le quali si svolge una analisi specifica), la precisa suddivisione in elementi canyon perde rilevanza. È chiaro, invece, che quando l'intento è quello dello studio della statistica delle lunghezze, la suddivisione del grafo in elementi che ben rispecchiano le caratteristiche della definizione comune di canyon è essenziale. Ne consegue la necessità di trattare la derivazione dei parametri del canyon secondo un punto di vista differente rispetto a quanto si è svolto in precedenza, cioè il calcolo di RF per una intera estensione di tessuto urbano e in funzione della direzione (Ratti et al. 2006; Jhaldiyal et al. 2018). Un aspetto innovativo dell'approccio proposto è infatti quello della possibilità di restituire ogni singolo canyon isolato, corredato dei valori dei parametri riferiti esclusivamente ad esso, e associabili anche in termini di valor medio.

Il secondo ostacolo riguarda la necessità, riferendosi a questo protocollo, della definizione del raggio di ricerca per la presenza di edifici rispetto all'asse stradale. Il processo prevede di analizzare ogni tratto, e verificare quali edifici si affaccino ad esso. A questo scopo, si possono ricercare gli edifici che ricadono entro una certa estensione costruita intorno all'asse stesso (una zona di *buffer*), e il raggio di estensione deve essere definito dall'utente. È difficile definire un simile parametro in partenza, essendo piuttosto individuabile proprio successivamente allo svolgimento dei calcoli e di analisi preliminari. Conseguentemente, non è detto che il valore assegnato al raggio di ricerca consenta effettivamente di individuare tutti gli edifici interessati per tutti i canyon analizzati.

Ai fini di una definizione rigorosa degli estremi del canyon urbano e della sua forma, è necessaria una struttura più formale per l'analisi dei dati del DEM, e di conseguenza trattare i canyon

da un punto di vista *topologico*, piuttosto che semplicemente considerare ogni elemento vettoriale di un grafo stradale già disponibile e analizzare un'area intorno ad esso. Nel contesto di cui si sta trattando, la necessità è quella di individuare con precisione i canyon urbani a partire da delle immagini o dai DEM a disposizione per l'area interessata, ed è quindi naturale che anzitutto si consideri la possibilità di trattare il dato utilizzando le attuali tecniche disponibili di *deep learning* per l'analisi delle immagini attraverso l'utilizzo di algoritmi di intelligenza artificiale. La letteratura scientifica, però, suggerisce che l'applicazione di tali tecniche possa portare attualmente al raggiungimento di ottimi risultati, incoraggianti per l'utilizzo di questi strumenti nello studio della morfologia urbana, ma non ancora sfruttabili per l'individuazione di oggetti come i canyon urbani. Nello specifico, piuttosto che per questo scopo, che porterebbe un notevole vantaggio nel successivo calcolo preciso delle statistiche, l'analisi di immagini è utilizzata oggi per una caratterizzazione in classi discrete dei canyon sulla base di alcuni valori soglia per i rapporti tra altezza e larghezza, simmetria e tipologia di elemento stradale (ad esempio, sopraelevata o viadotto). Stando alle informazioni a disposizione, analisi di questo tipo sono le più recenti che si sono sviluppate (Hu et al. 2019); considerate le difficoltà che tutt'ora si incontrano nell'addestramento delle macchine (nello studio citato si è utilizzata la rete neurale DenseNet) e la quantità di specifiche richieste per lo svolgimento del compito di riconoscimento da immagine, si è scelto di procedere per un'altra via.

Il metodo utilizzato per questo lavoro si basa sulle informazioni iniziali contenute nel DEM della zona considerata, e solo su quelle. Infatti, una volta definiti i poligoni degli edifici sulla base dell'aggregazione dei pixel contigui con valore di altezza diverso da quello riferito al piano stradale, è possibile definire attorno ad essi un'area di competenza in base a criteri geometrici e, successivamente, ricavare un grafo di cui gli archi rappresentano i canyon urbani, o gli assi stradali, e i nodi gli incroci. Come dettagliato al paragrafo seguente, la rappresentazione attraverso archi e nodi (di un grafo) di assi stradali e incroci permette di ottenere degli oggetti costituiti da sotto-matrici del DEM della zona urbana considerata, che individuano un canyon urbano rispettando alcune regole generali che, in questo lavoro, si sono definite sulla base degli usi più frequenti delle parametrizzazioni dei canyon urbani.

Anzitutto, si nota che è possibile individuare gli assi stradali conseguentemente alla costruzione delle aree di pertinenza intorno agli edifici. La definizione dei Poligoni di Voronoi attorno agli edifici è descritta e utilizzata in letteratura per differenti scopi: dalla suddivisione territoriale per analisi urbanistiche (Löwe et al. 2019) all'applicazione per studi sulla ventilazione (Gál and Unger 2009), sulla modellistica aerodinamica di microscala (Ketterer et al. 2017) e di mesoscala (Simón-Moral et al. 2020). La definizione usuale dei poligoni di Voronoi  $V$  è data per un insieme di punti  $P$  su un piano<sup>6</sup>, e ogni poligono  $V_0$ , associato a un punto  $P_0$ , racchiude tutti i punti del piano che sono più vicini a  $P_0$  rispetto a qualunque altro elemento dell'insieme  $P$ . L'estensione di questo concetto per la costruzione di  $V$  attorno a delle linee poligonali chiuse  $L$  è possibile grazie alla discretizzazione della linea poligonale  $L_0$  in punti che giacciono su essa. Il poligono  $V_0$  associato a  $L_0$  può essere definito dall'involuppo di tutti i poligoni  $VP_{0i}$  associati ai punti  $P_{0i}$  che compongono la poligonale  $L_0$ . Utilizzando questo strumento anche in ambito della definizione dei canyon urbani, è possibile individuare gli assi stradali proprio in conseguenza del fatto che i lati di questi metapoligoni coincidono con la linea che separa i punti più vicini a un edificio da quelli più vicini all'altro, e può quindi essere a buona ragione interpretata come asse stradale. A partire dai poligoni intorno agli edifici, è possibile costruire un grafo in cui gli archi sono i lati di questi poligoni, con gli estremi formati dalle intersezioni con i lati dei poligoni associati ad altri edifici, e i nodi posti in corrispondenza di questi stessi incroci. È possibile quindi dare una serie di definizioni, in modo tale da disporre di un insieme di "regole" a cui il canyon, per come è qui inteso, debba sottostare. Con la Figura 6 e la Figura 7 si ripercorrono graficamente i criteri qui elencati.

- Ogni canyon urbano è definito univocamente da uno e un solo arco del grafo precedentemente descritto (in Figura 6 (a) si riportano gli elementi risultanti

---

<sup>6</sup> Chiaramente la definizione generale è data per uno spazio  $n$ -dimensionale, ma qui ci si limita a descrivere brevemente il caso bidimensionale per semplicità e perché è quello che effettivamente viene considerato.

dall'applicazione della procedura, ognuno con un colore differente per evidenziare la precisa estensione).

- Gli edifici che formano ogni canyon sono sempre soltanto 2, ovvero quelli di cui i poligoni di pertinenza hanno in comune il lato corrispondente all'arco considerato: nessun altro edificio viene considerato (in Figura 6 (c) si riporta un focus su un esempio, in cui si può notare come, per l'arco viola al centro dell'immagine, gli edifici correlati siano solo quelli contrassegnati con i numeri 1 e 2 in giallo).
- Ogni canyon ha lunghezza massima pari alla distanza tra i punti terminali (nodi) dell'arco di riferimento. Nel caso in cui gli edifici si estendano oltre questi confini, il canyon di riferimento è formato da un'altra coppia di edifici, di cui uno solo è tra quelli pertinenti all'arco considerato. In caso di estensione minore, invece, i limiti del canyon sono posti in corrispondenza degli ultimi punti in cui sia garantita la presenza contemporanea di entrambi gli edifici: per ultimi si intende iniziando a contare dal centro (longitudinale) del canyon, e la presenza contemporanea si intende valutata per ogni sezione sviluppata a partire dall'arco e perpendicolare a questo. In Figura 6 (b) si riporta un focus su un elemento in cui, per via della presenza di un incrocio, uno stesso edificio è coinvolto nella definizione di più di un canyon. Uno è, per esempio, quello viola in prossimità del centro dell'immagine. Si vuole mostrare che, in casi come questo, l'utilizzo della posizione dei due nodi terminali assicura di poter escludere la porzione rimanente di edificio dal calcolo della lunghezza del canyon.
- La larghezza del canyon è intesa come distanza tra i primi punti in cui si ha gradiente massimo di altezza, ovvero i punti in cui si passa dal valore del piano stradale a un valore di edificio (i punti rossi più vicini all'asse stradale, anche esso in rosso, in Figura 7, che mostra un canyon estrapolato dal DEM, e ruotato in modo da far coincidere la direzione dell'asse con la verticale e agevolare i successivi calcoli).
- Per entrambi i lati, la larghezza è invece calcolata in base alla contiguità dei pixel che formano l'edificio: questa è infatti definita dalla distanza tra i primi due punti, per

ogni lato, con gradiente massimo (in caso fossero presenti delle corti interne, la larghezza dell'edificio sarebbe valutata come quella compresa tra la strada e la corte). La Figura 7 mostra, attraverso i punti rossi più lontani rispetto all'asse stradale, come vengono valutate le larghezze degli edifici.

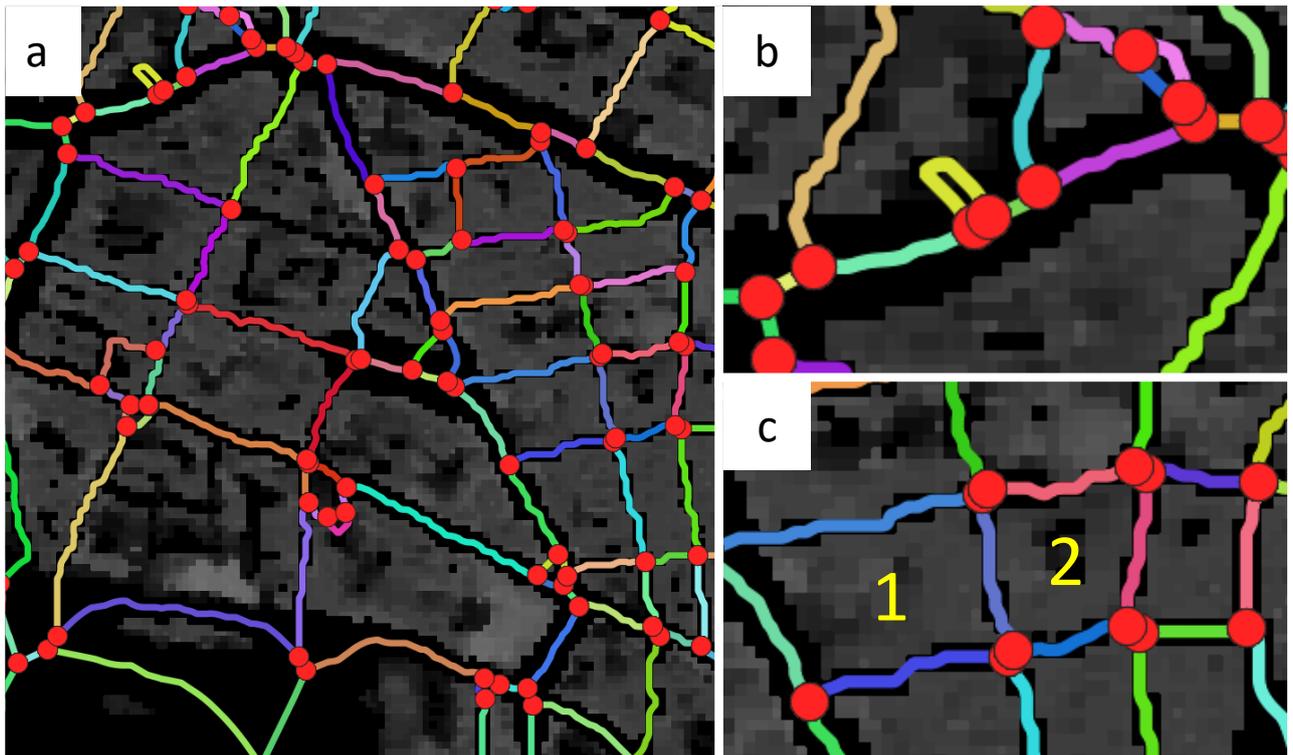
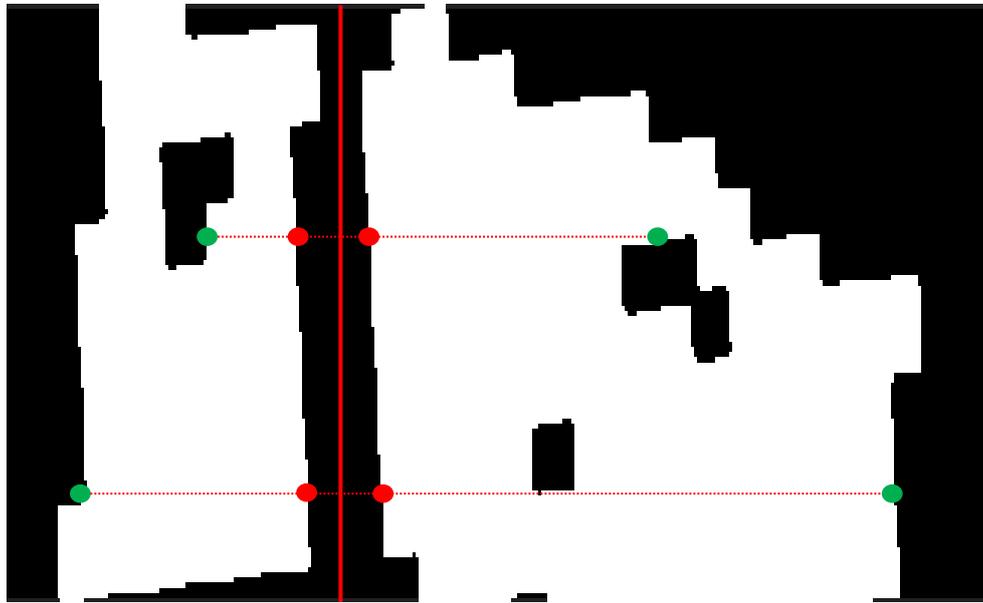


Figura 6. a: panoramica generale di un estratto di DEM della città di Berlino di cui si è creato il Grafo di Voronoi. Ogni arco è riportato con un colore differente. I nodi, invece, sono rappresentati dai punti rossi. b: focus su alcuni particolari elementi che, nonostante abbiano la facciata di un edificio in comune, formano comunque canyon differenti per via della separazione degli edifici dall'altro lato. c: ogni arco è sempre formato dal lato che hanno in comune due poligoni costruiti attorno agli edifici.

Nell'esempio in Figura 7 è intenzionalmente riportata, per chiarezza, la rappresentazione di una possibile imprecisione nel computo della larghezza degli edifici: il punto verde in alto a destra, infatti, delimita la presenza dell'edificio in modo sfalsato. La ragione di questo è puramente tecnica, e legata alla risoluzione del DEM utilizzato, e alle distorsioni dei contorni che possono conseguire alla sua rotazione. Nel lavoro presentato la larghezza tipica degli edifici del canyon è associata allo

stesso come media dei valori di ogni sezione trasversale, anche per sopperire alla presenza di questi casi particolari all'interno del campione.



*Figura 7: un elemento del Grafo di Voronoi, successivamente alla sua rotazione per rendere la direzione dell'asse (la linea rossa continua) coincidente con la verticale. In direzione ortogonale, si possono quindi definire delle sezioni trasversali che tagliano sia il canyon che gli edifici che lo compongono (linea rossa tratteggiata). Sia a sinistra che a destra, rispetto all'asse, si possono individuare i punti di intersezione con gli edifici: sia quelli più vicini all'asse (in rosso), che determinano la larghezza del canyon, sia quelli più lontani (in verde) che determinano, insieme ai primi ma per ciascun edificio, la larghezza dello stesso.*

Per svolgere le operazioni di analisi dei canyon come descritto poco sopra è necessario effettuare un pre-processing del dato disponibile sulle altezze in formato raster, e la creazione propria del grafo di Voronoi. Tutti gli esempi sono riferiti alla città di Cagliari, ma gli stessi procedimenti sono validi anche per gli altri casi studio riportati. Come precedentemente descritto, l'idea è quella di creare dei poligoni di Voronoi intorno a ciascun edificio del tessuto urbano analizzato.



Figura 8: DEM e maschera di una zona di Cagliari, elemento di partenza per la creazione del grafo di Voronoi.

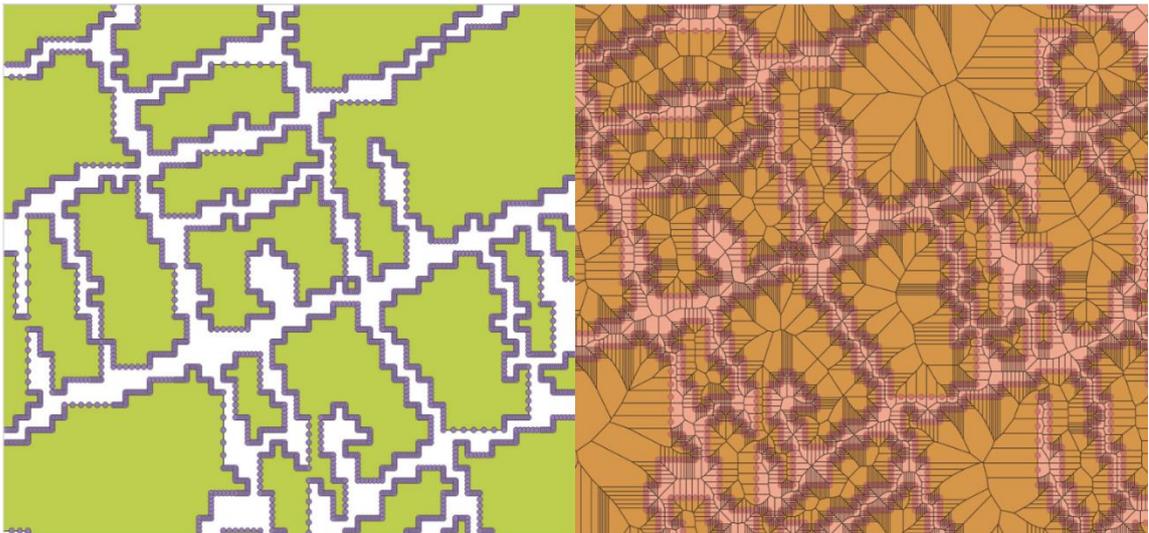


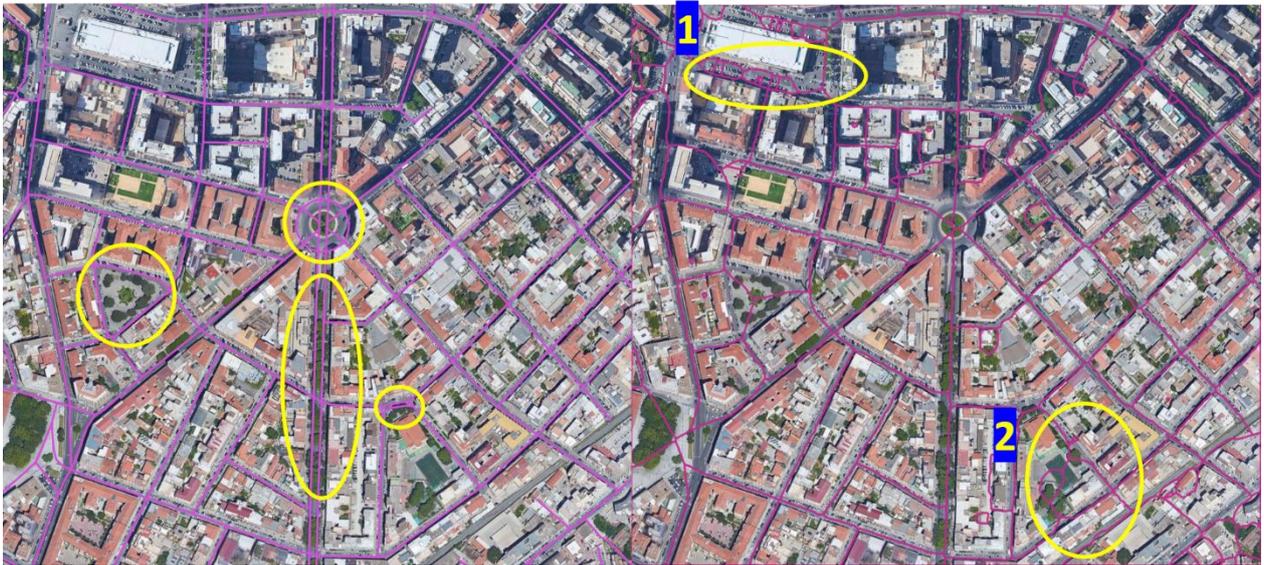
Figura 9: Delimitazione degli edifici e insieme dei punti dei contorni (a sinistra); poligoni di Voronoi attorno a ogni punto precedentemente creato (a destra).

In Figura 8 si riporta il DEM di una zona di Cagliari (a sinistra) e una maschera binaria derivata da questa (sulla destra), che identifica la posizione degli edifici su un sistema di pixel georiferiti. A partire dall'ultima, è facilmente derivabile una informazione di tipo vettoriale degli edifici e, quindi, l'insieme dei punti sul piano che delimitano i loro contorni. In Figura 9 si riporta a sinistra

la definizione dei contorni dei poligoni degli edifici e l'individuazione degli insiemi di punti che li formano, a destra i poligoni di Voronoi riferiti a tutti i punti precedentemente individuati. Come riportato in Figura 10, poi, è possibile associare ogni poligono di Voronoi al corrispondente edificio: così facendo, si determina per ognuno di questi ultimi la sua area di pertinenza, che determina la porzione di piano a esso competente, rispetto a tutti gli altri. In questo modo, si crea il grafo che segue le regole come precedentemente descritte.



*Figura 10: determinazione dell'area di pertinenza per ogni edificio e creazione del grafo di Voronoi. Vengono raggruppati, e rappresentati in giallo, tutti i poligoni riferiti ai punti che formano i contorni di uno stesso edificio. Estendendo la procedura a tutti gli edifici, è possibile identificare un grafo i cui archi sono assimilabili ai canyon urbani del tessuto considerato (linee rosse dell'immagine sulla destra).*



*Figura 11: confronto tra grafo stradale e grafo di Voronoi su una zona della città di Cagliari. A sinistra sono cerchiato, in giallo, le principali incongruenze nella creazione del grafo per il calcolo dei parametri descrittivi dei canyon urbani, quali l'inclusione del perimetro delle piazze e il doppio conteggio di alcuni assi stradali per le vie costituite da doppia carreggiata. A sinistra, alcune imprecisioni che restano anche adottando il grafo di Voronoi, quali la perimetrazione dell'area associata a elementi e manufatti che non sono edifici, e di cui è necessario tenere conto in fase di pre-processing.*

La Figura 11 mostra un confronto tra il grafo stradale e il grafo di Voronoi riferiti alla stessa zona di Cagliari. Si evidenzia come la seconda opzione permetta di risolvere alcune inesattezze presenti nella prima: il grafo stradale, infatti, non essendo definito specificamente per gli scopi dell'analisi della morfometria e delle statistiche relative ai canyon, riporta alcuni elementi che sono di difficile interpretazione. Ci possono essere, ad esempio, tratti stradali che sono in realtà riferiti ai perimetri delle piazze, doppi tratti che rappresentano la stessa strada (come accade nei casi di tratti particolarmente larghi e con più carreggiate), tratti che non sono realmente strade (per esempio riferiti ad altre infrastrutture di trasporto). D'altra parte, anche il grafo di Voronoi non è esente da imprecisioni: in riferimento alla Figura 11 (a destra), si nota come, per esempio nelle zone segnate con 1 e 2, si possano creare degli elementi che non corrispondono in realtà a nessun edificio, in quanto i valori di altezza registrati sul DEM si riferiscono a elementi differenti (per esempio, edicole, bancarelle, altre strutture cittadine che non possono essere considerate edifici, soprattutto visto lo

scopo della precisa definizione dei canyon). Inoltre, per via della risoluzione del dato di partenza, può capitare che alcuni edifici separati risultino in un unico elemento. Per superare questo inconveniente, è necessario quindi svolgere alcune operazioni preliminari sul dato di partenza: nello specifico, è possibile eliminare tutti gli elementi con volume inferiore a una certa soglia, stabilita in base ai caratteri specifici della zona e alla grandezza caratteristica degli elementi che si vogliono eliminare, e svolgere alcune operazioni di *apertura* e *erosione* del dato di partenza per superare l'inconveniente degli edifici differenti che risultano uniti in un unico elemento. La definizione della soglia volumetrica è legata alla conoscenza della distribuzione dei valori dei volumi degli edifici nell'area che si sta analizzando, ricostruibile a partire dal DEM, successivamente all'unione in elementi singoli di tutti i pixel contigui che riportano valore non nullo. L'effetto che la presenza di questi elementi ha sul risultato finale è tanto più marcato quanto più estesa è la zona considerata; infatti, più è estesa la zona, più è difficile individuare un valore univoco che discrimina gli edifici da altri elementi. Per contro, per estensioni ridotte, è possibile individuare direttamente anche la grandezza caratteristica degli elementi atipici (come per esempio le già nominate edicole), e definire un filtro più efficace.

### **2.3 Profili di velocità del vento**

Tenendo in considerazione la suddivisione degli strati atmosferici al di sopra delle zone urbane così come descritte al Capitolo 6, è possibile condurre un'analisi di quali siano gli elementi attualmente oggetto di discussione all'interno della comunità scientifica circa la forma assunta per il profilo di velocità del vento. Una buona conoscenza dell'andamento del modulo di velocità in funzione della quota, posta la conoscenza della velocità di attrito  $u_*$ , almeno in condizioni di stratificazione neutra, consentirebbe la modellazione del profilo senza dover ricorrere a costose e complicate strumentazioni di misurazione, o almeno l'estensione dell'informazione anche in punti in cui non si dispone di tale strumentazione. In condizioni di stratificazione neutra è comunemente accettato l'impiego dell'equazione (1), al di sopra dell'UCL. È evidente che la stima dei parametri  $z_d$  e  $z_0$  dell'equazione (1) attraverso equazione teorica richiederebbe la conoscenza dello stesso profilo di velocità, che invece si vuole determinare in funzione della velocità di attrito. Si è dunque

ricorso alla definizione di varie equazioni empiriche, come descritto al paragrafo 1.3; una rassegna delle più utilizzate si può trovare in Grimmond and Oke (1999), ma si segnalano anche sviluppi più recenti (Cheng and Castro 2002; Kastner-Klein and Rotach 2004; di Sabatino et al. 2010). Le equazioni utilizzate nelle elaborazioni di base, dalle quali si parte per le successive modifiche, sono quelle derivate da MacDonald nel suo studio in materia (Macdonald et al. 1998).

## **2.4 Le motivazioni della scelta delle equazioni di MacDonald come base**

Nel suo lavoro di analisi dell'effetto degli elementi di rugosità sul profilo di velocità verticale del flusso, MacDonald, in conseguenza di quanto discusso al paragrafo 1.3, utilizza la configurazione sperimentale descritta nello stesso. Assumendo il profilo verticale obbediente all'equazione (1), sviluppa delle equazioni *semi-empiriche* (equazione (7) e equazione (8)), a partire dalle considerazioni e dalle conclusioni riportate in Lettau (1969). Unitamente al fatto che l'assetto delle prove sperimentali condotte in quell'occasione rappresentavano meglio, rispetto alle altre relazioni comunemente usate, le condizioni che si possono riscontrare in un ambiente urbano<sup>7</sup>, la derivazione per via semi-empirica è un altro dei motivi che porta a preferire questo tipo di equazioni. Considerando dei risultati che derivano dalle evidenze teoriche, è infatti possibile condurre trattazioni per l'affinamento delle assunzioni alla base delle prove.

È possibile ricavare le equazioni proposte da Lettau, che non riportò una derivazione teorica, sulla base di alcuni presupposti fondamentali e alcune assunzioni di base. Assumendo, anzitutto, trascurabili le interferenze di scia tra gli ostacoli (in questo caso, gli edifici) e che il profilo di velocità

---

<sup>7</sup> Per la precisione, l'assetto sperimentale è quello riportato in Lettau (1969), e le serie di ostacoli utilizzate erano intese come rappresentative di un tessuto urbano in termini dei valori statisticamente più probabili per i parametri morfometrici  $H$ ,  $\lambda_p$  e  $\lambda_f$ .

media segua la legge logaritmica, allora la velocità media alla quota dell'altezza dell'elemento di rugosità sarà<sup>8</sup>:

$$u_H = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{H}{z_0} \right) \quad (24)$$

la resistenza dell'ostacolo può essere espressa come:

$$F_D = 0.5 \rho u_H^2 C_D A_F \quad (25)$$

dove, oltre  $\rho$  che indica la densità dell'aria, tutti i simboli hanno lo stesso significato già visto in precedenza (Capitolo 1).

Lo sforzo di taglio alla parete ( $\tau_0$ ) è definibile come la forza d'attrito  $F_D$  per unità di superficie, e può essere espressa in termini di velocità d'attrito  $u_*$ ; risulta quindi (assumendo come superficie interessata quella totale che compete all'elemento considerato):

$$\tau_0 = \frac{F_D}{A_T} = \rho u_*^2 \quad (26)$$

Sostituendo si ottiene:

$$\frac{1}{\left( \ln \left( \frac{H}{z_0} \right) \right)^2} = 0.5 \frac{C_D A_F}{k^2 A_T} \quad (27)$$

e quindi, ricordando che  $\lambda_f = \frac{A_F}{A_T}$ :

---

<sup>8</sup> Questo non è propriamente vero, infatti il profilo logaritmico non è accurato per altezze inferiori a quelle degli edifici, e anzi ci sono svariati studi su questo aspetto; le interferenze tra gli edifici sono infatti tutt'altro che trascurabili. Come precisa anche l'autore, si terrà conto di questi effetti proprio grazie all'introduzione di  $z_d$ .

$$\frac{z_0}{H} = \exp\left(-\left(0.5 \frac{C_D}{k^2} \lambda_f\right)^{-0.5}\right) \quad (28)$$

Tuttavia, nella realtà del caso in esame, le interferenze tra gli ostacoli non sono trascurabili, e anzi diventano uno dei punti centrali dell'analisi. Questa osservazione porta all'introduzione della grandezza caratteristica  $z_d$ , di cui deve essere traslata verso l'alto l'origine del profilo logaritmico, affinché la relazione possa considerarsi valida.

La formulazione acquista quindi la forma dell'equazione (1), in cui si sostituisce alla generica  $\bar{u}$  la velocità  $u_H$  alla quota  $H$ :

$$u_H = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{H - z_d}{z_0}\right) \quad (29)$$

che può essere considerata identica alla precedente, a patto di definire un'altezza effettiva  $H^* = H - z_d$ . Una trattazione matematica simile a quella già esposta porta poi alla forma finale dell'equazione (8), in cui il coefficiente  $\beta$  viene introdotto principalmente per motivi di correzione di  $C_D$  legati alle differenze tra le forme delle superfici degli ostacoli nel caso ideale e in quello reale, come per esempio gli spigoli imperfetti degli edifici. L'equazione (7) e l'equazione (8) costituiscono quindi l'insieme che permette di stimare i parametri fluidodinamici per una certa superficie in esame, di cui si abbiano noti i parametri morfometrici. È da notare che, di base, il problema sarebbe semplicemente rimandato dalla stima di  $z_0$  alla stima di  $z_d$ , ma grazie al lavoro di Jackson (1981), si può assumere che una possibile interpretazione per  $z_d$  sia quella dell'altezza di una superficie liscia che conservi, appiattendosi, il volume di tutti gli elementi di rugosità, e che questa si possa esprimere tramite la già presentata equazione (7).

## 3 Casi studio

### 3.1 Prime applicazioni su larga scala e confronto tra stili architettonici

Il primo caso studio sulla caratterizzazione morfometrica di un tessuto urbano è stato quello della città di Cagliari, e i primi risultati di queste analisi sono descritti in Badas et al. (2019); nella pubblicazione citata si ripercorrono i concetti fondamentali alla base dell'idea della suddivisione del territorio mediante griglie irregolari adattive. Mediante l'applicazione di una analisi morfometrica mirata al caso studio della città di Cagliari, infatti, si è riscontrato un ostacolo fondamentale all'applicazione delle griglie regolari. Questo è costituito dalla differenza tra il risultato ottenuto per i valori del parametro  $\lambda_f$  e la conformazione effettiva di alcuni quartieri del sito: anche attraverso un confronto visuale è infatti possibile rendersi conto che i valori caratteristici sono sempre indipendenti dalla forma del tessuto, e massimi e minimi sono sempre collocati rispettivamente lungo le diagonali e lungo gli assi principali di un quadrato che inscrive la zona (confronti di questo tipo sono riportati anche in seguito, in riferimento al caso studio esteso a Cagliari e Roma). Questo aspetto è molto importante quando l'intento è di caratterizzare specifiche zone, e la differenza qui descritta ha portato all'impiego di un altro tipo di suddivisione del territorio. Una griglia costruita attraverso il grafo stradale consente, elemento per elemento, di tenere traccia delle specificità geometriche della zona, e di conservare, nell'elaborazione di parametri direzionali quali  $\lambda_f$ , le caratteristiche degli elementi formati, come la direzione di sviluppo prevalente planimetrico e la regolarità della forma. Questo aspetto si ripercuote poi nella successiva valutazione di un valore medio da riferire al quartiere analizzato.

Qui di seguito si riporta la descrizione di due casi studio sulle zone urbane di Cagliari e di Roma. Considerato che lo scopo è quello di mostrare come per certi versi possa essere più idoneo l'utilizzo, rispetto a una griglia regolare, di una griglia adattiva, che riesca a catturare effettivamente le specificità della zona urbana considerata, si riportano le caratterizzazioni delle due zone su larga scala in termini di distribuzione dei valori dei parametri morfometrici sui diversi tipi di griglia. Al paragrafo 4.1 si riportano invece le statistiche e le analisi di queste distribuzioni. La griglia adattiva

può essere, come nel caso in esame, una suddivisione dell'estensione totale basata sul grafo stradale, che racchiude singoli o piccoli gruppi di edifici. La griglia regolare utilizzata, invece, ha elementi quadrati con lato pari a 100 m. La letteratura sull'applicazione dei modelli morfometrici, ovvero quelli che restituiscono una stima di  $z_0$  e  $z_d$  sulla base della conoscenza delle caratteristiche geometriche dell'edificato urbano, suggerisce la suddivisione dell'area in sub-unità costituite da elementi quadrati di lato che varia da 150 m a 1 km (Millward-Hopkins et al. 2013b). Gli scopi della tesi sono orientati a una caratterizzazione fitta e dettagliata delle superfici urbane, comprendendo anche l'eventuale applicazione alle scale più ridotte tra quelle possibili, pertanto la scelta ricade sui valori inferiori del range proposto dagli autori. Inoltre, precedenti studi test sull'applicazione del metodo (o rimando a tesi o direttamente estratto) mostrano come, considerando il riferimento dei risultati ottenuti dalla griglia adattiva, assunta come più idonea, la migliore rappresentazione dei parametri morfometrici, in particolare  $\lambda_f$ , si ottenesse utilizzando un valore di 100 piuttosto che di 150 m. Considerato che, tra le principali applicazioni della caratterizzazione morfometrica c'è quella dell'attribuzione dei valori ai parametri fluidodinamici  $z_d$  e  $z_0$  nell'area che contorna il dominio computazionale in ambito di simulazione CFD, e che le scale tipiche dell'analisi a scala di edificio sono dell'ordine dei 100 m (Merlier et al. 2018), anche questo aspetto spinge a considerare una estensione per l'analisi di 100 m, in modo da ritrovare una estensione paragonabile a quella tipica di svolgimento dei fenomeni in esame.

Dalla Figura 13 alla Figura 18 si mostrano le distribuzioni spaziali dei parametri fondamentali, come precedentemente definiti, per le aree oggetto di studio. Si vuole qui mettere in evidenza in particolar modo la grande variabilità dei risultati ottenuti, e come possa risultare quindi difficoltoso attribuire una classificazione univoca a estensioni territoriali di una certa consistenza. A titolo esemplificativo, si sono considerate le suddivisioni amministrative in quartieri per Cagliari e rioni per Roma che, pur non sempre caratterizzate da tipologie costruttive simili o assimilabili, forniscono una rappresentazione di quanto la morfologia possa variare anche all'interno di aree relativamente ristrette e non solo estese come interi centri urbani. Per queste figure si riportano di seguito i riferimenti numerici per le zone.

Quartieri di Cagliari: (1) Bonaria; (2) Marina; (3) Villanova; (4) Stampace; (5) Castello; (6) San Benedetto.

Rioni di Roma: (1) Trevi; (2) Colonna; (3) Monti; (4) Pigna; (5) Campitelli; (6) Ripa; (7) Sant'Angelo; (8) Sant'Eustachio; (9) Parione; (10) Prati; (11) Ponte; (12) Borgo; (13) Regola; (14) Trastevere; (15) Campo Marzio; (16) San Saba; (17) Celio; (18) Testaccio; (19) Castro Pretorio; (20) Sallustiano; (21) Ludovisi; (22) Esquilino.

Si è voluta dare una rappresentazione distinta dei risultati per  $\lambda_f$ : essendosi, infatti, calcolato il suo valore per ogni possibile direzione di provenienza del vento, si è anzitutto isolata una specifica direzione di particolare interesse, ovvero quella competente il vento prevalente, corrispondente a NNO per Cagliari e alle due direzioni caratteristiche O e NEE per Roma (vedere la Figura 12 per le rose dei venti), e si è calcolato il valore del parametro a essa riferito ( $\lambda_{f\ dir}$ ). Per il caso di Roma, si è scelto di analizzare la direzione O. Successivamente, la rappresentazione del valore di un  $\bar{\lambda}_f$  è stata possibile attraverso una media del parametro rispetto a ogni direzione considerata. Una breve descrizione dei punti fondamentali della metodologia per il calcolo di  $\lambda_f$  a partire dal DEM e da un insieme di poligoni che suddividono il territorio considerato è fornita in Appendice A.

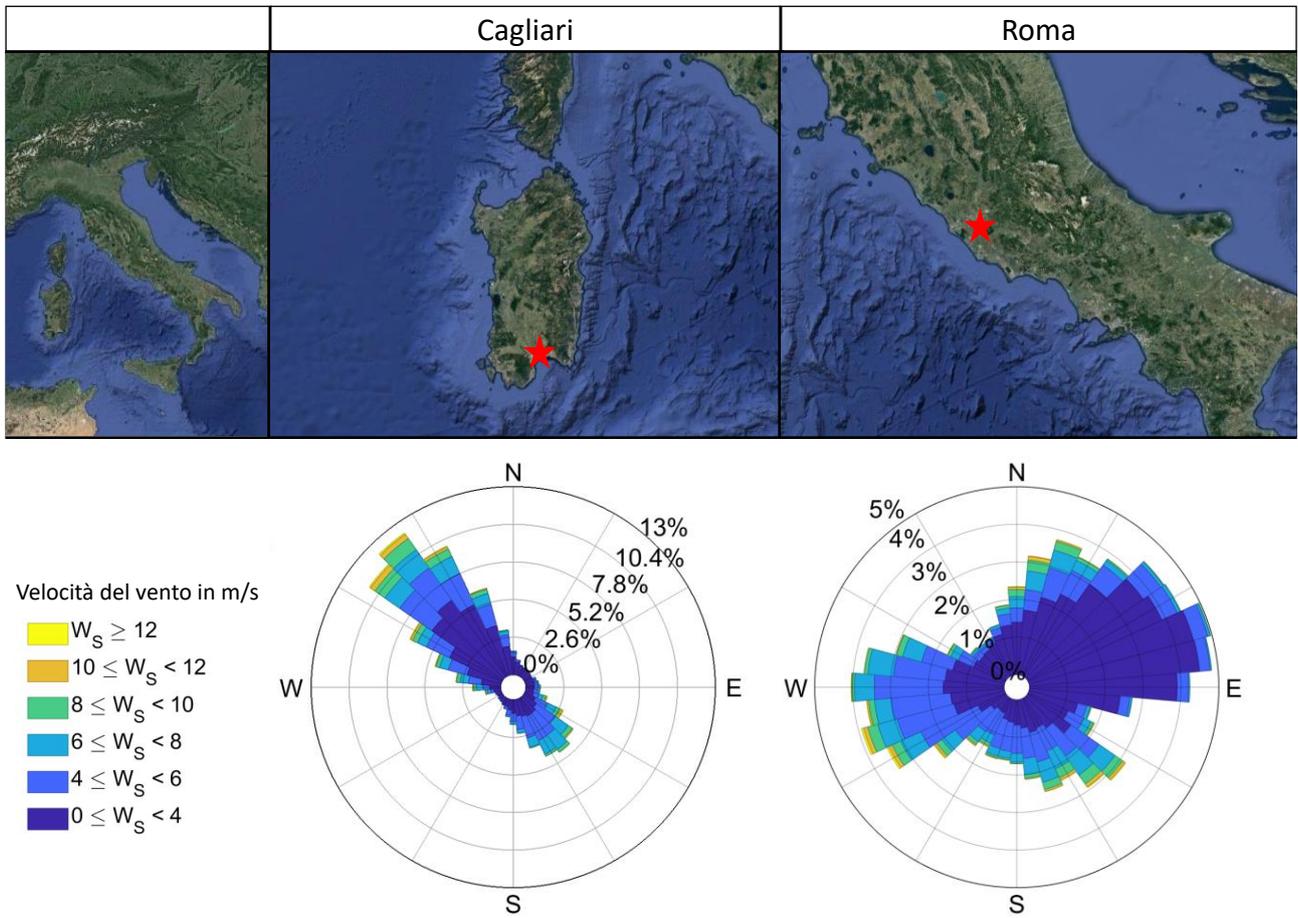


Figura 12: inquadramento dei casi studio di Cagliari e Roma e rispettive rose dei venti. Si possono individuare le direzioni dei venti prevalenti per le due aree, quella univoca per Cagliari e le due per Roma. Fonte: Iowa State University<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> [http://mesonet.agron.iastate.edu/sites/windrose.phtml?network=WI\\_ASOS&station=CWA](http://mesonet.agron.iastate.edu/sites/windrose.phtml?network=WI_ASOS&station=CWA)

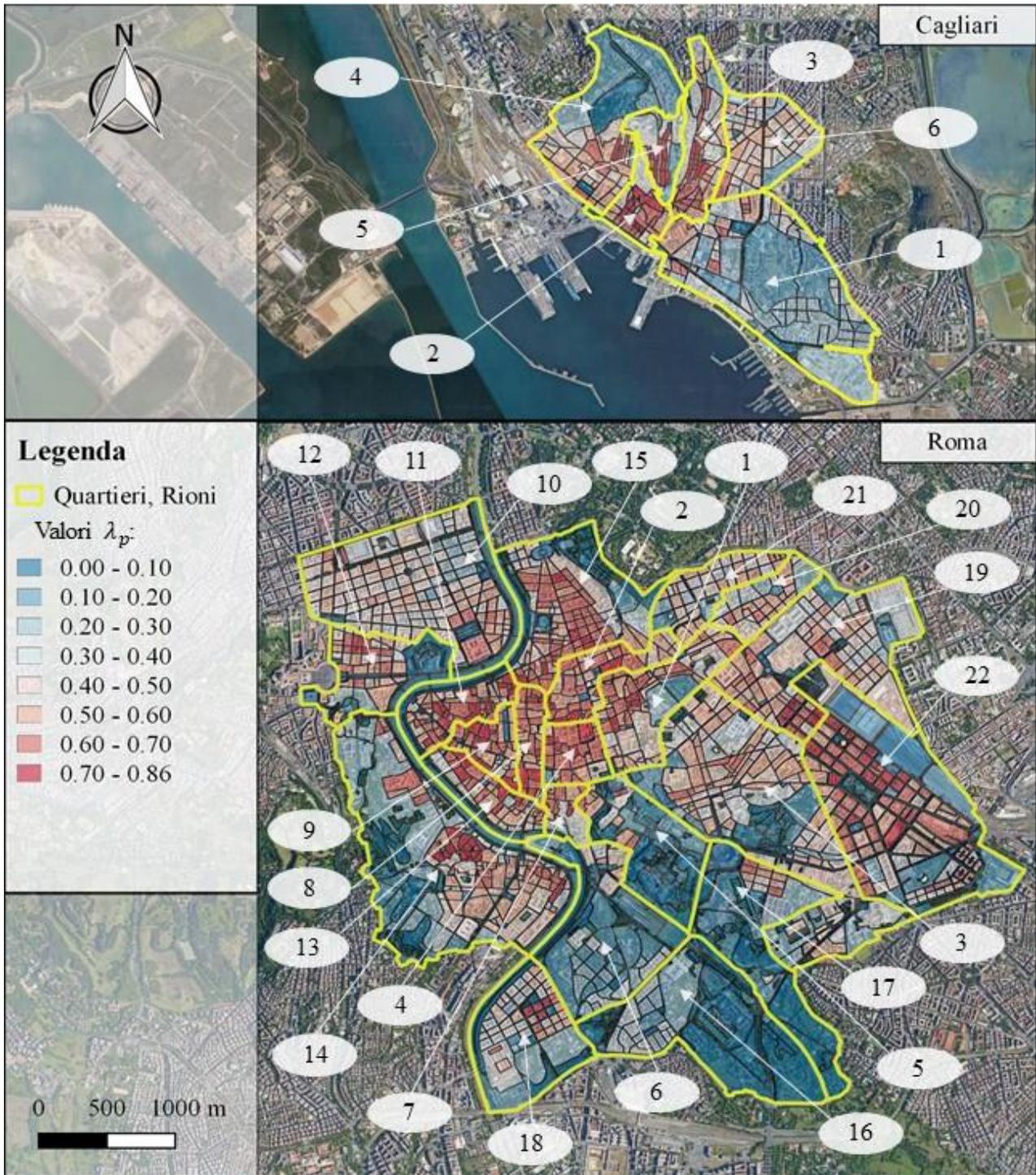


Figura 13: Distribuzione spaziale di  $\lambda_p$  per i casi studio, griglia irregolare. Riportata da Salvadori et al. (2021).

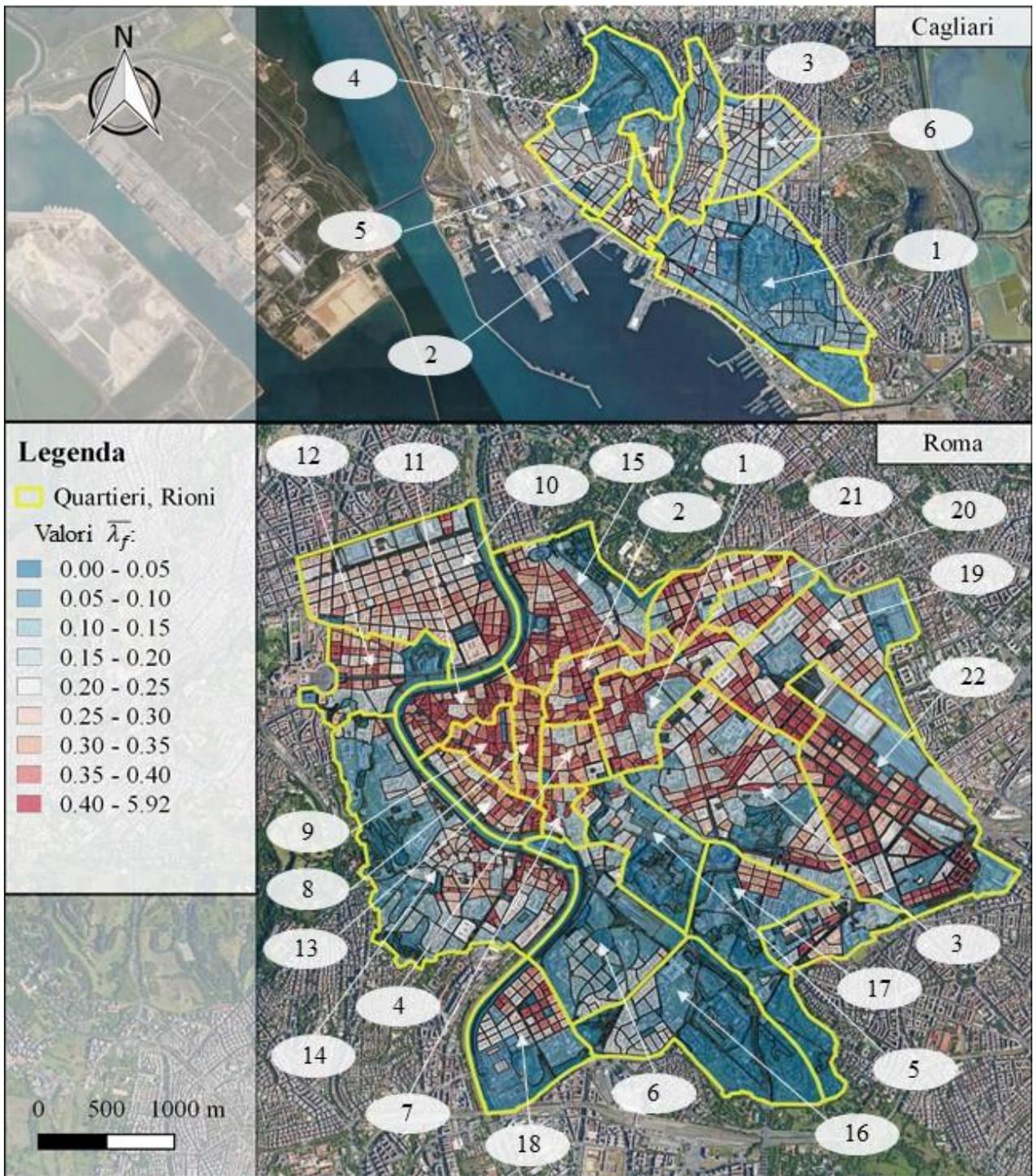


Figura 14: Distribuzione spaziale di  $\bar{\lambda}_f$  per i casi studio, griglia irregolare. Riportata da Salvadori et al. (2021).

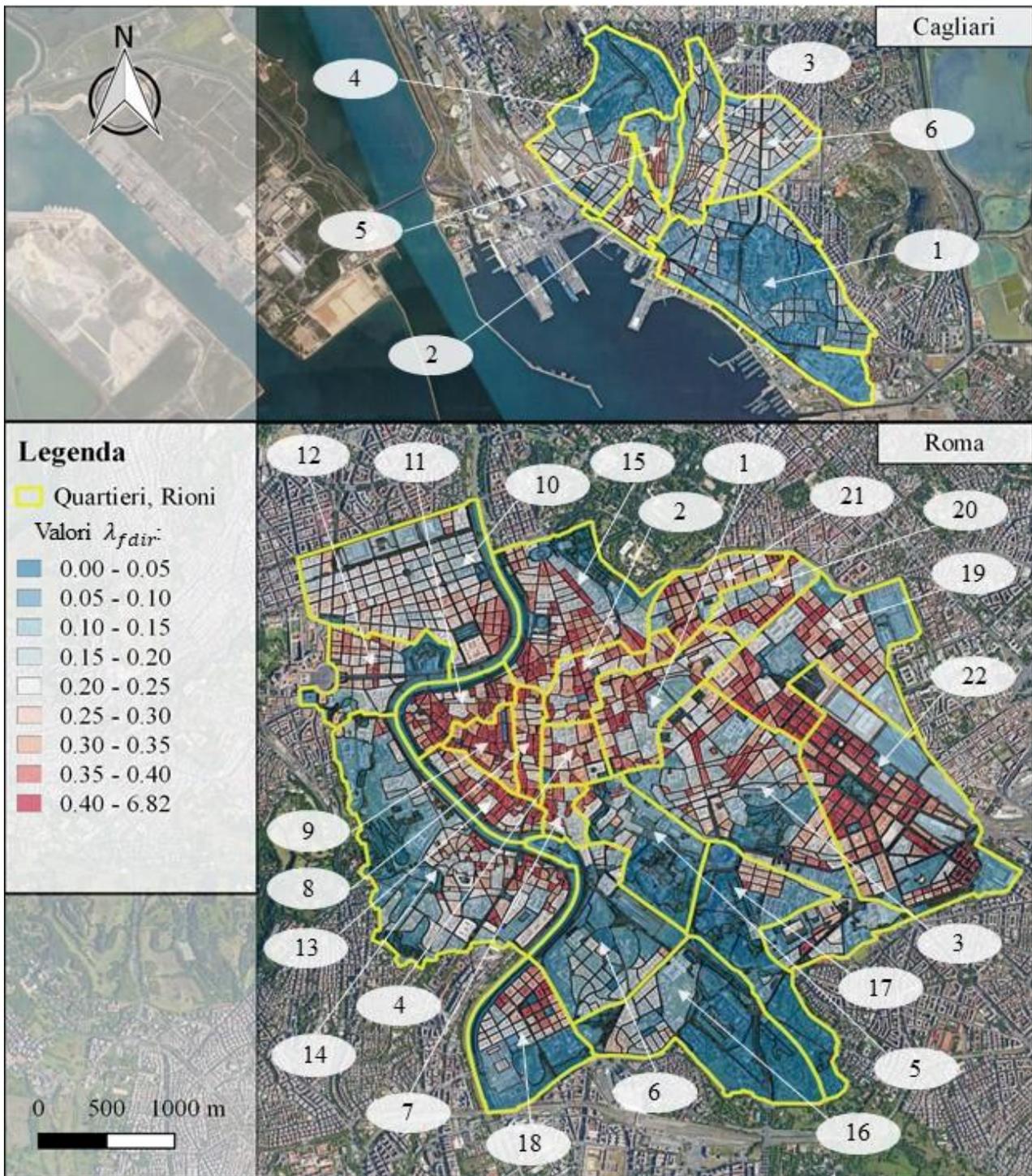


Figura 15: Distribuzione spaziale di  $\lambda_{fdir}$  per i casi studio, griglia irregolare. Riportata da Salvadori et al. (2021).

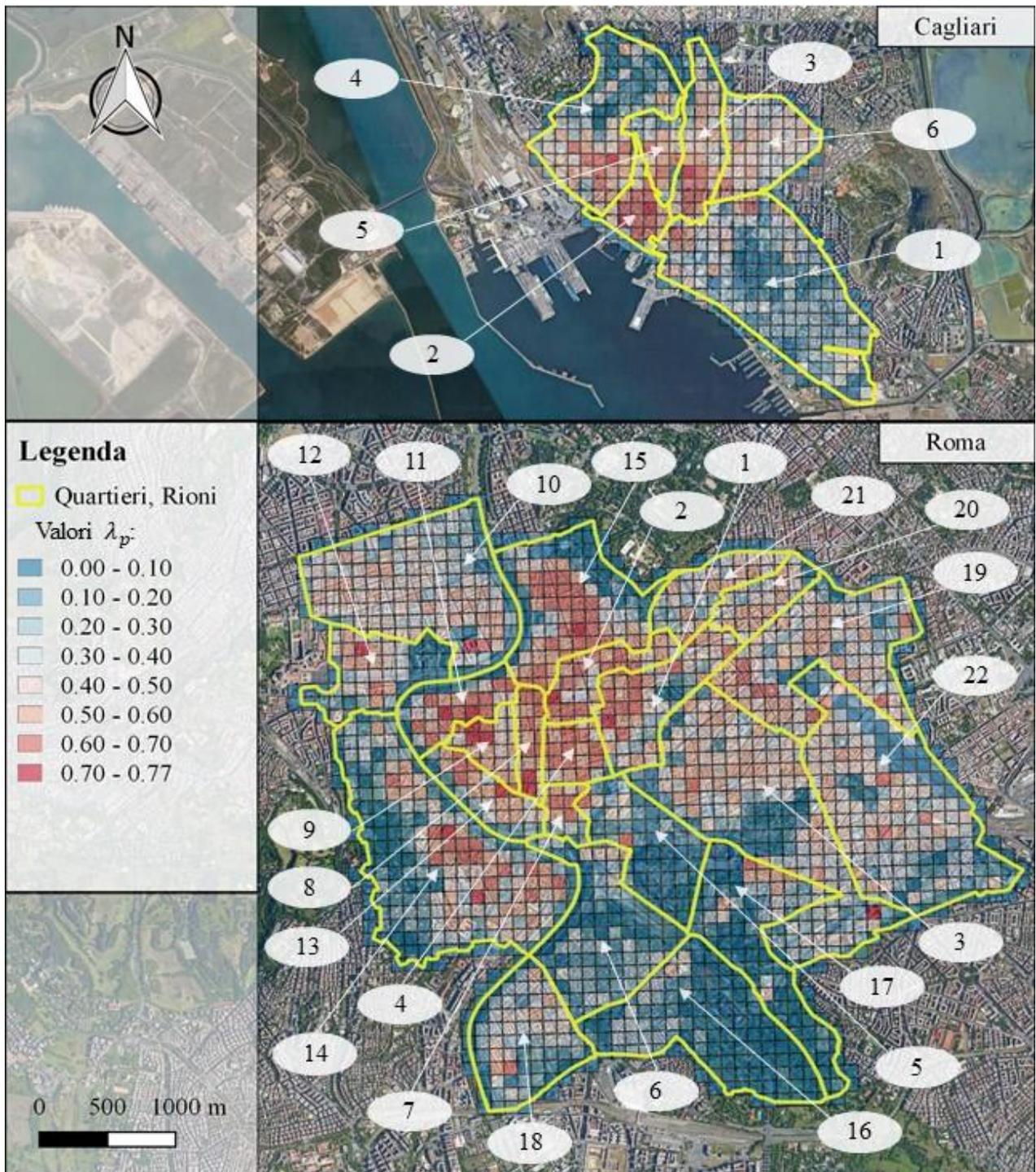


Figura 16: Distribuzione spaziale di  $\lambda_p$  per i casi studio, griglia regolare. Riportata da Salvadori et al. (2021).

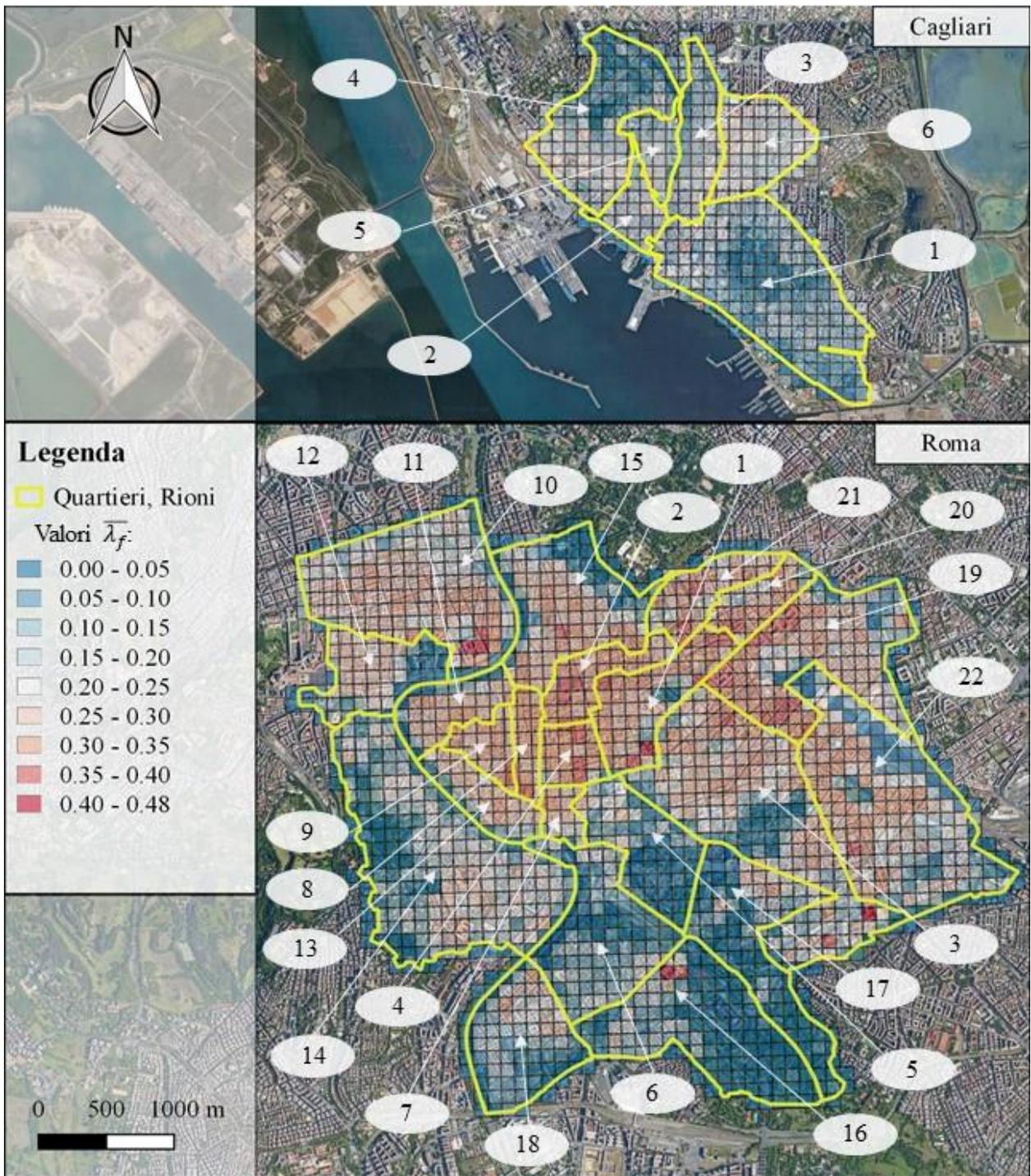


Figura 17: Distribuzione spaziale di  $\bar{\lambda}_f$  per i casi studio, griglia regolare. Riportata da Salvadori et al. (2021).

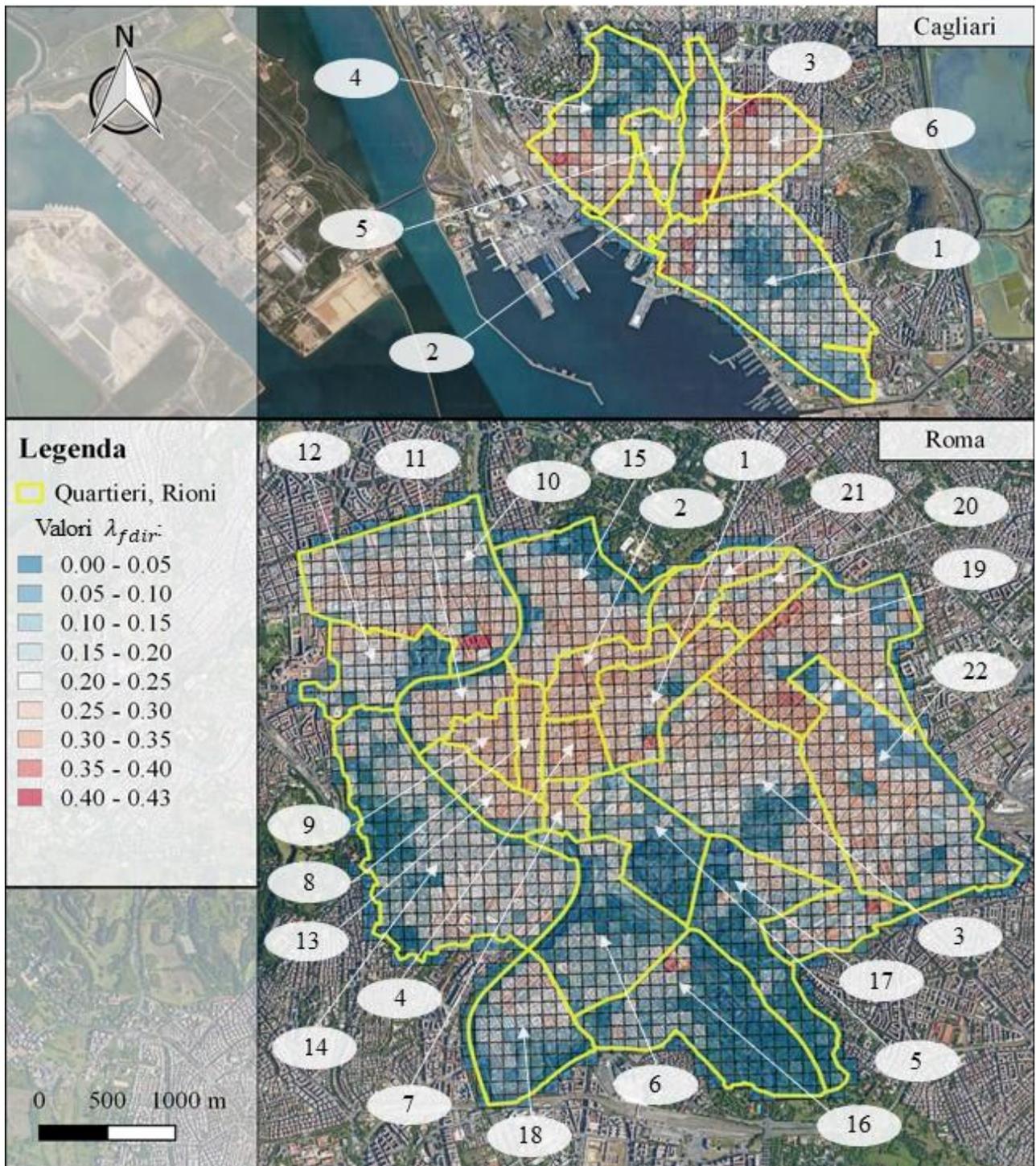


Figura 18: Distribuzione spaziale di  $\lambda_{fair}$  per i casi studio, griglia regolare. Riportata da Salvadori et al. (2021).

La Figura 19 mostra la funzione di densità di probabilità (da qui in avanti pdf) per le aree degli isolati derivanti dall'utilizzo della griglia adattiva per la suddivisione territoriale. È da notare che, nonostante siano state applicate alcune operazioni di pre-processing sul dato del grafo stradale, anche grazie al crescente interesse per l'argomento e disponibilità di strumenti (Boeing 2017), rimangono alcune differenze tra i dati di partenza che non sempre, però, sono dovuti effettivamente a una differente conformazione urbana, quanto ad arbitrarietà della rappresentazione dell'informazione spaziale, in particolar modo degli elementi stradali. Queste differenze si mostrano soprattutto nella numerosità degli isolati formati e nelle loro estensioni: la considerazione di alcune strade di minore larghezza, spesso solo pedonali, nel caso di Roma e la non considerazione di elementi analoghi in quello di Cagliari porta, per esempio, alla formazione di più elementi con estensione minore per la prima città rispetto alla seconda, rendendo il confronto poco attendibile. Questo è un aspetto che merita attenzione e su cui sono possibili miglioramenti, anche considerando altre tipologie di suddivisione del territorio, come per esempio l'applicazione dei poligoni di Voronoi attorno agli edifici anche per queste analisi morfometriche (Ketterer et al. 2017). Si può comunque notare come la maggior parte degli isolati abbia superficie inferiore ai 10000 m<sup>2</sup>, dimensione caratteristica degli elementi della griglia regolare. Questo è importante in relazione alla cattura o meno di alcuni elementi caratterizzati da altezza elevata e superficie planimetrica ridotta (come si è scritto sopra in merito ai valori di  $\lambda_f$ ).

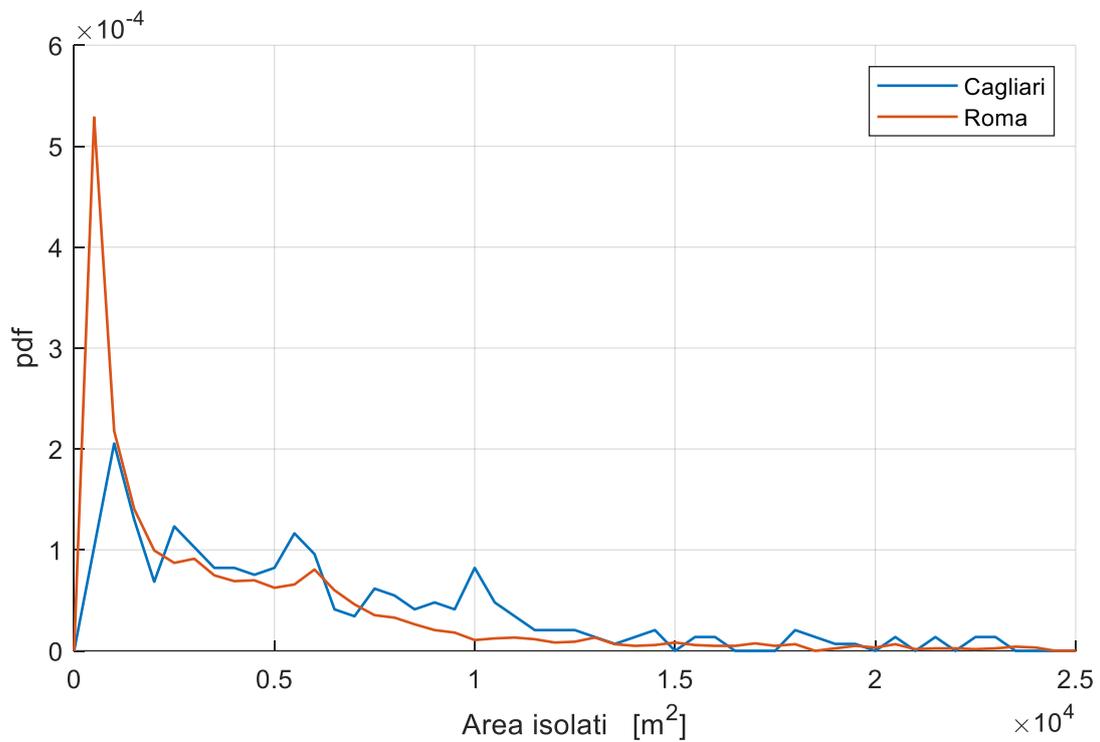


Figura 19: pdf delle aree degli isolati per i due casi studio di Cagliari e Roma. Riportata da Salvadori et al. (2021).

### 3.2 Applicazione del metodo topologico per l'analisi dei canyon

Al presente paragrafo si riportano i casi studio selezionati per l'applicazione del metodo topologico per l'analisi dei canyon. Uno dei quattro totali che si sono selezionati è, come per la versione del calcolo basata sul grafo stradale, la città di Cagliari che, come si vedrà, è un utile punto di confronto rispetto ai risultati precedentemente ottenuti. Gli altri sono: una parte della città di Roma, una parte di Berlino, e una di Londra, e vengono di seguito indicate.

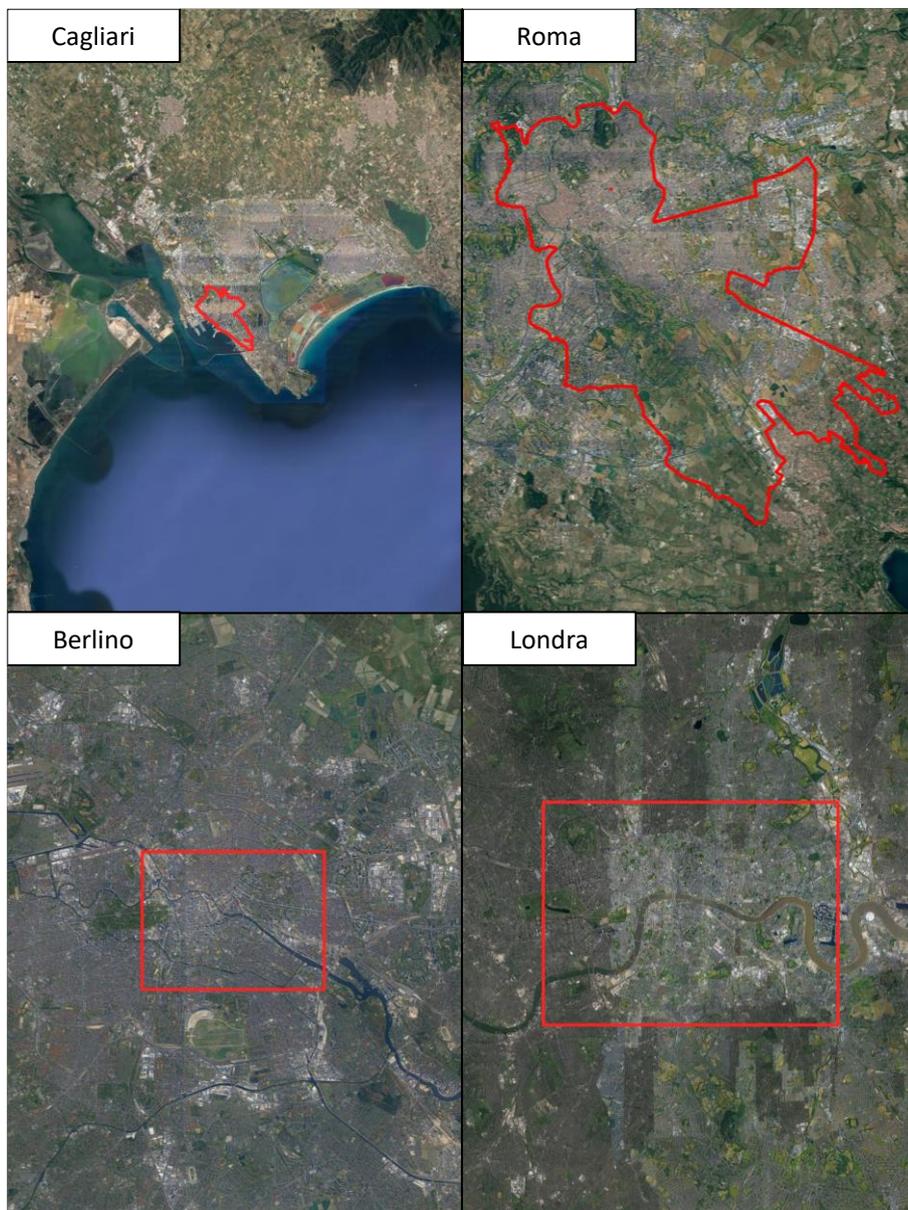


Figura 20: inquadramento dei siti analizzati per l'applicazione del metodo topologico per lo studio dei canyon urbani. Per tutti i siti, la scala è 1:220000.

### 3.3 Il caso studio di Villa Pamphili a Roma

Per quanto riguarda le analisi sui profili di velocità di vento, uno dei casi studio che si sono considerati è quello relativo alla stazione di monitoraggio sita a Villa Pamphili nella città di Roma,

in riferimento all'inquadramento riportato al paragrafo 1.4. I dati utilizzati si sono potuti estrapolare dallo studio (Pelliccioni et al. 2015) di cui si è discusso al paragrafo 1.4. In Figura 21 si riporta una localizzazione del caso studio considerato, precisamente situato alle coordinate  $41^{\circ}53' N$ ,  $12^{\circ}26' E$ ; il monitoraggio ha interessato il periodo tra giugno 2006 e luglio 2007. Le misurazioni si riferiscono a un punto (il punto blu in Figura 21) abbastanza lontano dalla vegetazione (200 m) e dagli edifici (500 m), lungo la direzione di provenienza del vento analizzata, da non risentire della loro immediata influenza sul campo di moto.

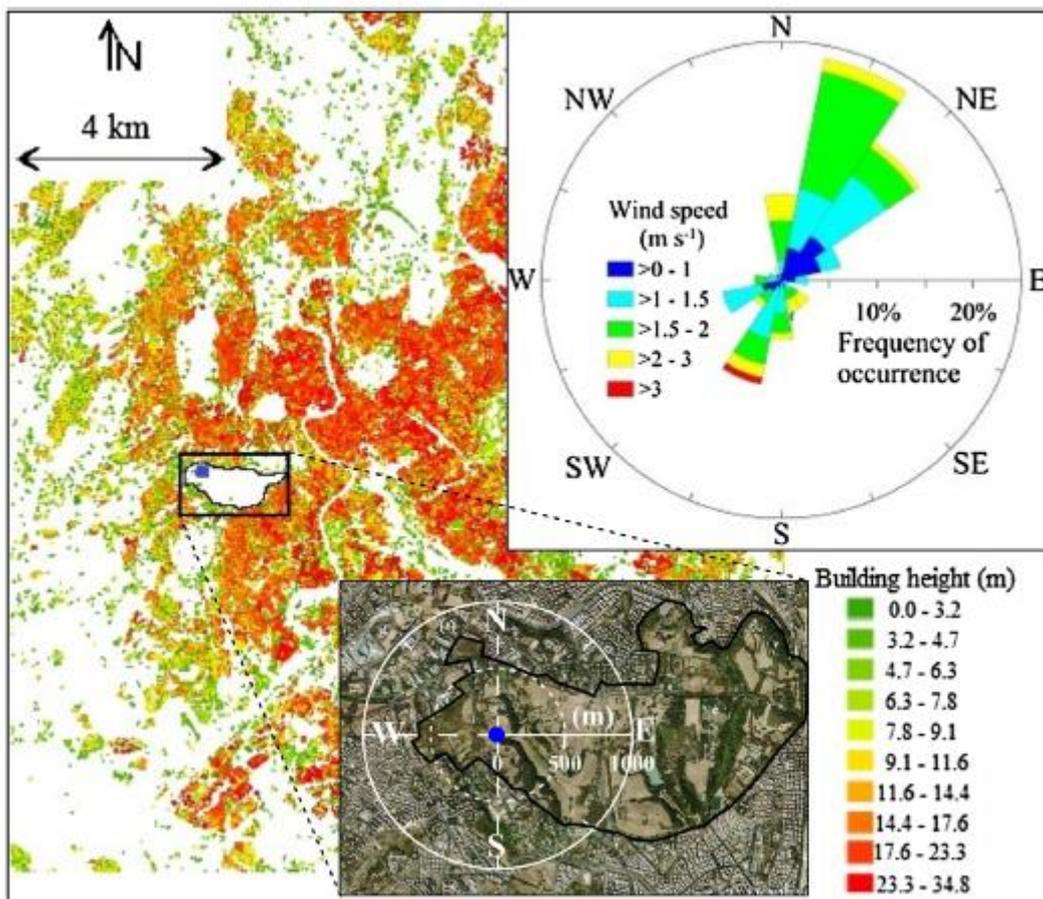


Figura 21: localizzazione del caso studio e alcune informazioni sulle sue caratteristiche principali, da Pelliccioni et al. (2015). Sono riportati l'inquadramento del sito, la rosa dei venti relativa al punto in cui è collocata la stazione di monitoraggio, e una statistica sulle altezze degli edifici della zona.

La strumentazione a disposizione, come descritta al paragrafo 1.4 e comprendente un SODAR, due anemometri triassiali e due termistori, ha consentito di disporre dei dati di velocità del vento a partire da una quota di 40 m fino a una quota di 200 m, con una risoluzione spaziale pari a 20 m e risoluzione temporale pari a 10 minuti (il sistema ha fornito le informazioni mediate ogni passo temporale). I due anemometri tri-assiali ultrasonici, alle quote di 5.5 e 10 m, hanno consentito il calcolo della velocità d'attrito  $u_*$ , e grazie alle informazioni registrate dai due termistori è stato possibile selezionare i profili che rispondessero a specifiche condizioni legate anche alla temperatura dell'aria: infatti, è importante notare come la condizione di stratificazione neutra implichi una attenta selezione dei dati a disposizione e l'applicazione di criteri piuttosto stringenti circa le condizioni che devono essere rispettate. In particolare, una grandezza caratteristica definita nello studio della stratificazione atmosferica è la *lunghezza di Obukhov*, definita come l'altezza rispetto al suolo alla quale la produzione di energia cinetica meccanica e quella dovuta al galleggiamento, quindi a un effetto termico, si eguagliano:

$$L = \frac{u_*^3 \bar{\theta}}{gk\theta'w'} \quad (30)$$

Nel caso in esame, la procedura per la determinazione di questa grandezza è riportata in (Pelliccioni et al. 2012), e ci si limita a considerare le registrazioni che rispettano la condizione  $\left|\frac{z}{L}\right| \leq 0.01$  per assicurarsi la rappresentatività di un UBL in stratificazione neutra. Entro queste limitazioni, la direzione più frequente di provenienza del vento è stata N-NE, perciò, per le elaborazioni, si è considerato un settore in direzione (rispetto al N) di  $22.5^\circ$  e ampiezza di  $22.5^\circ$ . Questo è anche il settore considerato in questo lavoro per il calcolo dei parametri morfometrici. Si sono, infine, inclusi nell'analisi solo i profili in cui la variazione verticale della direzione del vento tra le quote di 10 e di 200 m non superasse i  $22.5^\circ$ . In questo modo si è arrivati a considerare un totale di 36 profili per le analisi. Questo ha permesso la definizione delle medie della velocità del vento lungo la direzione

di incidenza per diverse quote. È infatti possibile ricostruire dei profili tali che, per ogni quota, il valore di velocità sia pari al valor medio delle registrazioni effettuate a quella stessa quota e riferite ai 36 profili scelti per costituire il campione di analisi. Questi vengono quindi utilizzati per il confronto dei profili calcolati in questo lavoro con le osservazioni reali. Un altro tipo di dato rilevante, di cui si è discusso in precedenza, è quello relativo alla morfometria del sito, disponibile secondo quanto esposto al Capitolo 2.

### **3.4 Il caso studio del Dipartimento di Fisica a Roma, La Sapienza, edificio Enrico Fermi**

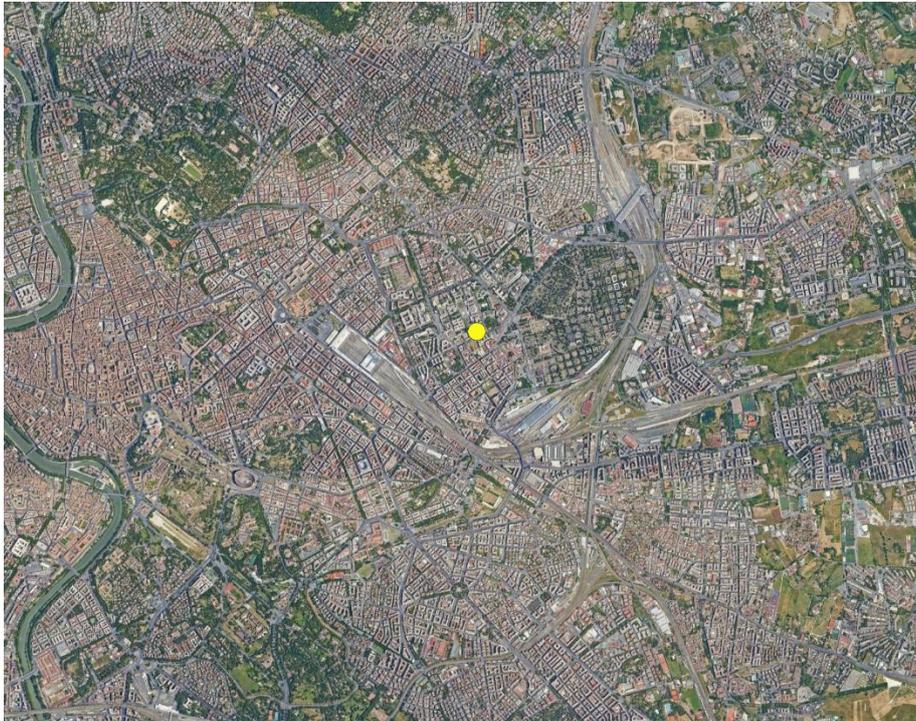
Un altro caso studio che si è scelto di affrontare è quello relativo ai dati di monitoraggio delle caratteristiche del vento registrati sull'edificio Enrico Fermi a Roma, del Dipartimento di Fisica de La Sapienza. I dati sono stati acquisiti attraverso strumentazione SODAR, analogamente al caso di Villa Pamphili, e consistono in un insieme di informazioni (che si riportano qui di seguito) da permettere un'analisi dei profili di vento in termini di una loro modellizzazione attraverso l'utilizzo delle caratteristiche morfometriche del tessuto urbano circostante. È infatti stato possibile suddividere i dati in categorie di velocità (operazione necessaria, come dettagliato in seguito, per l'attribuzione della corretta classe di stabilità secondo Pasquill), in funzione della direzione di provenienza (operazione necessaria per la correlazione con i parametri morfometrici calcolati per il settore corrispondente), e valutare la stabilità dei profili lungo la verticale (analizzare, per esempio, la componente verticale per confermare l'assenza di correnti ascendenti e discendenti, o verificare la costanza, entro una certa tolleranza, della direzione di provenienza tra le diverse quote). In Figura 22 è riportato l'inquadramento del caso studio; il punto blu indica la posizione dell'edificio sopra cui è montata la strumentazione SODAR.

I dati per questo caso studio comprendono (per tutte le quote disponibili):

- Il modulo della velocità del vento;
- La direzione azimutale del vento;
- La componente verticale della velocità;

- Le statistiche sull'acquisizione dei dati (come si vedrà, particolarmente rilevante è l'incertezza della componente verticale espressa come deviazione standard).

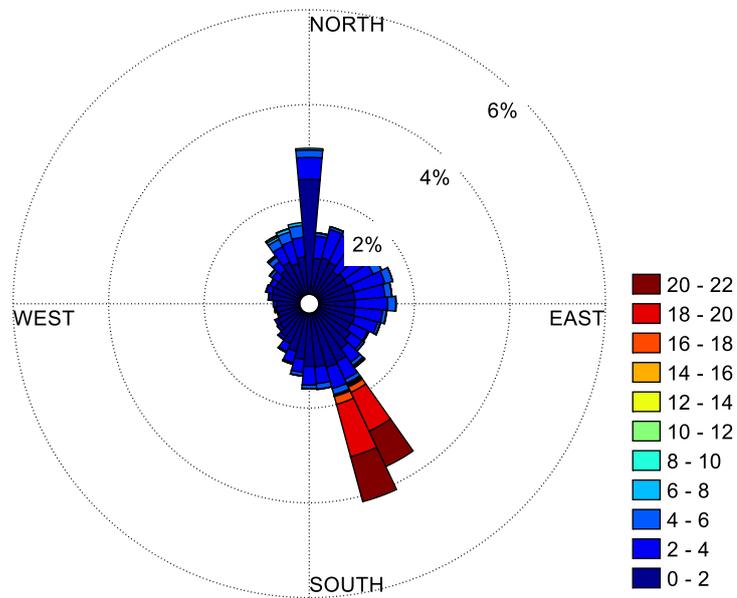
Sono disponibili anche i dati relativi all'irraggiamento solare (importanti per la scelta dei profili da considerare), registrati da un piranometro situato nella stessa posizione del SODAR. La quota topografica di riferimento della zona è pari a circa 45 m, e l'orografia è regolare: per una estensione circolare di raggio di 500 m la quota cresce costantemente verso SO, con una pendenza dell'1.6%. L'altezza dell'edificio, sopra il quale è montata la strumentazione, è pari a 25 m. Le quote alle quali vengono acquisiti i dati di vento vanno da circa 80 m (s.l.m.) a circa 250 m (s.l.m.), il passo è di circa 6 m.



*Figura 22: Inquadramento della zona del caso studio intorno all'edificio Enrico Fermi (punto giallo). Scala 1:50000.*

Il periodo di riferimento è l'anno 2019, e viene considerato nella sua interezza. Ogni registrazione si intende come il risultato della media del valore istantaneo della grandezza (velocità,

direzione, ecc.) su un intervallo temporale di 10 minuti; viene registrato un valore ogni secondo. La caratterizzazione anemologica del sito è riportata nei grafici dalla Figura 23 alla Figura 25. Nello specifico, la rose dei venti raffigurate sono costruite considerando i dati a disposizione per tre quote di riferimento (tutte rispetto al livello del mare): la più vicina al suolo, in Figura 23, riporta la sintesi delle registrazioni di direzione e velocità del vento effettuate a quota 90 m, la seconda, in Figura 24, a 148 m, e la terza alla quota più elevata di cui si dispone dei dati, ovvero 205 m, in Figura 25. La suddivisione in classi di velocità si intende in m/s.



*Figura 23: Rosa dei venti riferita alla stazione di monitoraggio all'edificio Enrico Fermi. La scala di intensità di colore riportata sulla destra si riferisce alle classi dei valori di velocità. Quota 90 m s.l.m..*

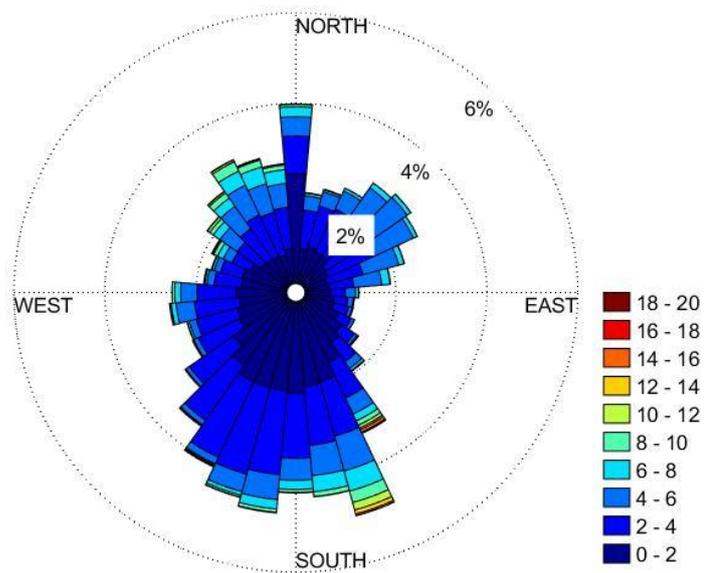


Figura 24: Rosa dei venti riferita alla stazione di monitoraggio all'edificio Enrico Fermi. La scala di intensità di colore riportata sulla destra si riferisce alle classi dei valori di velocità. Quota 148 m s.l.m..

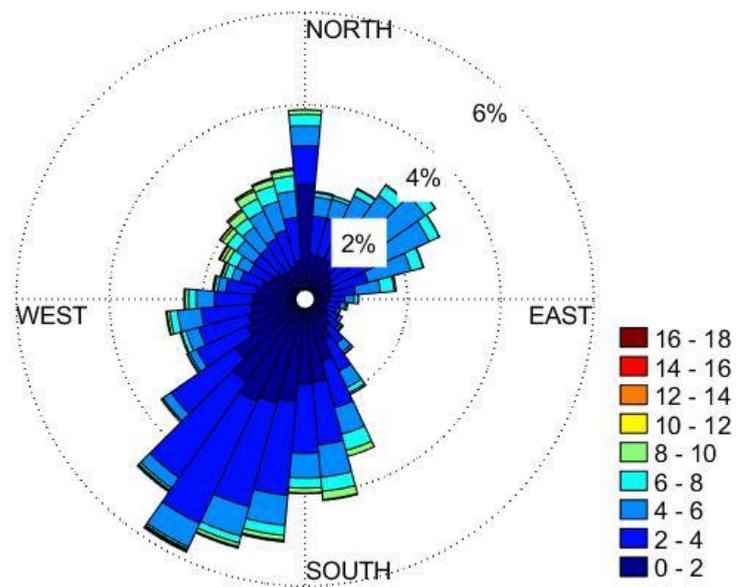


Figura 25: Rosa dei venti riferita alla stazione di monitoraggio all'edificio Enrico Fermi. La scala di intensità di colore riportata sulla destra si riferisce alle classi dei valori di velocità. Quota 205 m s.l.m..

## 4 Risultati

### 4.1 Analisi su larga scala, primo confronto Cagliari – Roma

La Figura 26 e la Figura 27 si riferiscono alle elaborazioni morfometriche dei dati sui casi studio svolte sulla griglia adattiva. La Figura 26 mette in evidenza il differente impianto delle due zone urbane considerate: nonostante questo, molti elementi sono caratterizzati da assenza di edifici, e quindi da valore nullo del parametro  $\lambda_p$ . In Figura 27 si mostra un andamento analogo per quanto riguarda i valori nulli del parametro  $\lambda_f$  (come, in effetti, deve essere dalle definizioni dei parametri)<sup>10</sup>, ma una caratteristica piuttosto differente in relazione al resto della distribuzione, in accordo con quanto riportato in Figura 28, che mostra come la zona di Roma presenti altezze in generale più elevate.

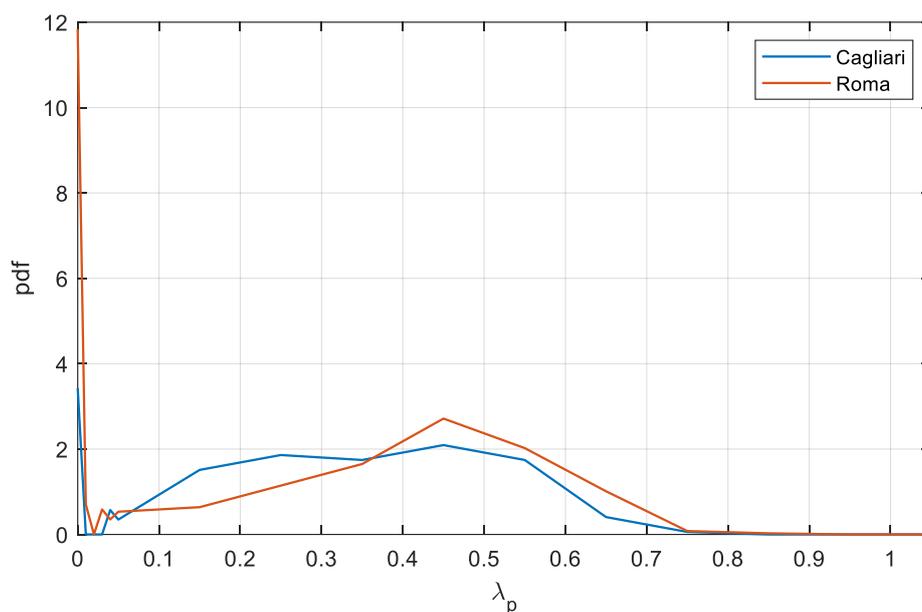


Figura 26: pdf di  $\lambda_p$  per i due casi studio (si è considerato un valore minimo per le aree di  $5000 \text{ m}^2$ ). Riportata da Salvadori et al. (2021).

---

<sup>10</sup> Si rimanda all'Appendice A per gli approfondimenti sul calcolo dei due parametri.

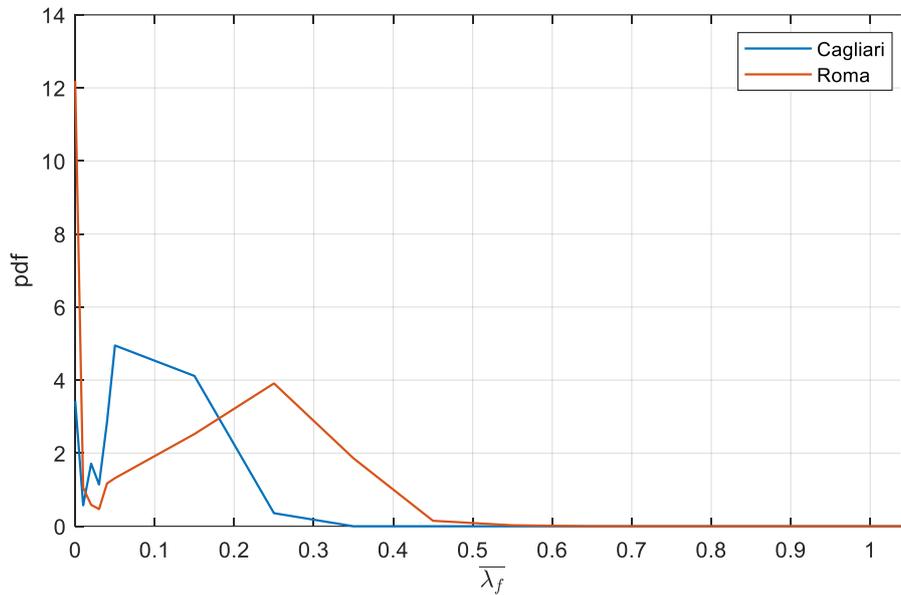


Figura 27: pdf di  $\bar{\lambda}_f$  per i due casi studio (si è considerato un valore minimo per le aree di 5000 m<sup>2</sup>). Riportata da Salvadori et al. (2021).

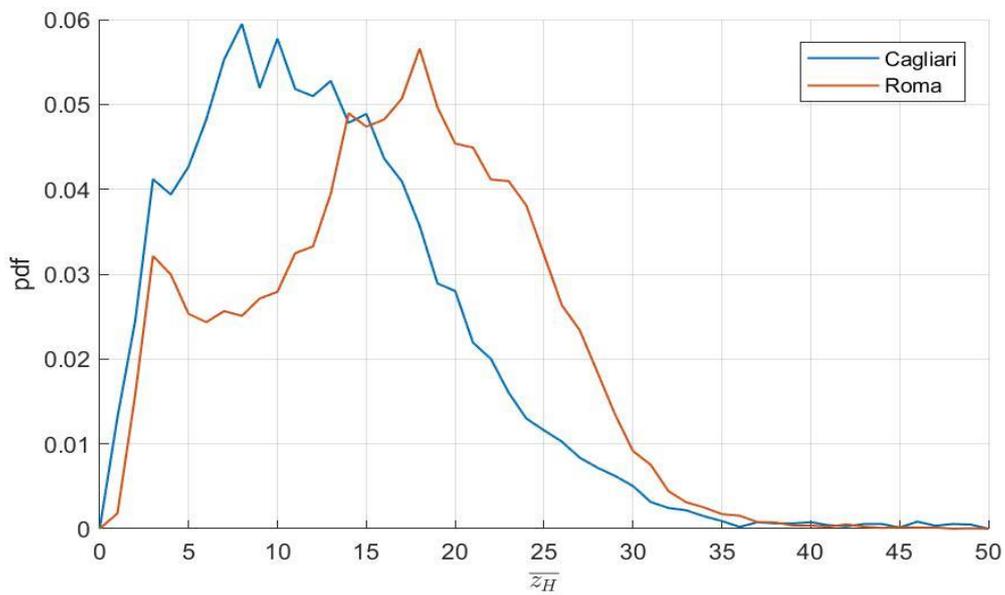


Figura 28: pdf di  $\bar{z}_H$  per i due casi studio (calcolata direttamente sugli edifici). Riportata da Salvadori et al. (2021).

La descrizione più fedele della conformazione urbana da parte della griglia adattiva rispetto a quella regolare si può riscontrare soprattutto per  $\lambda_f$  (vedere dalla Figura 29 alla Figura 31) a diverse scale di analisi: utilizzando una griglia regolare, infatti, i massimi per  $\lambda_f$  si identificano sempre lungo le direzioni delle diagonali dei quadrati che costituiscono la griglia, a differenza del caso in cui si utilizzi un grigliato di tipo irregolare, in cui l'andamento rappresenta più realisticamente le caratteristiche del tessuto urbano considerato in funzione della direzione del vento. La Figura 29 si riferisce ad alcuni rioni di Roma caratteristici, mentre la Figura 30 mostra i risultati relativi ai quartieri di Cagliari analizzati. Altro aspetto da considerare è l'estensione del centro: infatti, come mostrato in Figura 31, per Cagliari si è riscontrata in generale una sovrastima del dato in riferimento alla griglia regolare rispetto a quella derivata dal grafo, mentre per Roma vale il viceversa. I valori di  $\lambda_f$  riportati dalla Figura 29 alla Figura 31 si intendono calcolati come media dei valori corrispondenti a una determinata direzione riferiti a tutti gli elementi (isolati o quadrati) che compongono un rione (Figura 29), un quartiere (Figura 30) o l'intera area analizzata (Figura 31).

La somiglianza tra le pdf relative a  $\lambda_p$  è significativa. La classe per cui si riscontra la maggiore differenza è quella prossima ai valori nulli, che di fatto rappresenta la meno attendibile rispetto all'analisi fondata sull'utilizzo della griglia irregolare, vista le discrepanze nella creazione dei poligoni in base al differente tipo di dato di partenza per il grafo stradale, come discusso al paragrafo 2.1. L'analogia riscontrata per le altre classi, invece, legittima l'ipotesi di una generalizzazione della distribuzione dei valori per  $\lambda_p$ , naturalmente in seguito a indagini che coinvolgano un maggior numero di centri urbani, italiani e non. Per contro, il confronto tra le pdf dei valori di  $\bar{z}_H$  riportato in Figura 28 evidenzia come, rispetto a questo parametro, si abbiano differenze significative nella distribuzione dei valori. Essendo questo vero sia in riferimento all'individuazione del valore più probabile sia in riferimento alla dispersione intorno a quest'ultimo, i risultati escludono inoltre la possibilità di una semplificazione circa l'attribuzione del valore di altezza degli edifici: non è consigliabile l'utilizzo di uno solo, considerato come rappresentativo per l'intera estensione, quando la scala di analisi è larga. Le differenze riscontrabili nelle distribuzioni per  $\bar{\lambda}_f$  sono evidentemente il frutto della combinazione tra le due tipologie appena esposte: la forte

dissimilarità per i valori prossimi allo 0 e le differenze nel resto della distribuzione che ricalcano, qualitativamente, quelle riscontrate per  $\overline{z_H}$ , rimarcando la necessità di indagini sito-specifiche per una caratterizzazione morfometrica accurata. Inoltre, i diagrammi riportati in Figura 29, Figura 30 e Figura 31 costituiscono ulteriore conferma di questa esigenza. Da una parte, infatti, è importante notare le differenze tra i valori riportati per ogni rione o quartiere delle due città e quelli complessivi del sito corrispondente da cui è stato estrapolato. D'altra parte, è altrettanto importante notare anche le differenze qualitative e quantitative tra l'utilizzo dei due tipi di griglie proposti. In questo lavoro si può affermare una maggiore rappresentatività dei risultati relativi all'utilizzo di una griglia irregolare solo in riferimento a un confronto qualitativo con i tessuti urbani analizzati, ma è certamente interessante un confronto basato sull'applicazione dei valori ottenuti nella caratterizzazione della superficie urbana nell'ambito della modellistica aerodinamica urbana. Si spera, quindi, di aver dato lo spunto per successive approfondite analisi sull'importanza della scelta del tipo di suddivisione da utilizzare.

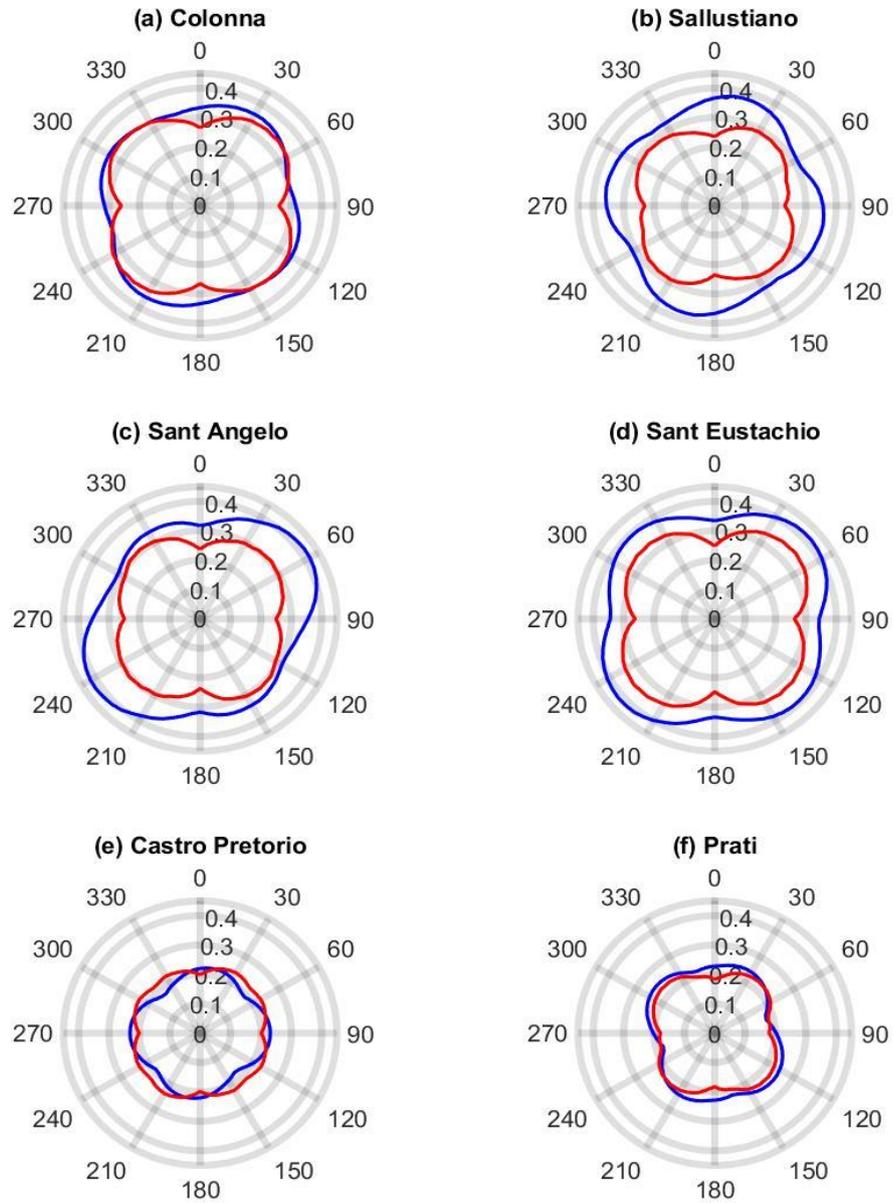


Figura 29: valori di  $\lambda_f$  in funzione della direzione del vento per alcuni rioni di Roma. La linea blu indica i risultati relativi all'utilizzo della griglia adattiva, la linea rossa quelli relativi all'utilizzo della griglia regolare. Riportata da Salvadori et al. (2021).

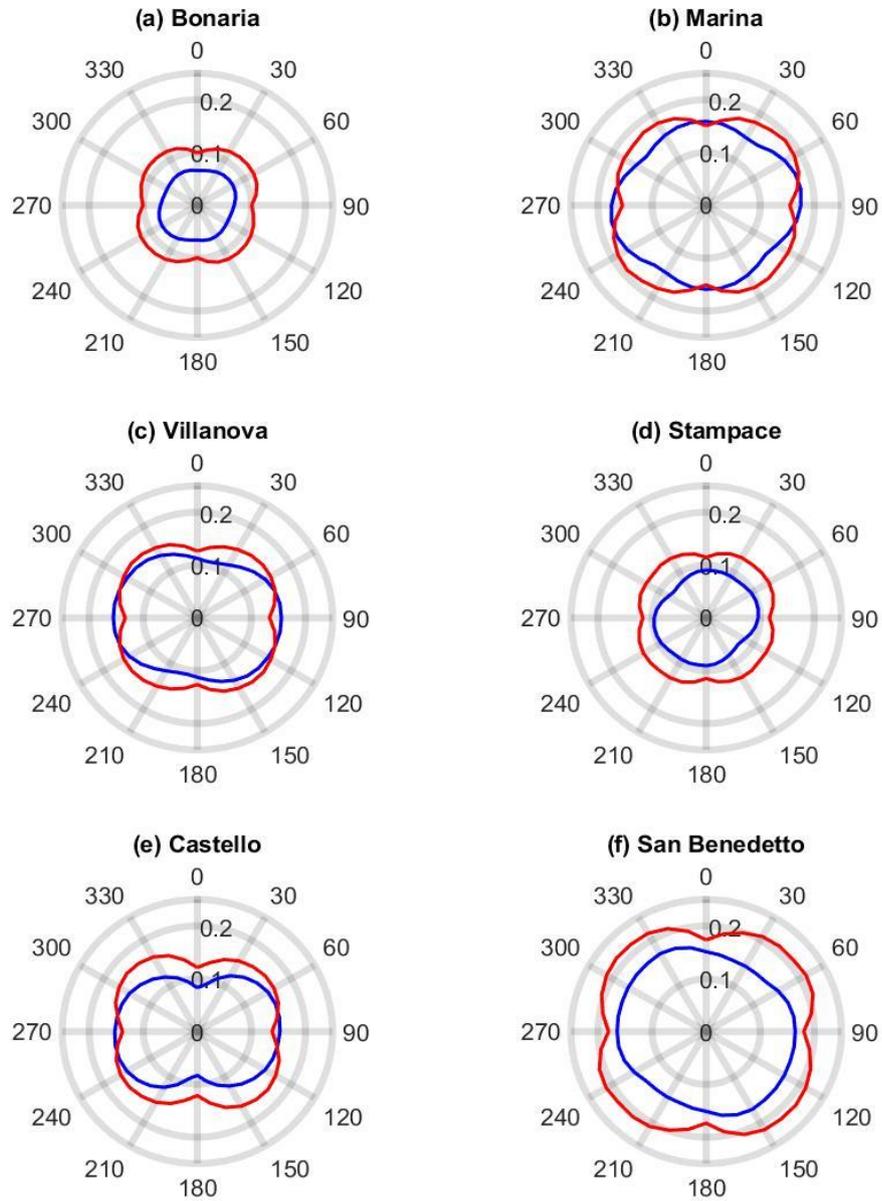


Figura 30: valori di  $\lambda_f$  in funzione della direzione del vento per alcuni quartieri di Cagliari. La linea blu indica i risultati relativi all'utilizzo della griglia adattiva, la linea rossa quelli relativi all'utilizzo della griglia regolare. Riportata da Salvadori et al. (2021).

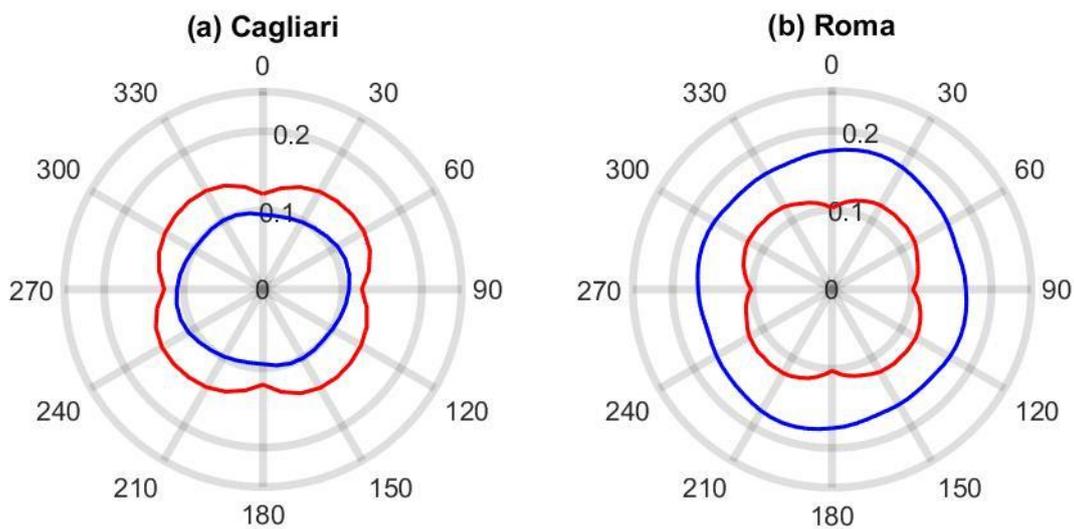


Figura 31: confronto dei valori di  $\lambda_f$  in funzione della direzione del vento per i due casi studio nella loro intera estensione. La linea blu indica i risultati relativi all'utilizzo della griglia adattiva, la linea rossa quelli relativi all'utilizzo della griglia regolare. Riportata da Salvadori et al. (2021).

Si riportano anche i risultati relativi alla caratterizzazione dei canyon urbani. Volendo considerare una determinata zona, come per esempio un quartiere, all'interno di un centro edificato, può essere utile disporre del valore più probabile per RFc e RFe, per rappresentarlo nel modo più realistico possibile. In Figura 32 e Figura 33 si riportano le pdf, rispettivamente per RFc e RFe, e per entrambe le zone urbane analizzate. Si considerano, per ogni grafico, l'andamento medio, inteso come riferito all'intera estensione, le due curve di involucro, determinate dai massimi e i minimi delle pdf riferite a ogni singolo quartiere o rione, e gli andamenti di alcune zone che presentano particolare scostamento dall'andamento medio (a cui sono dovuti, quindi, i massimi e i minimi che maggiormente caratterizzano la forma dell'involuppo). È possibile notare anzitutto una certa somiglianza, in riferimento all'andamento medio, delle due zone rispetto sia a RFc che a RFe, potendo quindi supporre che, almeno per i casi in esame, l'andamento medio su certe estensioni tenda a uniformare i valori.

Questo risultato è particolarmente rilevante, in relazione allo studio della possibilità di una generalizzazione dei risultati sulla caratterizzazione dei canyon urbani, su quale sia la scala di analisi per cui è lecito semplificare e attribuire un valore rappresentativo, e quando, invece, è necessaria una maggiore specificità. L'uniformità qualitativa delle distribuzioni dei valori mostra, sia per RFc che per RFb, che l'individuazione di un valore più probabile è in effetti possibile. Tuttavia, la variabilità nei risultati quando si considerano zone più specifiche (in questo caso distretti e rioni), rappresentata sinteticamente dalle curve inviluppo, sottolinea ancora una volta l'importanza di riferirsi a valori dei descrittori dei canyon appositamente derivati per l'area di interesse piuttosto che a generici range derivanti da raggruppamenti in classi di configurazioni urbane. Questa, in effetti, è anche una delle principali motivazioni che hanno guidato verso l'affinamento del metodo e l'applicazione a siti di maggiori dimensioni e locati in diverse regioni geografiche (inquadrato da un punto di vista teorico al paragrafo 2.2, applicato ai casi studio descritti al paragrafo 3.2 e di cui i risultati sono riportati al paragrafo 4.3).

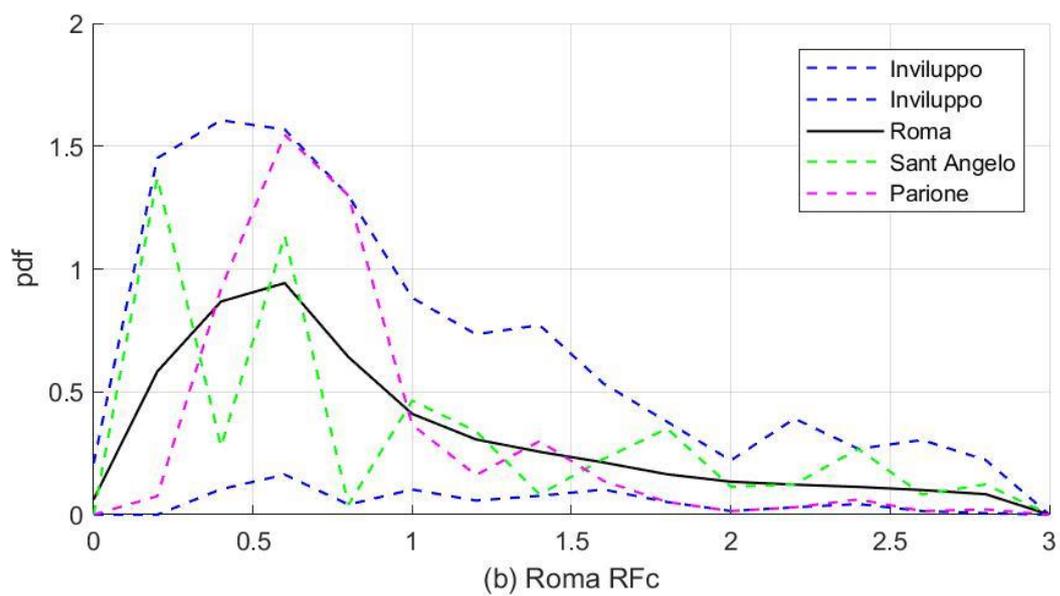
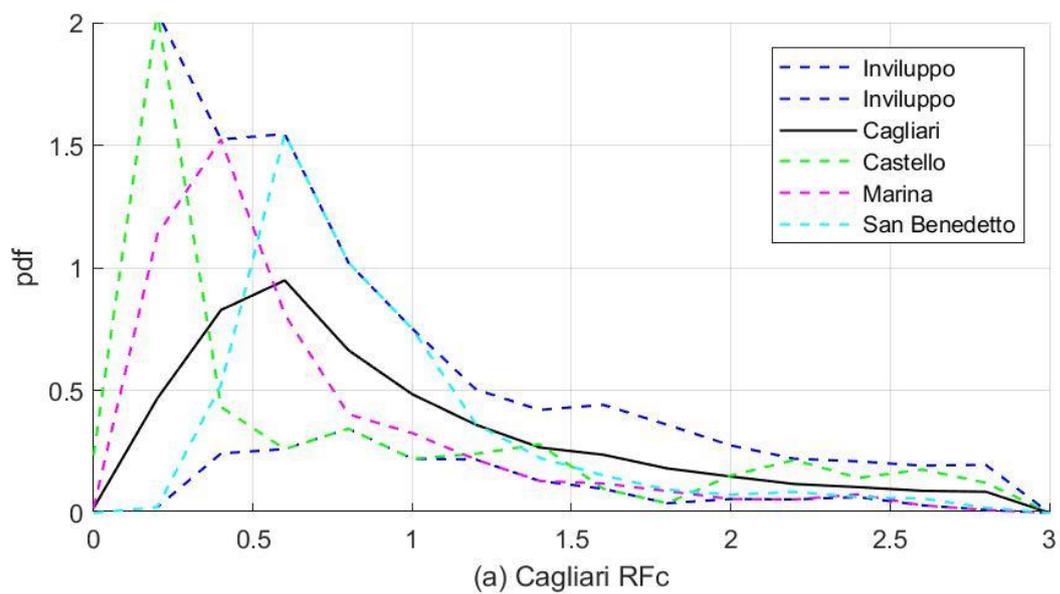


Figura 32: pdf di RFc per i due casi studio. Riportata da Salvadori et al. (2021).

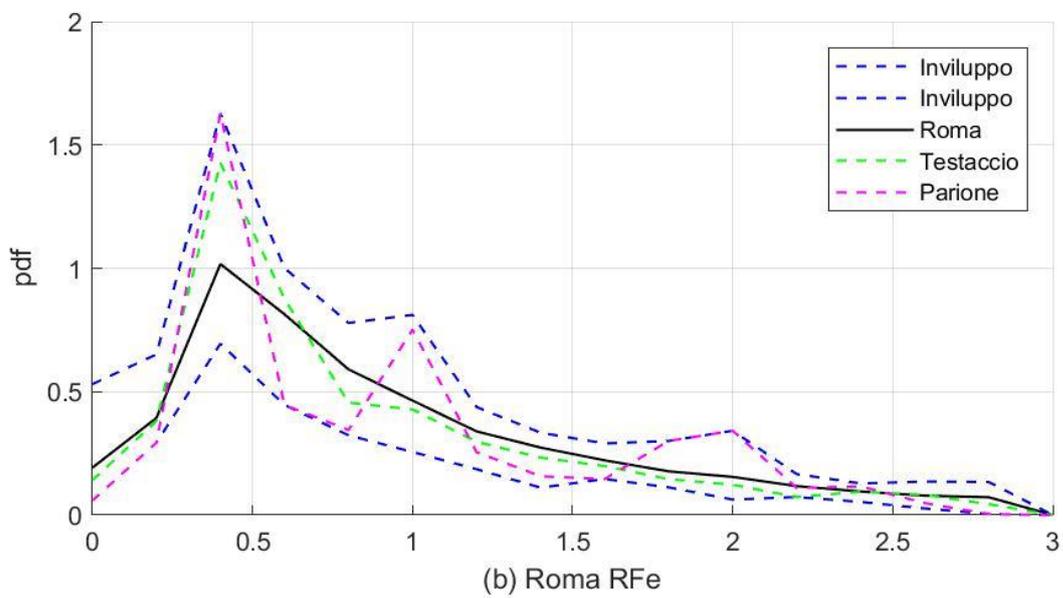
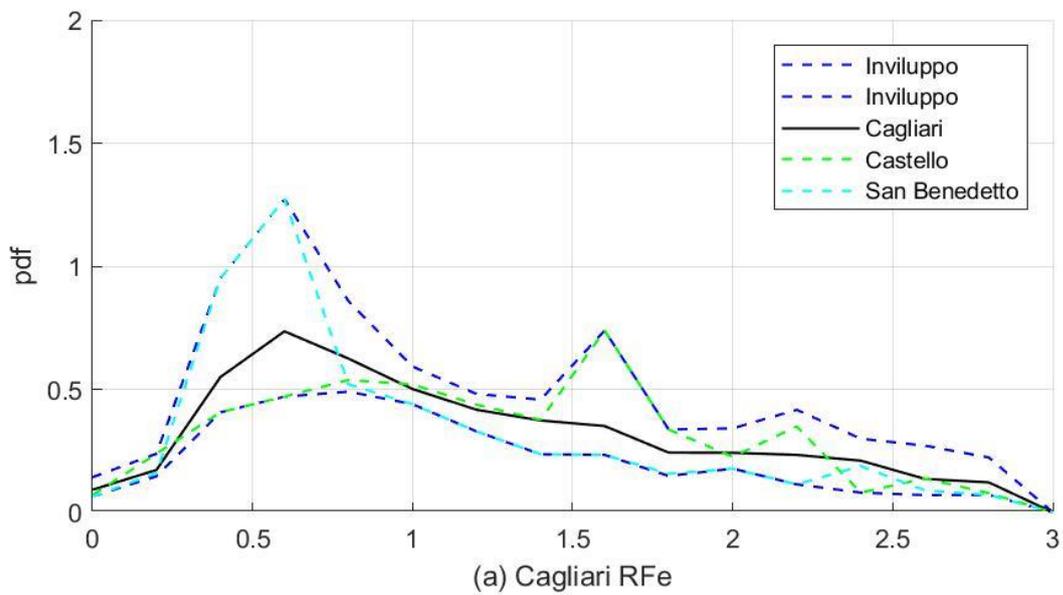


Figura 33: pdf di RFe per i due casi studio. Riportata da Salvadori et al. (2021).

## 4.2 Somiglianza dei parametri tra zone architettonicamente confrontabili

Riguardo la possibilità di ottenere una parametrizzazione morfometrica di una zona in base alle sue caratteristiche architettoniche, oltre a quanto discusso per  $\lambda_p$  e  $\lambda_f$ , i risultati relativi alle analisi sulle due zone estese riportati al paragrafo 4.2 mettono in evidenza come sia difficile trovare una corrispondenza univoca tra quartieri omogenei, in relazione a queste prime suddivisioni considerate. Questo, però, non può di per sé portare a concludere che una classificazione non sia possibile: ancora su Cagliari e Roma, si sono estratte due zone omogenee e simili tra loro per data di costruzione o ammodernamento, e la caratterizzazione morfometrica ha portato risultati piuttosto simili. Le zone in esame sono quelle mostrate in Figura 34: per Cagliari si è considerata la parte immediatamente a Nord rispetto al quartiere di San Benedetto (da qui in avanti A1), mentre per Roma si è estratta una parte nei pressi della “Piazza dei Re di Roma”, tra la via Tuscolana e la via Appia (in seguito A2). In Tabella 2 si riporta una tabella di confronto tra alcuni parametri calcolati per le due aree, e in Figura 35 e Figura 36 altri confronti grafici per le due zone: è possibile notare una certa somiglianza sia nell’andamento polare di  $\lambda_f$  che nelle pdf per RFc e RFe, in cui i valori più probabili si attestano entro un intorno limitato per entrambi i parametri e per entrambi i casi studio. Nell’insieme, questi risultati mostrano una buona comparabilità, e si ritiene quindi il tema delle classificazioni come uno di quelli da approfondire nell’immediato futuro; sono infatti riportati anche in Salvadori et al. (2019).

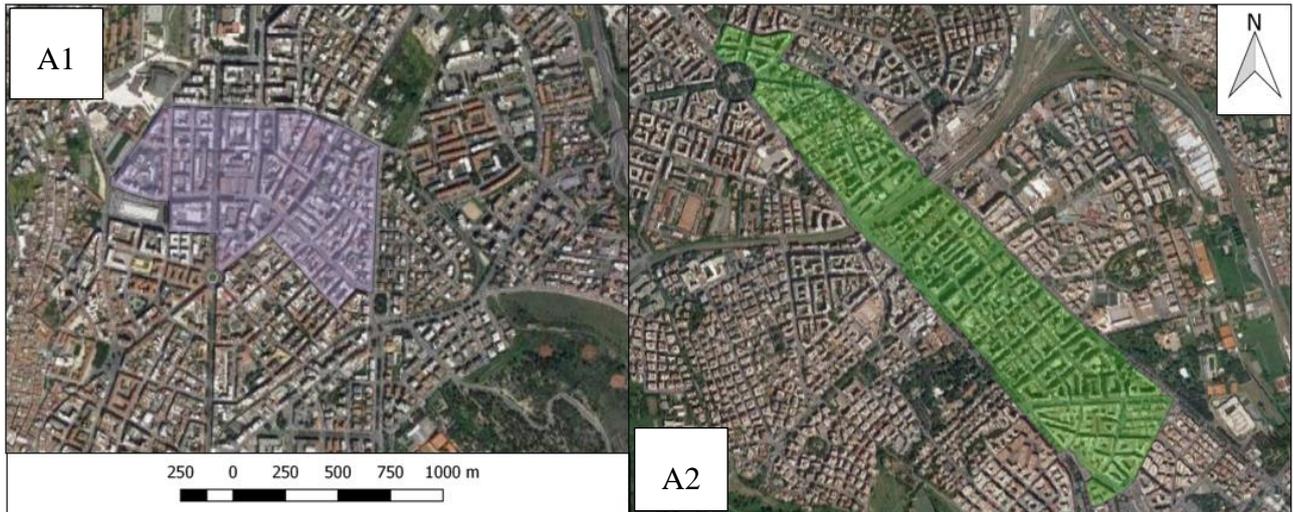


Figura 34: Individuazione delle due aree studio relativamente alla simile data di costruzione o ammodernamento.

Tabella 2: Sintesi di alcuni parametri morfometrici per A1 e A2.

Sito	Altezza media [m]	Deviazione standard altezza [m]	$\lambda_p$ [-]
A1	17,78	10.44	0,587
A2	21,47	10.02	0,613

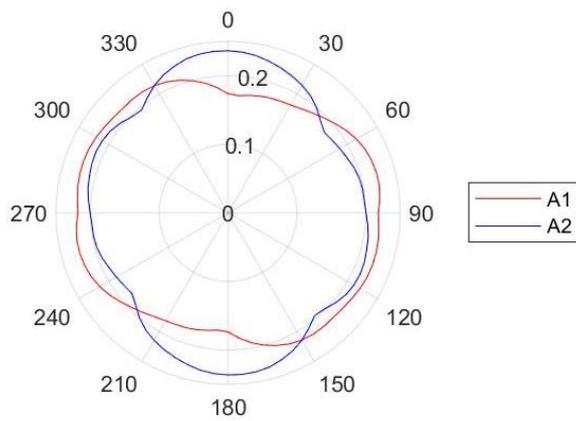


Figura 35: valori di  $\lambda_f$  in funzione della direzione del vento, confronto tra A1 e A2.

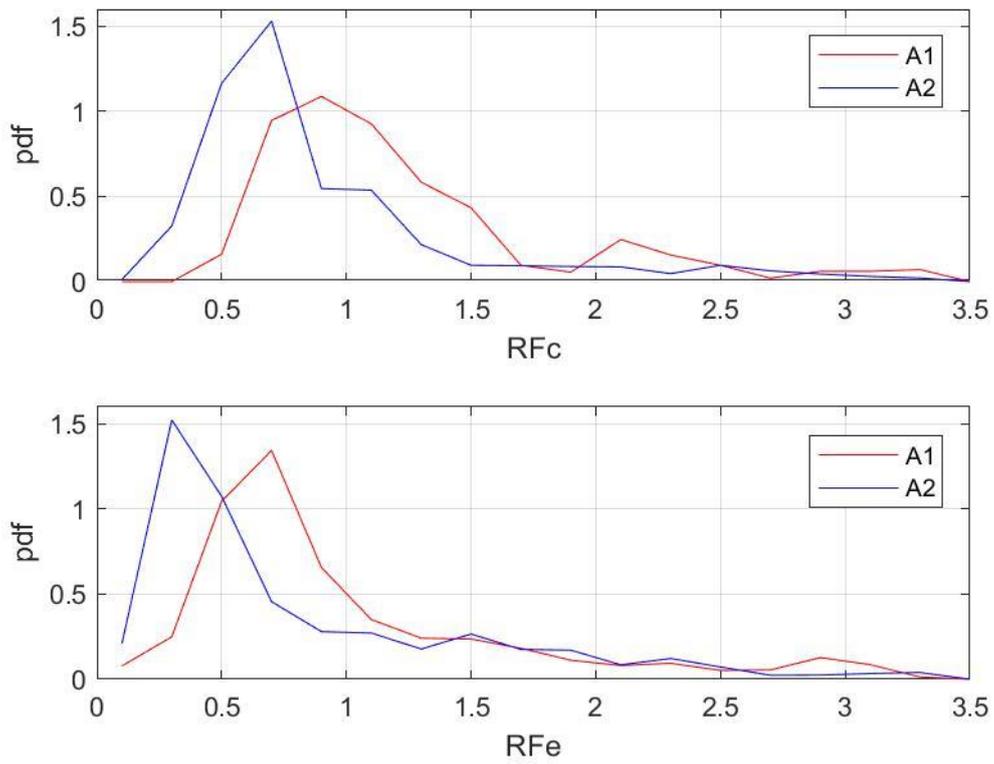


Figura 36: pdf per RFc e RFe in riferimento a A1 e A2.

### 4.3 Analisi dei canyon urbani utilizzando il metodo topologico

Dalla Figura 37 alla Figura 40 si riportano i risultati relativi alle elaborazioni dei dati sul tessuto urbano dei casi studio descritti al paragrafo 3.2, utilizzando il metodo della suddivisione topologica dello spazio urbano per la creazione dei canyon.

Per tutti i grafici, si riportano gli istogrammi normalizzati in modo da fornire una *pdf* dei valori assunti, il valore mediano (linea e indicazione numerica rossa), il valore medio (linea e indicazione numerica viola) e la distribuzione più simile all'istogramma normalizzato che si è trovata (linea verde). Solo in riferimento alla lunghezza dei canyon (Figura 37) questa è una esponenziale, mentre per tutti gli altri parametri si tratta di una Weibull.

Nella maggior parte dei casi i valori maggiori di densità di probabilità non sono ben rappresentati. In particolar modo per le lunghezze, si può notare come, nonostante globalmente si abbia una buona rappresentatività, per i valori più prossimi allo 0 sia presente una sottostima rilevante. Il migliore adattamento della Weibull ai dati si ha per il rapporto R<sub>Fc</sub>, in particolare per Roma. In generale, comunque, si può notare una certa somiglianza tra i valori mediani e medi: sempre vero, per ogni parametro, per i confronti tra Roma e Londra (che sono i casi studio di cui si sono considerate le estensioni maggiori, quindi il maggior numero di canyon e, quindi, ragionevolmente i più rappresentativi), a cui si aggiunge Berlino, almeno per quanto riguarda i rapporti R<sub>Fc</sub> e R<sub>Fe</sub>. Almeno per questi ultimi due, quindi, si può dire che sia ragionevole considerare la distribuzione Weibull per stimare l'abbondanza delle tipologie di canyon dei centri urbani considerati, e che si possa avere un'indicazione di massima sul valore medio e mediano.

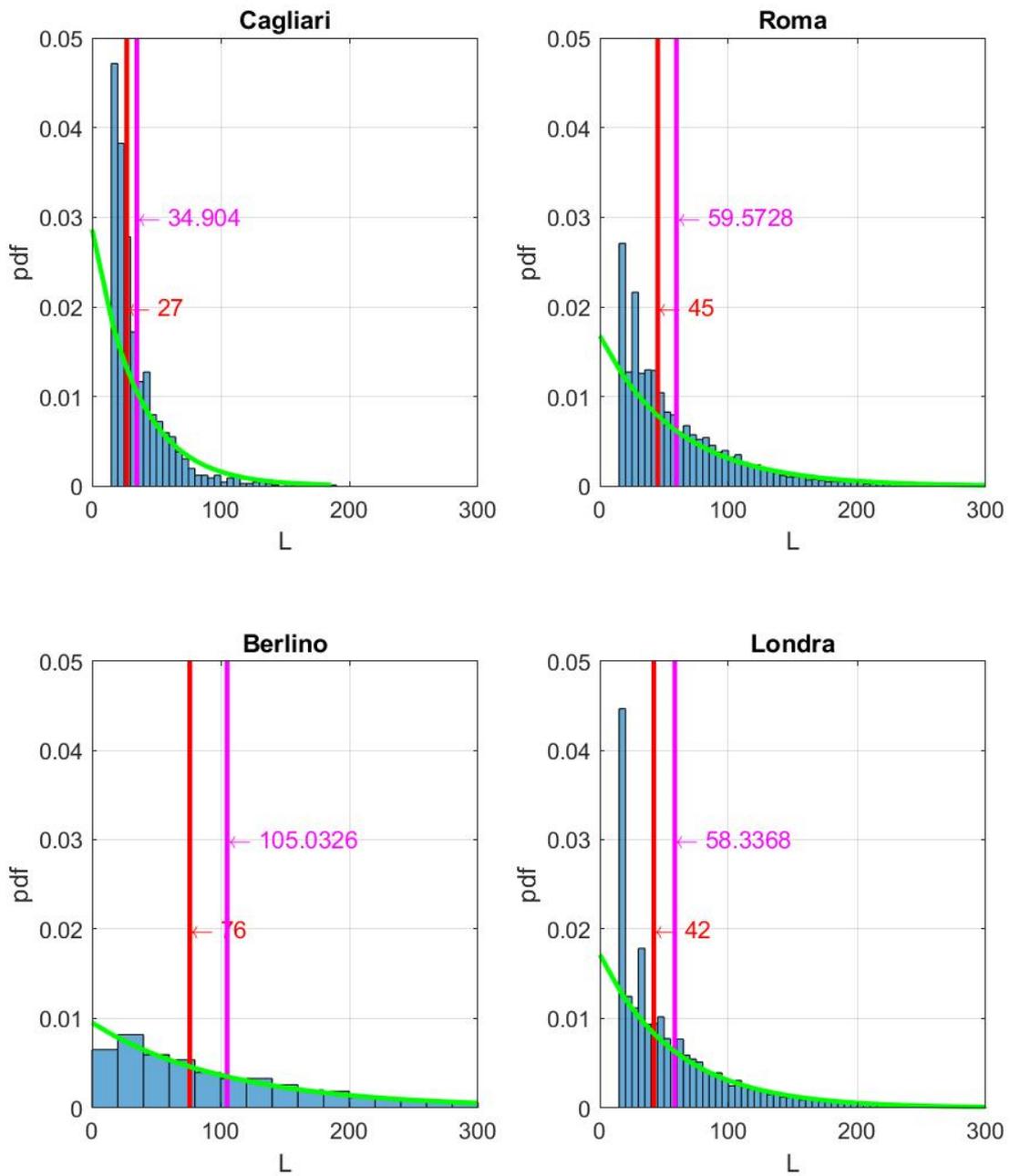


Figura 37: analisi dei canyon urbani, pdf della lunghezza.

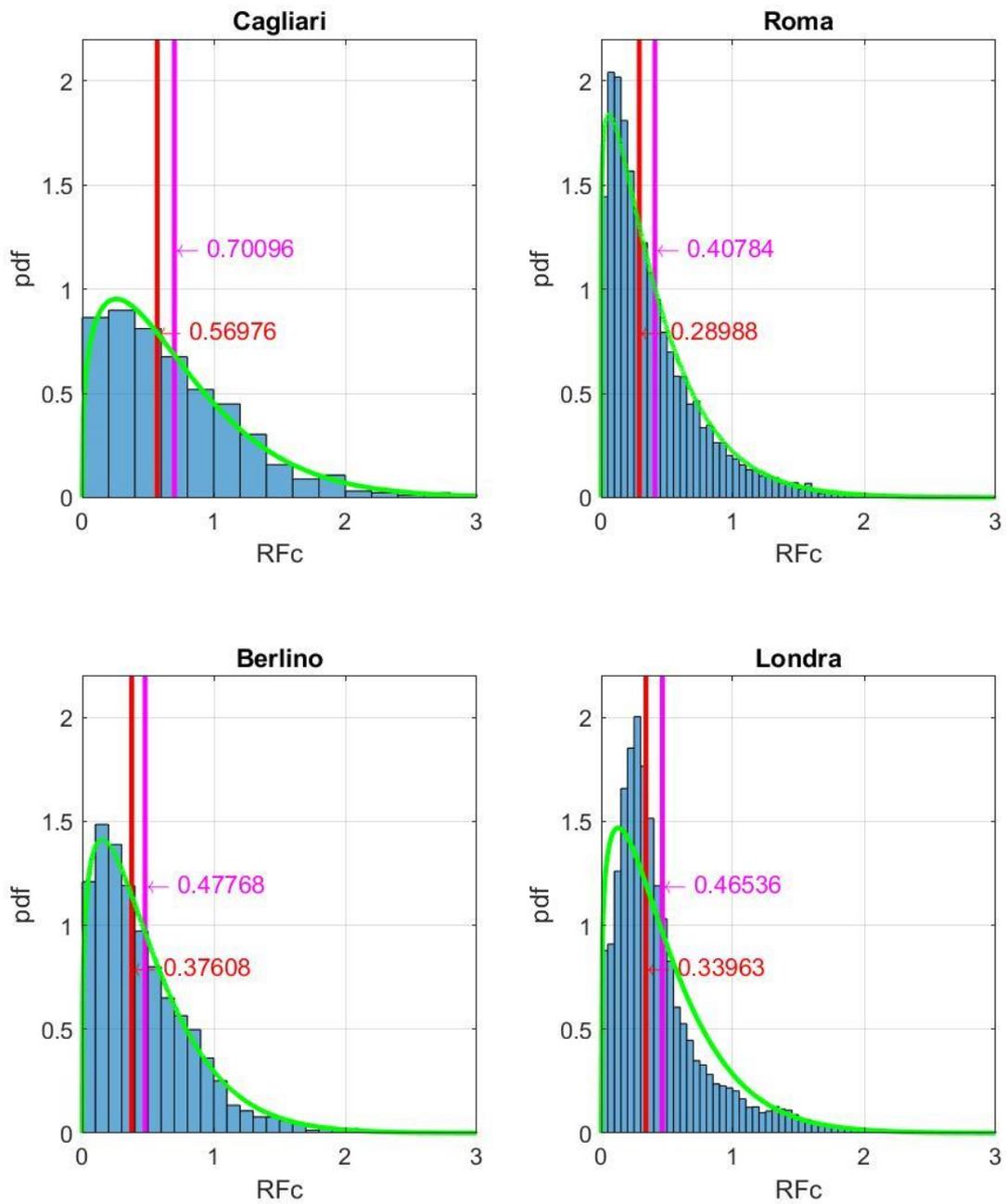


Figura 38: analisi dei canyon urbani, pdf del rapporto di forma riferito al canyon.

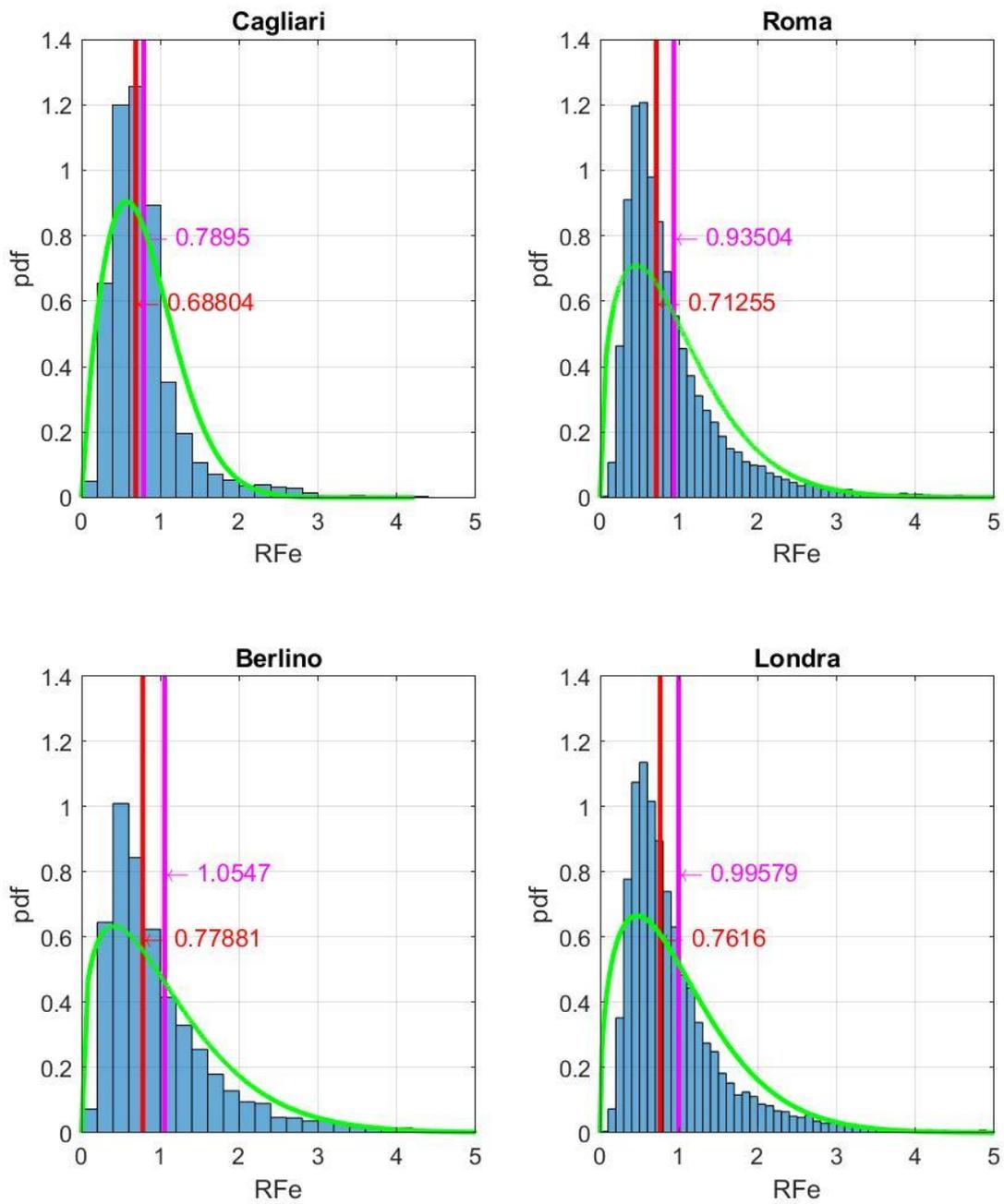


Figura 39: analisi dei canyon urbani, pdf del rapporto di forma riferito agli edifici.

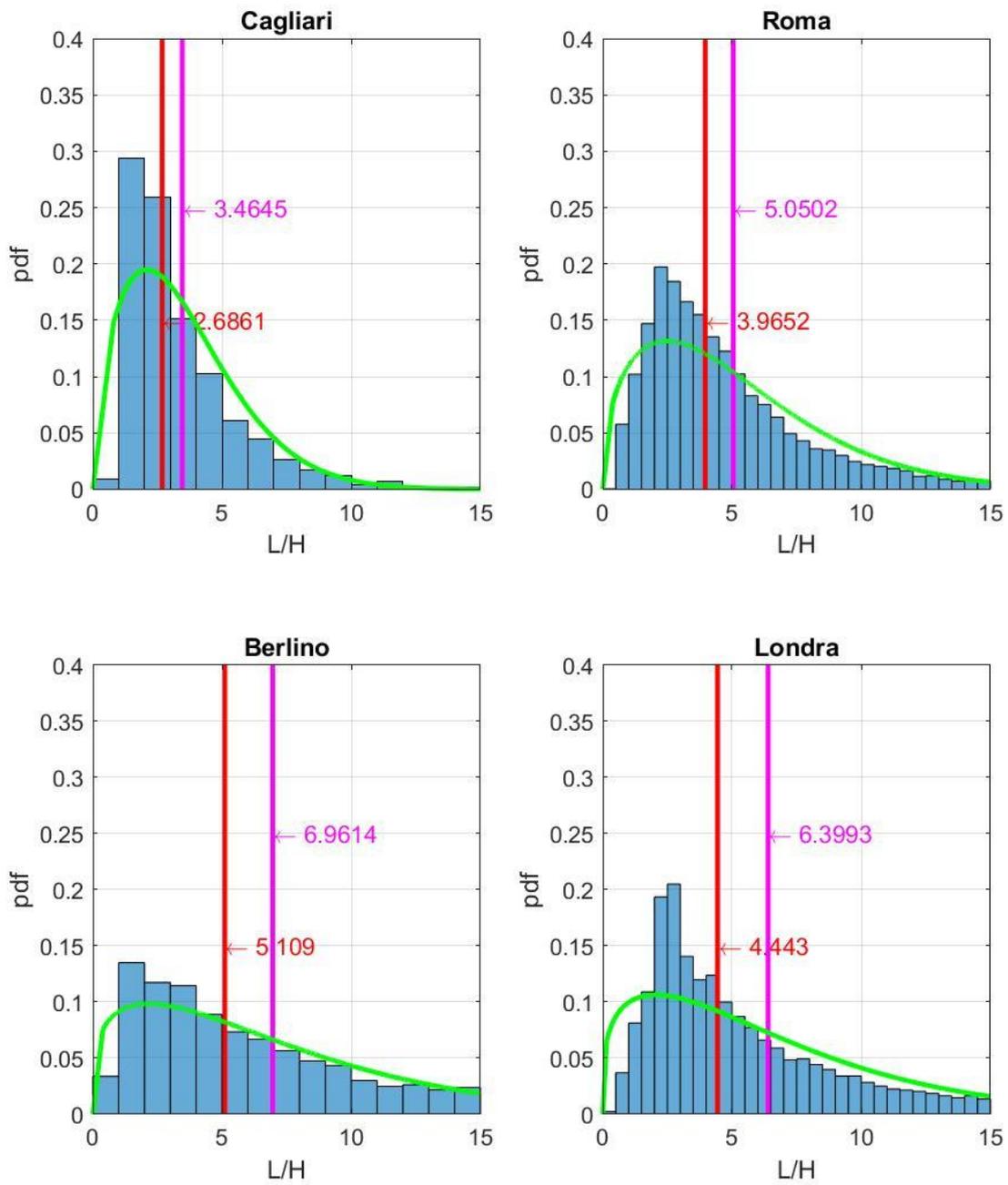


Figura 40: analisi dei canyon urbani, pdf del rapporto tra lunghezza e altezza media del canyon.

#### 4.4 Profili di velocità, prove condotte su Villa Pamphili

Gli obiettivi iniziali del lavoro sono stati quelli di analizzare l'influenza del raggio e dell'ampiezza considerati per il settore sull'attendibilità delle equazioni di MacDonald nella rappresentazione del profilo di velocità del vento in condizioni di stratificazione neutra. La zona analizzata è caratterizzata da tessuto naturale nelle immediate vicinanze della stazione di monitoraggio, e da tessuto urbano a partire da una distanza radiale di circa 500 m dalla stessa. L'altezza media rappresentativa degli edifici dichiarata in Pelliccioni et al. (2015) è  $H = 18$  m. Per le elaborazioni, si sono creati in totale 80 settori circolari, definiti dalla variazione del raggio da 1000 a 2500 m con passo pari a 100 m e dell'ampiezza dai 20 ai 40° con passo pari a 5°. Già dalle prime prove preliminari si è potuto osservare che per raggi maggiori di 1500 m l'accuratezza della modellazione decresce costantemente, perciò nel seguito vengono mostrati e discussi solo i risultati relativi ai settori con raggio minore o uguale a tale limite; per motivi analoghi si trascura di riportare i risultati relativi all'ampiezza di 40°. Inoltre, i risultati ottenuti sono riportati normalizzati rispetto alle grandezze caratteristiche del fenomeno e della zona considerata. Per le quote e le distanze, la grandezza di scala considerata è proprio l'altezza media degli edifici nella zona. Per quanto riguarda le velocità, non sono disponibili informazioni circa la velocità indisturbata a quota elevata, perciò si sceglie come scala la stessa velocità d'attrito  $u_*$ , posta pari alla media di quelle individuate nell'analisi dei dati precedentemente descritta, corrispondente a  $0.49 \frac{m}{s}^{11}$ .

Tra i 30 settori effettivamente considerati per le analisi (Figura 41), si è ricavata una media delle altezze (calcolate come media semplice dei valori del raster delle altezze all'interno del poligono del settore attraverso QGIS) di 16.21 m e una deviazione standard di 0.81 m (circa il 5% rispetto alla media). La ridotta deviazione standard dei valori dell'altezza è una importante

---

<sup>11</sup> Per quanto questa grandezza sia, in realtà, già un risultato dell'interazione tra il flusso e la superficie urbana, e sia quindi influenzata da quest'ultima. Come descritto nel testo, la scelta è determinata dalla carenza di altre informazioni.

condizione per la validità dei confronti dei risultati tra i settori. Considerata l'informazione di maggiore dettaglio circa le altezze, si pone come scala delle distanze la media calcolata  $H = 16$  m.



Figura 41: nell'immagine si vuole mostrare la costruzione dei diversi settori per la valutazione dei parametri morfometrici e quindi il calcolo di quelli fluidodinamici. Con le diverse tonalità si vogliono mettere in evidenza le variazioni sia del raggio che dell'ampiezza dei settori. Scala 1:25000.

Di seguito si riportano, anzitutto, i risultati relativi a una elaborazione così definita: per ogni settore circolare considerato, si è calcolata l'altezza media  $H$  come semplice media aritmetica di quelle presenti entro il poligono del settore, l'indice  $\lambda_p$  come area totale coperta dagli edifici rispetto all'area totale del settore, e l'indice  $\lambda_f$  come rapporto tra l'area *frontale esterna* del settore e l'ampiezza del settore. Per area frontale esterna si intende la proiezione dell'area frontale degli edifici sul piano normale alla direzione del vento; in altre parole, viene conteggiata solo l'area frontale che il profilo incontra “per prima”, trascurando quindi quelle di valle. Nella Figura 42 e in

tutte le analoghe successive i diversi stili delle linee si riferiscono a diversi valori per il raggio del settore normalizzato rispetto all'altezza media degli edifici della zona ( $\frac{r}{H}$ ), come riportato in legenda, mentre in Figura 43 e nelle analoghe successive si riferiscono a differenti ampiezze dei settori che si sono considerate. In Figura 42 e in Figura 43 si riportano graficamente i risultati per questa prova. In generale, non si riscontrano variazioni significative sulla bontà della modellazione al variare dell'ampiezza del settore e, in particolare, non si individua una tendenza univoca che possa portare a concludere che esiste un valore (o un range) ottimale. Per quanto riguarda il raggio considerato, invece, si individua un elemento costante, cioè che la miglior corrispondenza si riscontra per valori di  $\frac{r}{H}$  pari circa a 70 (nel caso di Villa Pamphili si tratta di una distanza pari a 1100 m).

Le considerazioni sopra esposte e quelle riportate qui di seguito si basano sulla valutazione di due parametri statistici indicatori della qualità di una modellazione rispetto ai valori di monitoraggio: il root-mean-square error (RMSE) e il BIAS che, in applicazione ai dati di vento analizzati, assumono le forme riportate alle equazioni (31) e (32).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{nq} (\hat{u}_i - u_i)^2}{nq}} \quad (31)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{nq} (\hat{u}_i - u_i)}{nq} \quad (32)$$

In cui  $nq$  è il numero totale delle quote su cui si è svolta l'analisi,  $\hat{u}_i$  il valore della velocità del vento alla  $i$ -esima quota (normalizzata rispetto a  $u_*$ ) stimata dal modello applicato, e  $u_i$  la velocità del vento alla  $i$ -esima quota (anche in questo caso normalizzata rispetto a  $u_*$ ) risultante dai dati di monitoraggio. RMSE e BIAS risultano piuttosto simili, con BIAS strettamente positivo, in accordo con quanto si può osservare dai profili. L'errore è in generale crescente con la distanza,

assumendo quindi i valori minimi per i raggi minori. Come per la trattazione generale riportata al Capitolo 2, anche in questa analisi si sono considerate differenti suddivisioni del territorio. In Figura 44 si riporta la rappresentazione di un settore suddiviso in isolati, mentre in Figura 45 e Figura 46 si riportano i risultati relativi al calcolo effettuato sulla base di questa suddivisione. Inoltre, si è applicata la suddivisione attraverso i poligoni di Voronoi, secondo quanto precedentemente descritto. In Figura 47 è mostrato il risultato dell'applicazione di questo procedimento a uno dei settori che si sono costruiti per il caso studio. In più, per questo caso si riportano i risultati ottenuti considerando i parametri morfometrici calcolati come media aritmetica (Figura 48 e Figura 49), e come media pesata (Figura 50 e Figura 51). Risultano evidenti alcuni aspetti. I profili calcolati tenendo conto dei valori dei parametri morfometrici ricavati come sopra esposto per i settori nella loro interezza sono quelli che riportano una maggiore variabilità al variare del raggio  $\frac{r}{H}$  che definisce il settore, individuando una distanza di circa  $70H$  per l'analisi. Inoltre, rispetto a tutti gli altri metodi, si evidenzia una maggiore accuratezza per i valori posti a quote elevate; per contro, i profili definiti secondo tutte le altre varianti riportano discrete corrispondenze per le basse quote, mentre perdono di attendibilità per valori elevati. Questo è valido in generale, per tutti i raggi e per tutte le ampiezze considerate. Nonostante i valori per RMSE e BIAS siano piuttosto simili per il calcolo su isolati e su poligoni di Voronoi con media pesata (Figura 46 vs Figura 51), e anzi si possa notare un livello lievemente maggiore per l'accuratezza del primo metodo, è importante notare come il secondo riesca a restituire una variabilità del risultato rispetto alla variazione di raggio considerato, mentre il calcolo riferito agli isolati restituisce una serie di profili che mostrano scarse differenze reciproche.

La tendenza degli indici RMSE e BIAS mostra che la perdita di rappresentatività all'aumentare del raggio del settore è una costante e si presenta in riferimento a ciascuno dei metodi utilizzati, portando quindi ad escludere ulteriori verifiche su settori di raggio maggiore, e individuando, almeno per il caso analizzato, un range di valori per il raggio di ricerca che varia tra  $50H$  e  $70H$  (da considerarsi quindi riferito al sito in esame e alle sue caratteristiche, con particolare riferimento alla distanza della stazione di monitoraggio dagli edifici cittadini, che si ricorda essere pari a 500 m). Tuttavia, l'aspetto più significativo è la presenza di una quota, individuabile a circa

5H, che separa un'estensione rispetto al suolo in cui il metodo più rappresentativo è quello che considera i settori nella loro interezza, da una, più vicina al suolo, in cui invece sono quelli che considerano i settori suddivisi e i parametri morfometrici derivati come valore medio di quelli riferiti a ciascun elemento di tale suddivisione. Una simile differenza può essere legata al comportamento del moto e alla sua risposta successivamente all'incontro degli ostacoli: se fino a una certa quota l'effetto è ancora dovuto al contributo di ogni elemento di rugosità, al di sopra di 5H prevale un effetto di insieme, rappresentato dal valore di  $\lambda_f$  calcolato considerando solo le facciate degli edifici incontrate per prime dal flusso.

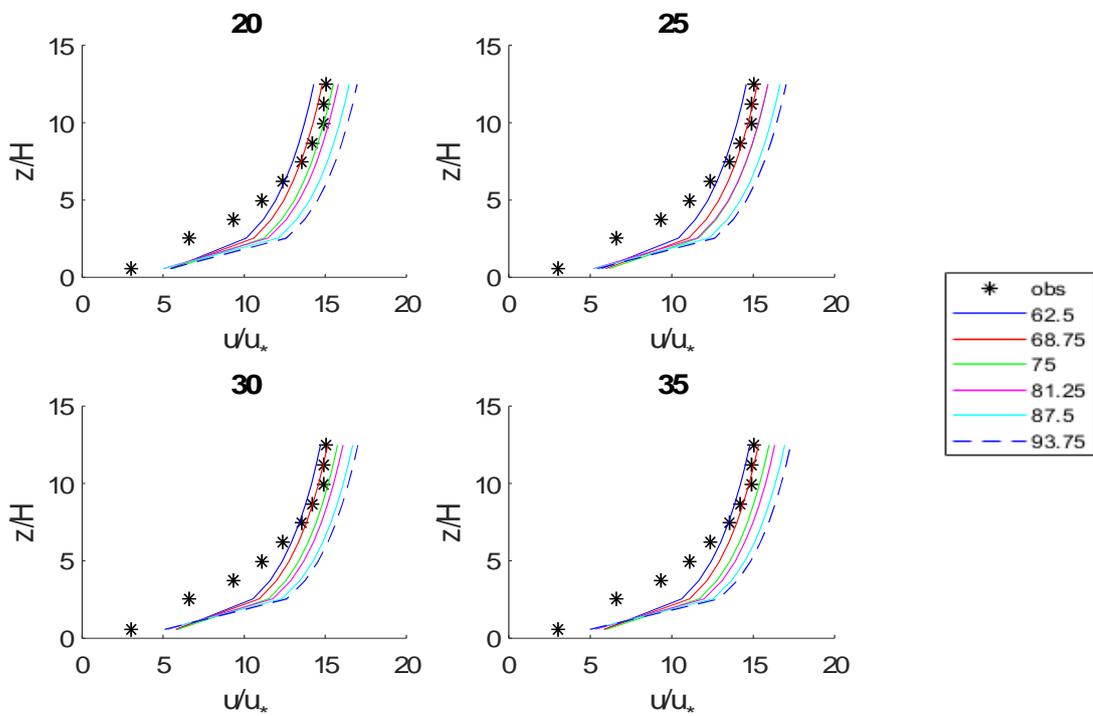


Figura 42: confronto tra i profili calcolati e le osservazioni alla stazione, settori totali.

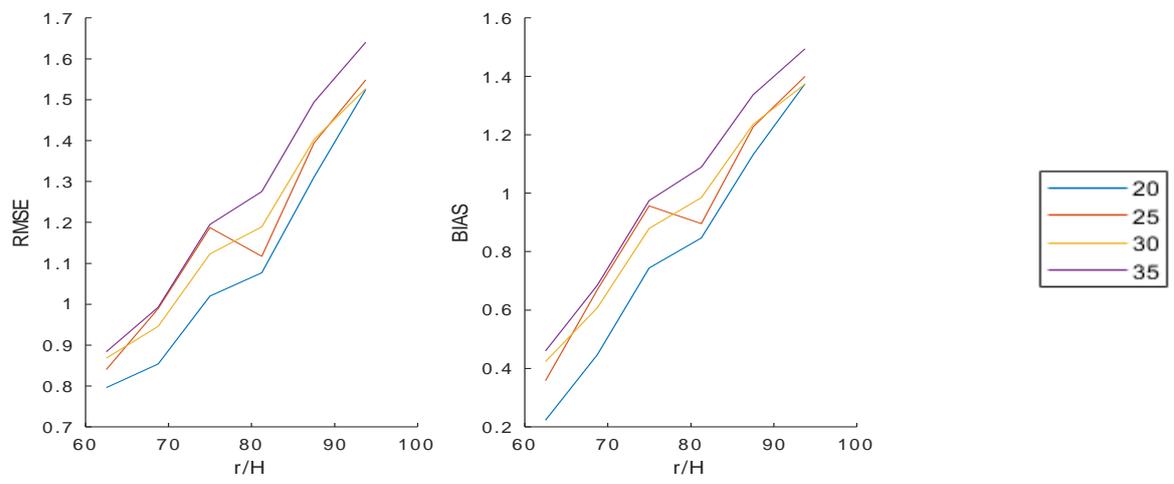


Figura 43: RMSE e BIAS, settori totali.



Figura 44: suddivisione di un generico settore in isolati, secondo il grafo stradale. Settore di raggio pari a 2500 m.

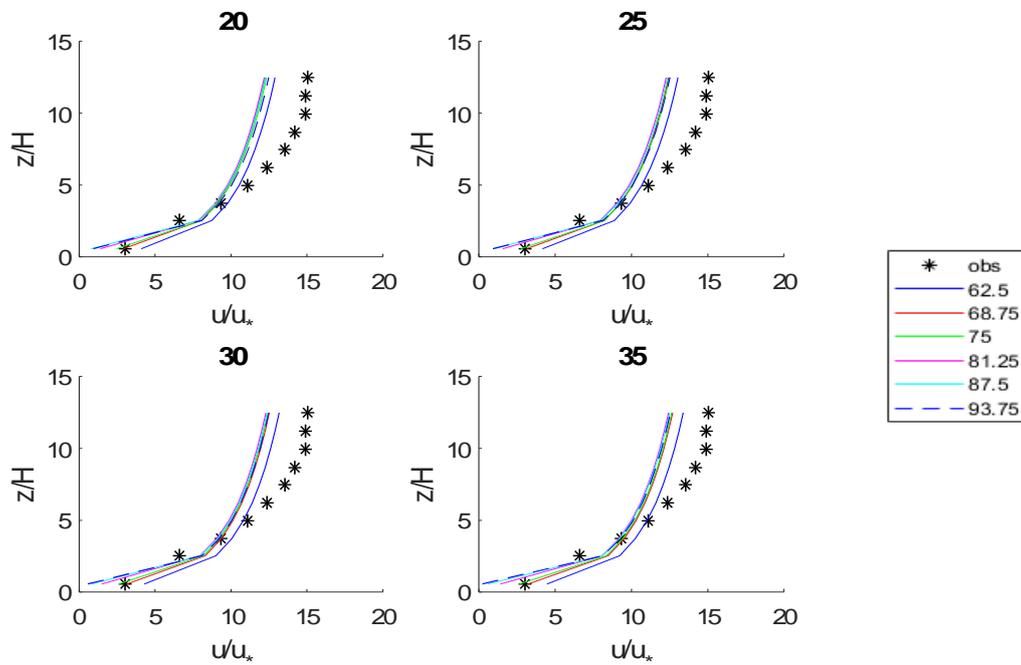


Figura 45: confronto tra i profili calcolati e le osservazioni alla stazione, isolati.

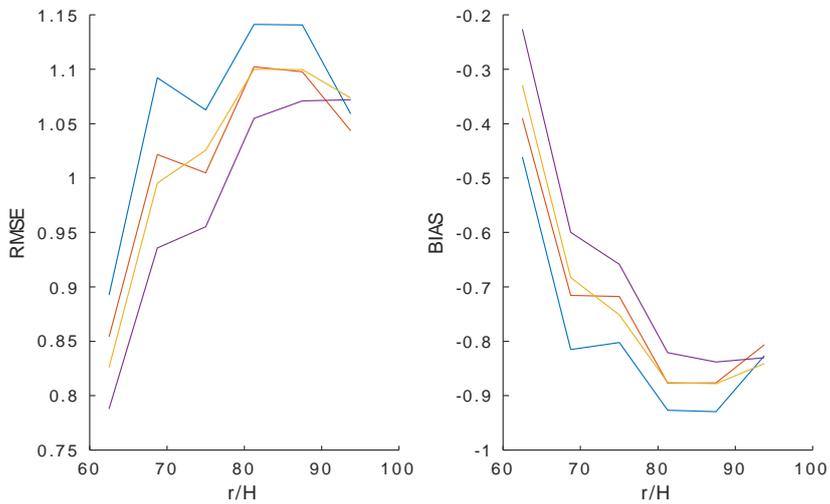


Figura 46: RMSE e BIAS, isolati.



*Figura 47: suddivisione di un generico settore con i poligoni di Voronoi costruiti attorno agli edifici. Settore di raggio pari a 2500 m.*

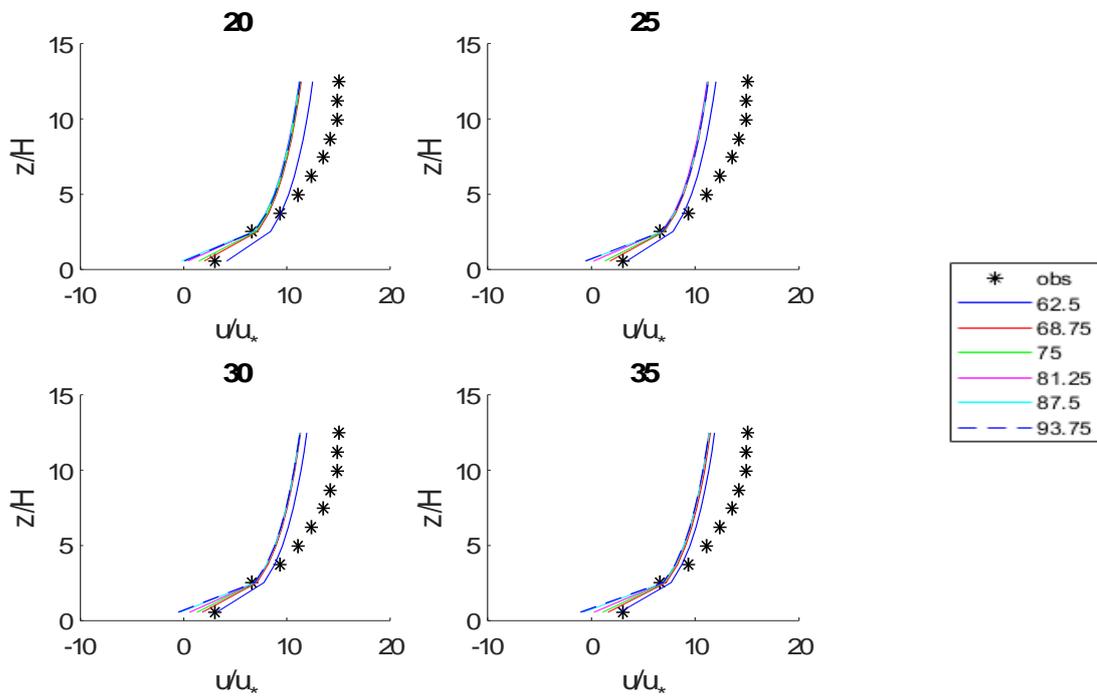


Figura 48: confronto tra i profili calcolati e le osservazioni alla stazione, poligoni di Voronoi, media aritmetica dei valori.

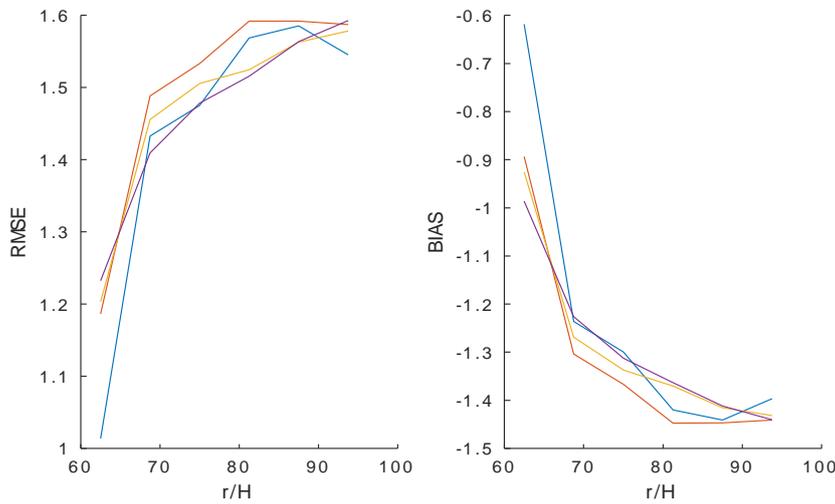


Figura 49: RMSE e BIAS, poligoni di Voronoi, media aritmetica dei valori.

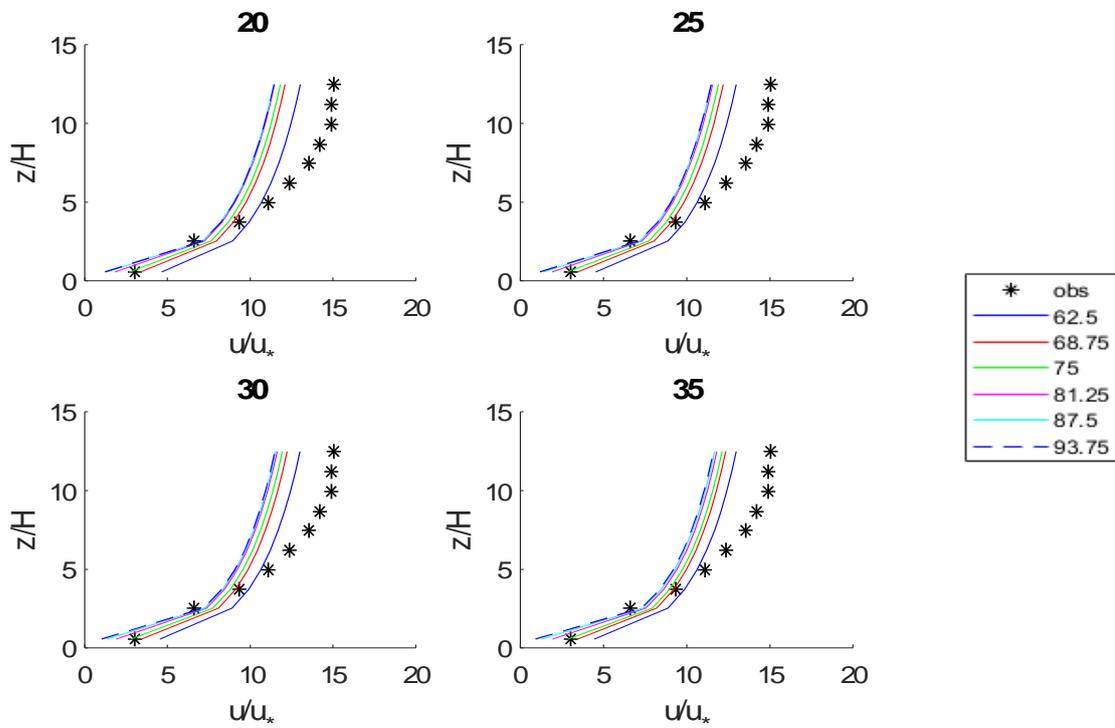


Figura 50: confronto tra i profili calcolati e le osservazioni alla stazione, poligoni di Voronoi, media pesata dei valori.

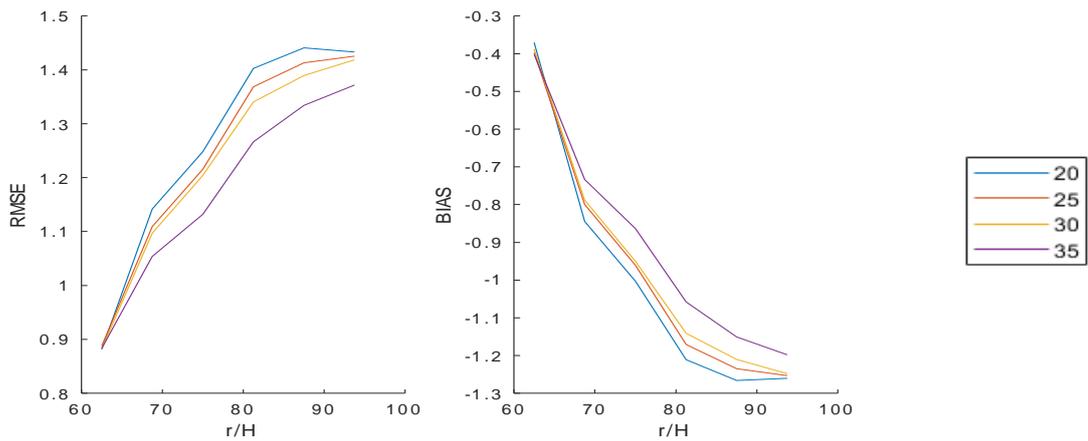


Figura 51: RMSE e BIAS, poligoni di Voronoi, media pesata dei valori.

#### 4.5 Profili di velocità, analisi su edificio Enrico Fermi

Per questo caso studio si è proceduto con un'analisi analoga a quella condotta in riferimento al caso studio su Villa Pamphili, ma in questo caso è necessario anzitutto elaborare i dati di monitoraggio del vento, prima di costruire dei profili di velocità medi per ogni direzione e cercare la migliore correlazione con i parametri morfometrici della zona. È necessario ricordare, infatti, che l'ipotesi della validità della funzione logaritmica per la descrizione dell'evoluzione del modulo di velocità del vento con la quota è valida solo in condizioni di stratificazione atmosferica neutra. Di per sé, la definizione e la verifica di questa condizione presuppone la conoscenza del gradiente termico in funzione della quota, nella colonna d'aria che si sta analizzando. Non è inusuale, però, non disporre di quest'informazione, e spesso quindi è necessario basarsi solo su informazioni relative ai valori di alcune grandezze misurate al livello del suolo. Nello specifico, è possibile utilizzare la suddivisione in classi proposta da Pasquill (1961), sulla base della velocità del vento in prossimità del suolo e di altri due parametri, differenti a seconda che si tratti di periodo diurno o notturno: l'irraggiamento solare nel primo caso e il livello di copertura da nubi nel secondo. Il lavoro si è indirizzato sull'analisi dei dati relativi al periodo diurno, causa assenza di informazioni sulla copertura del cielo in periodo notturno. Si riporta quindi la classificazione proposta in *Tabella 3*.

*Tabella 3: Definizione delle classi di stabilità atmosferica in ore diurne secondo Pasquill. Le classi risultanti dalla combinazione delle condizioni di irraggiamento e velocità del vento in prossimità del suolo corrispondono a quanto segue. A: condizioni estremamente instabili; B: condizioni moderatamente instabili; C: condizioni leggermente instabili; D: condizioni neutre; E: condizioni leggermente stabili; F: condizioni stabili; G: Stabilità forte.*

Vento al suolo (a 10 m)	Irraggiamento		
	Forte	Moderata	Debole
Calma	-	-	-
< 2 m/s	A	A – B	B

<b>Vento al suolo (a 10 m)</b>	<b>Irraggiamento</b>		
	<b>Forte</b>	<b>Moderata</b>	<b>Debole</b>
2 – 3 m/s	A – B	B	C
3 – 5 m/s	B	B – C	C
5 – 6 m/s	C	C – D	D
> 6 m/s	C	D	D

È da notare come, nella definizione data, non siano presenti indicazioni quantitative circa l'irraggiamento solare. In loro assenza, considerata la disponibilità di dati distribuiti nell'arco temporale di un intero anno, si è proceduto con la suddivisione in classi sulla base della distribuzione statistica dei valori di irraggiamento nel corso del periodo di studio. In Figura 52 si riporta l'istogramma dei valori di intensità di radiazione solare ( $I$ ) (si sono considerati come diurni i dati sui profili del vento per i quali il corrispondente dato sulla radiazione solare, cioè quello riferito allo stesso momento, presentasse un valore  $> 0$ ), mentre in Figura 53 si riporta la distribuzione cumulata di probabilità. È attraverso questa che è possibile ricavare i valori di radiazione solare che, per il caso in esame, si considerano come estremi delle 3 classi in cui si deve suddividere il campione.

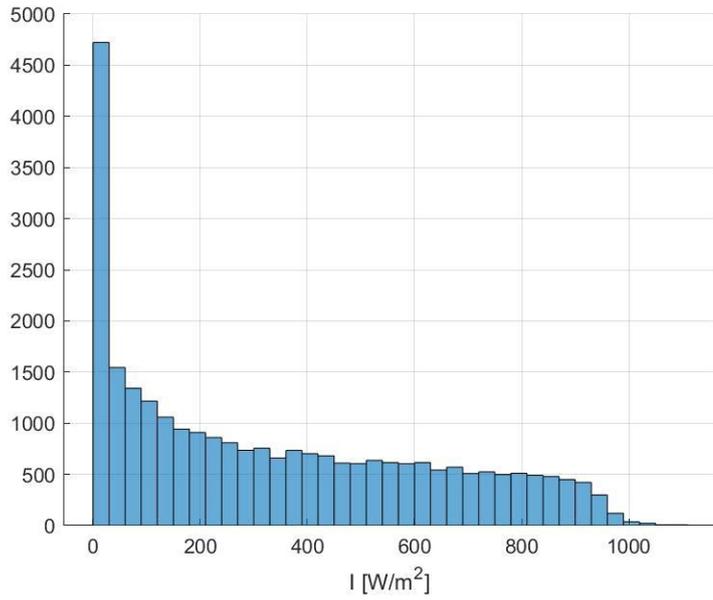


Figura 52: istogramma dei valori di intensità di radiazione solare.

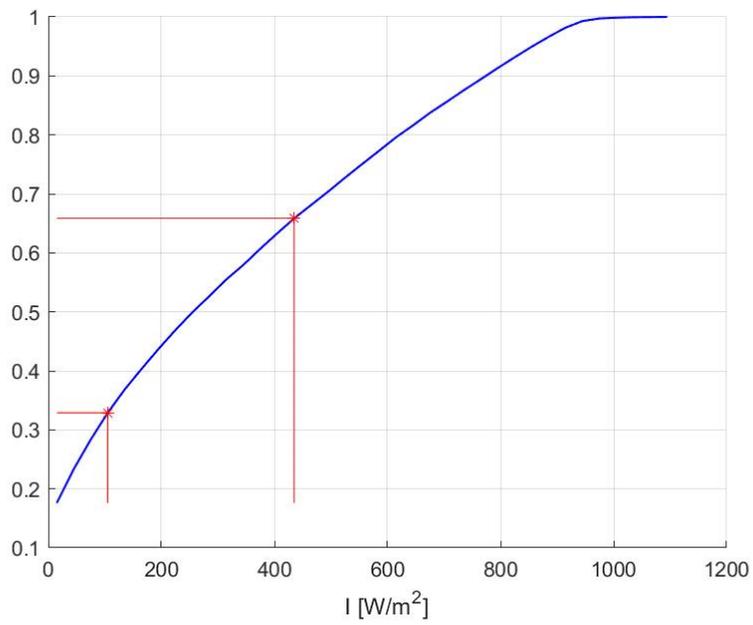


Figura 53: distribuzione cumulata dei valori di intensità di radiazione solare.

In particolare, si è scelto il  $d_{33}$ , cioè il valore di  $I$  a cui corrisponde un valore cumulato della distribuzione dei dati pari al 33% , pari a  $105 W/m^2$ , come estremo superiore della prima classe, quella corrispondente a una condizione di irraggiamento *debole*; si è poi scelto il  $d_{66}$  (definito in modo analogo al  $d_{33}$ , ma in riferimento al 66% della distribuzione cumulata) come estremo superiore della seconda classe, corrispondente a una condizione di irraggiamento *moderato*, pari a  $435 W/m^2$ . Considerato il carattere qualitativo della definizione delle classi secondo Pasquill, per prudenza si sono considerati solo i profili compresi *strettamente* negli intervalli di stratificazione neutra (per chiarezza, in riferimento alla *Tabella 3*, si è esclusa la classe con irraggiamento moderato e velocità del vento al suolo compresa tra i 5 e i 6 m/s).

Una delle fonti di incertezza che si sono incontrate durante l'analisi dei dati è quella relativa alla variazione di direzione del vento con la quota. Nelle usuali condizioni di moto, infatti, l'andamento delle isobare non è tale da portare variazioni notevoli di direzione del vento con la quota in estensioni ridotte, come nel caso in esame. Tenuto conto che il fenomeno si presenta anche sull'insieme di profili estratti che, idealmente, rispettano la condizione di neutralità, si è ritenuto necessario condurre alcune analisi sulle cause della consistente variazione di direzione con la quota. Il primo parametro indagato è stato proprio il valore della radiazione solare, ma non si è trovata nessuna correlazione tra questa e la variazione di direzione. L'evidenza di questo si può riscontrare in Figura 54, dove si riporta il massimo della deviazione di direzione con la quota, per ciascun profilo, indicandola con  $W_{dev}$ . La deviazione si è calcolata rispetto a quella di riferimento assunta, per ciascun profilo, come quella a quota più elevata e quindi meno influenzata dalla superficie.

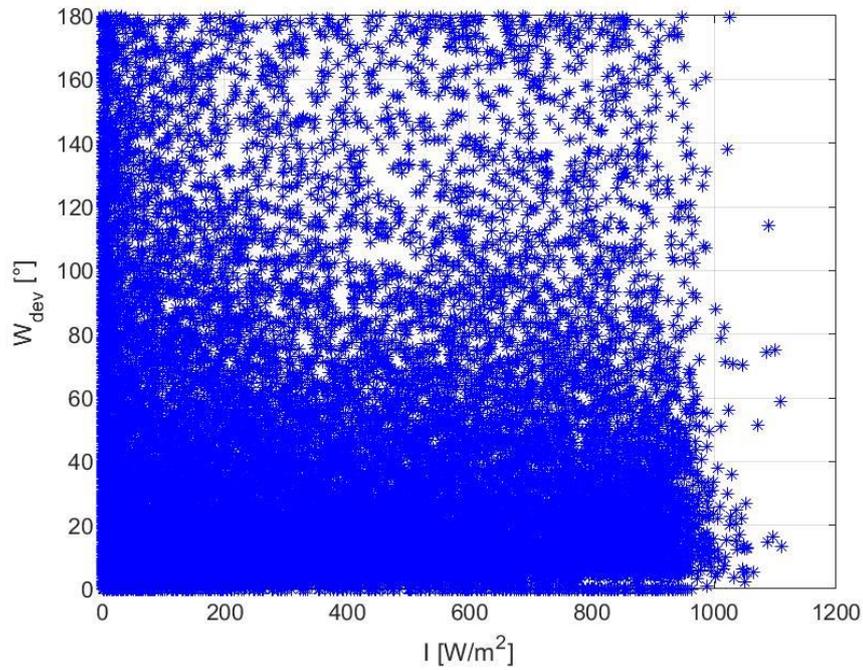


Figura 54: distribuzione dei punti sperimentali sul piano  $I - W_{dev}$ .

È importante una verifica sulla effettiva stabilità atmosferica dei profili selezionati, intesa anche in termini di valori modesti di velocità verticale. Questo tipo di verifica è infatti rilevante sia a priori che, maggiormente, in relazione all'anomalia sulla direzione riscontrata.

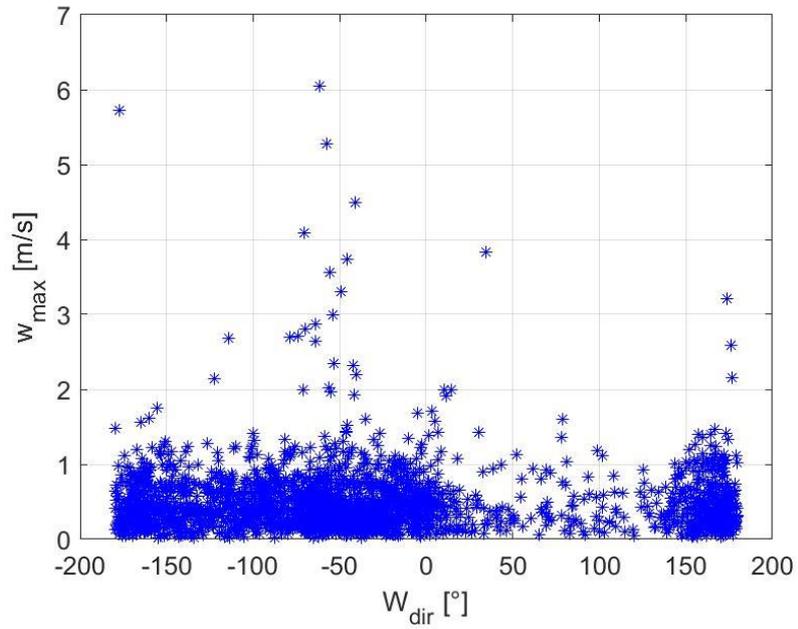


Figura 55: distribuzione dei dati sul piano direzione del vento - massimo di velocità verticale nel profilo.

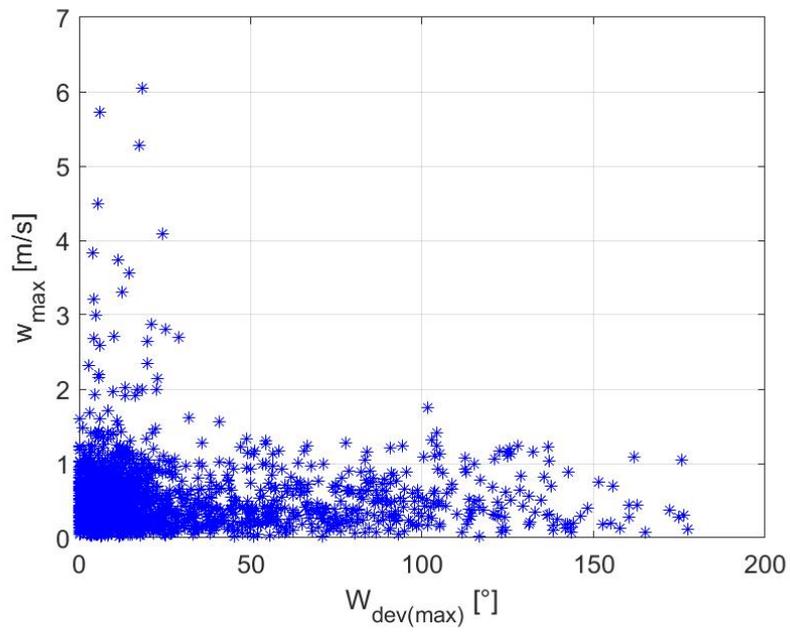


Figura 56: distribuzione dei dati sul piano deviazione massima di direzione - velocità massima verticale nel profilo.

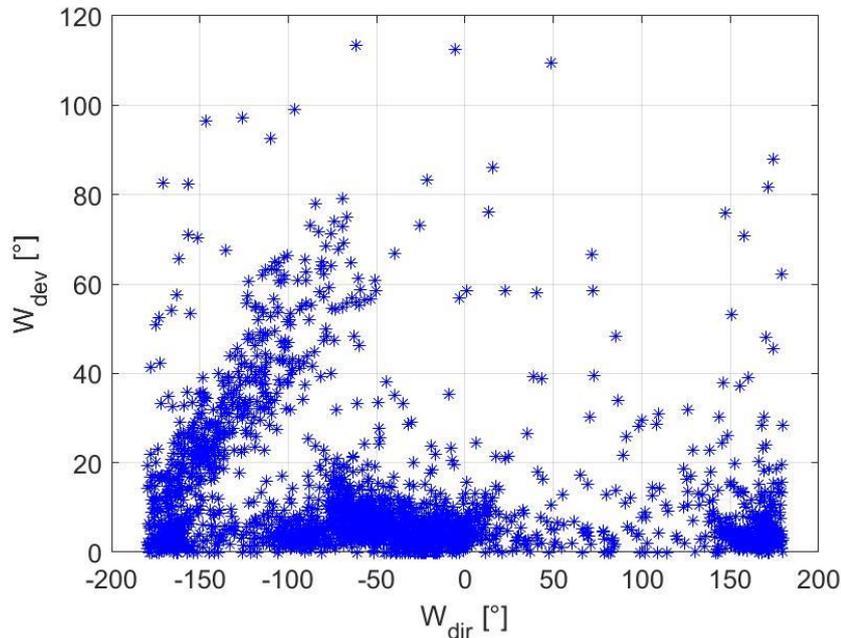


Figura 57: distribuzione dei dati sul piano direzione di provenienza - deviazione (come standard) della direzione lungo il profilo.

In Figura 55 sono riportate le coppie *direzione di provenienza* ( $W_{dir}$ ) – *componente massima di velocità verticale* ( $w_{max}$ ). In effetti, per i profili estratti, le velocità massime verticali (si intende in modulo, dirette sia verso l’alto che verso il basso) sono sempre modeste, per tutte le direzioni. Nella Figura 56 si riportano le coppie *deviazione massima* ( $W_{dev(max)}$ ) – *massima velocità verticale*, al fine di evidenziare una possibile tendenza di correlazione positiva tra i due parametri. Come si può notare anche graficamente, questa è inesistente, e anzi ai (pochi) valori di velocità massima più elevata di 2 m/s corrispondono deviazioni massime di direzione lungo il profilo moderate. In Figura 57 è riportata la deviazione di direzione, in relazione alla direzione di provenienza del vento. È bene specificare che come direzione di provenienza si è considerata sempre quella a quota maggiore nel profilo, nell’intento di considerare quella ragionevolmente meno influenzata dalla presenza degli edifici. Si può notare un certo addensamento di valori elevati di deviazione tra le direzioni  $-180^\circ$  e  $-50^\circ$ . Tuttavia, in questa zona non sembrano esserci particolarità, rispetto al resto delle direzioni, in termini topografici o di edificato.

Un ulteriore fattore che è necessario tenere in considerazione, però, è chiaramente il periodo dell'anno e l'orario in cui si verificano queste elevate deviazioni. In effetti si è riscontrato che, anche imponendo un valore di radiazione solare  $> 0$  per considerare profili diurni, e anche effettuando le restrizioni sulla classe di stabilità, molti dati riferiti invece a momenti notturni possono ancora trovarsi all'interno del campione. Così si è limitata la selezione ai profili cui corrisponde un orario compreso tra le 08:00 del mattino e le 20:00 di sera. In Figura 58 e Figura 59 sono riportate queste associazioni. Si omette di riportare i risultati precedenti alla selezione degli orari indicata, in quanto analoghi a quelli evidenziati nelle ultime due figure, con una differenza solamente in termini di numerosità dei valori anomali, che si presentano comunque in corrispondenza degli stessi orari e dello stesso periodo dell'anno. Si può notare come un certo numero di elementi con elevato valore di deviazione di direzione si possa individuare nelle prime ore del mattino e nel mese di gennaio. Riguardo al mattino, questo è anche un momento delicato per la struttura dello Strato Limite Urbano, in cui lo Strato Limite Convettivo inizia a prendere il posto dello Strato Stabile Notturno. Si deve notare che l'operazione di restrizione alla fascia oraria precedentemente indicata comporta una diminuzione degli elementi con deviazione di direzione superiore ai  $25^\circ$ , considerata la massima accettabile, dal 20% rispetto al campione completo al 13% rispetto al campione costituito solo dai profili effettivamente diurni, con una diminuzione della numerosità del campione pari a circa il 40%.

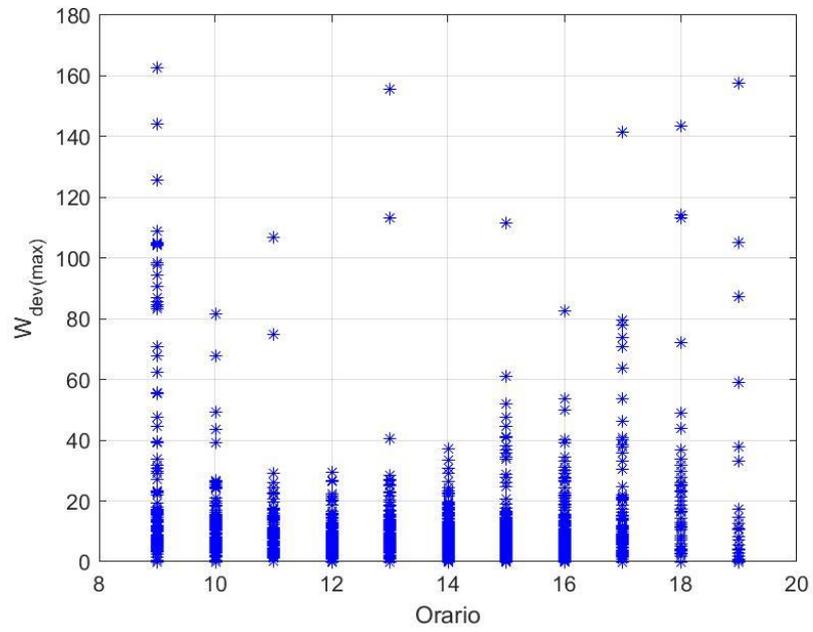


Figura 58: valori della deviazione massima di direzione in relazione all'orario del giorno.

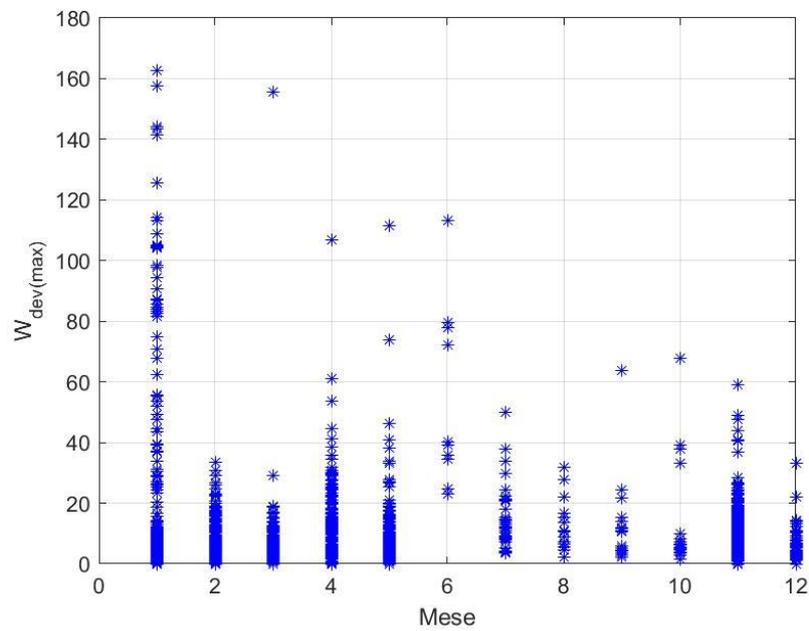


Figura 59: valore di deviazione massima di direzione in relazione al mese a cui si riferisce il dato.

Si riportano i risultati più rilevanti, a valle della scelta dei profili come sopra descritto, per questo caso studio. In particolare, gli aspetti necessari per il confronto con i risultati ottenuti per Villa Pamphili, riportati in “Discussione finale e conclusioni”. In Figura 60 si riporta il confronto tra i dati osservati e i profili calcolati per due direzioni considerate e per tutti i raggi di estensione dei settori. In Figura 61, invece, si riporta il RMSE per tutte le direzioni e per alcuni valori di raggio. Si ricorda che i risultati riportati nelle due figure in questione si riferiscono alla valutazione della più idonea estensione territoriale da considerare per il calcolo dei parametri fluidodinamici relativi al tessuto urbano per la successiva modellazione del profilo verticale di velocità del vento. Le estensioni sono state valutate tramite l'utilizzo di dei settori circolari con centro nella stazione di monitoraggio e per vari raggi e direzioni (per maggiori dettagli, vedere il paragrafo 3.4). In particolare, con la Figura 60 si vuole mettere in evidenza come, almeno per il caso studio considerato, non sia possibile una generalizzazione del raggio di ricerca più idoneo rispetto alla direzione. I profili selezionati sono infatti rappresentativi di due direzioni poste a  $45^\circ$  l'una dall'altra, ed è possibile notare come i raggi dei settori e quindi i parametri  $z_d$  e  $z_0$  associati siano differenti per i due casi. Per contro, emerge anche un elemento costante. Per il raggio “5” (pari a  $5H$ , con  $H$  altezza caratteristica fissata, in questo caso, come l'altezza dell'edificio in cui si è posizionato il SODAR, pari a 22,5 m) infatti, lo scostamento tra il profilo costruito con i dati di monitoraggio e quello modellato in base ai parametri fluidodinamici calcolati si mantiene costante. Con la Figura 61, invece, si vuole mettere in evidenza la variabilità della bontà della rappresentazione del modello rispetto ai dati sperimentali in funzione della direzione. Per quanto non si possano individuare valori o range di valori di raggio per cui RMSE sia minimo indipendentemente dalla direzione (che sarebbero degli utili punti di riferimento per i successivi sviluppi dell'analisi), è possibile individuare un range di direzioni (i cui limiti sono le due direzioni di  $155^\circ$  e  $200^\circ$  di cui si è discusso poco sopra) in cui RMSE si mantiene costantemente inferiore a 1 per il raggio “5”. Inoltre, è possibile osservare una generale tendenza verso i valori minori di RMSE per i raggi maggiori tra quelli scelti. Le analisi morfometriche per il caso studio sull'Edificio Fermi si sono svolte utilizzando i settori senza partizioni interne. Ricordando quanto discusso al paragrafo 4.4, tuttavia, in questo caso non si

riscontra quella tipica tendenza a una migliore stima dei valori di velocità in riferimento alle quote più elevate rispetto a quelle più vicine al suolo che, invece, risultano evidenti nei risultati del caso studio su Villa Pamphili. È da considerare, a questo proposito, l'importante differenza nella localizzazione dei due casi studio: a differenza di Villa Pamphili, la stazione di monitoraggio SODAR montata sull'edificio Enrico Fermi è, infatti, completamente immersa all'interno di un'area edificata, e non all'interno di un'area vegetata a una certa distanza dal tessuto urbano.

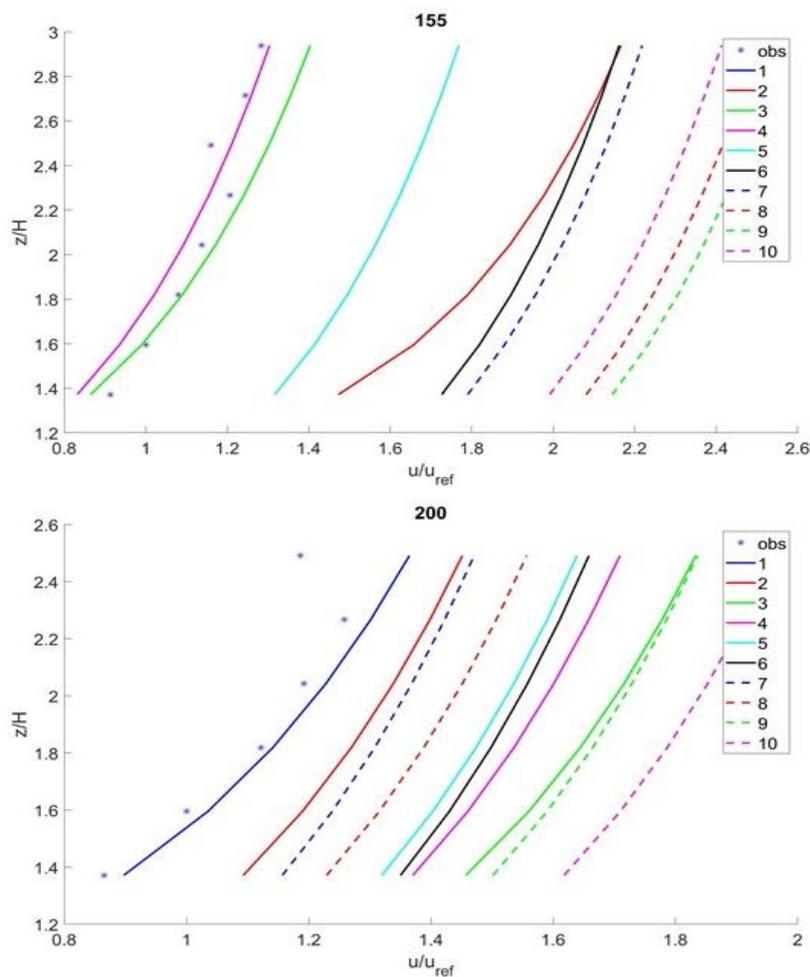


Figura 60: confronto tra dati osservati e profili calcolati, per diversi raggi di estensione del settore e per due differenti direzioni di provenienza del vento. Oltre i valori osservati, riportati con gli asterischi, sono rappresentati i diversi profili modellati per i diversi raggi analizzati. Tutte le linee sono quindi riferite ai profili, indipendentemente dal tipo di tratteggio.

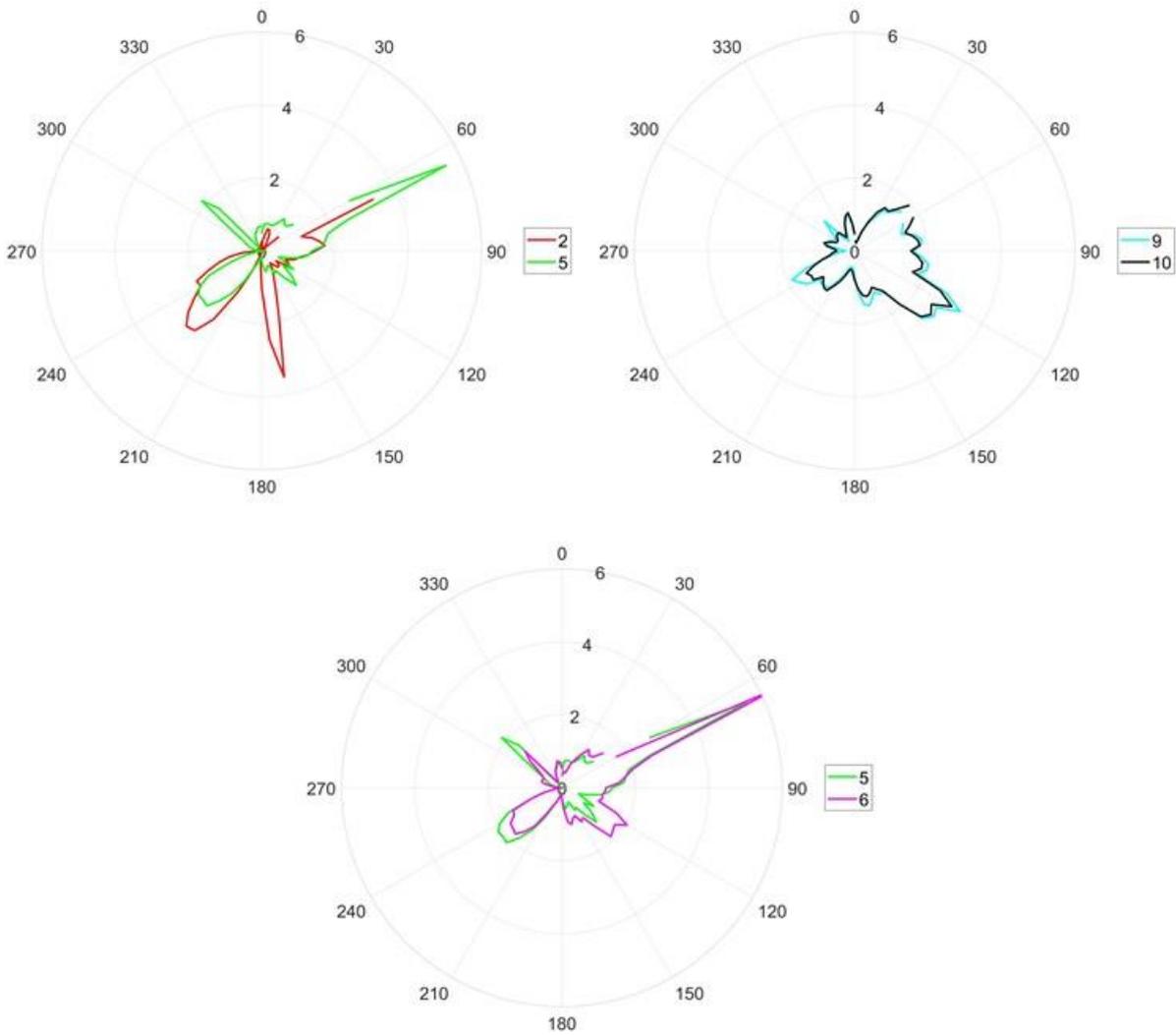


Figura 61: RMSE per tutte le direzioni considerate, per alcuni raggi dei settori.

## 5 Discussione finale e conclusioni

In seguito all'applicazione delle due suddivisioni territoriali adattive per differenti utilizzi, è possibile trarre alcune conclusioni specifiche per ognuno di questi, e individuare i punti di forza e le carenze di questo metodo. Per quanto riguarda le analisi su larga scala dei centri urbani, si sono evidenziate alcune importanti differenze nei risultati ottenuti utilizzando la griglia adattiva, rispetto a quella regolare, in particolare riferendosi a  $\lambda_f$ . Anzitutto, nelle differenze dei valori riscontrati lungo le diverse direzioni, e si è visto come il metodo proposto sia più rappresentativo; inoltre, non si tratta dell'unico elemento a favore di quest'ultimo. Infatti, osservando la Figura 14 e la Figura 17, si può anche notare come passare da una griglia adattiva a una regolare porti a una perdita dei valori più elevati dei  $\lambda_f$  (entrambi i tipi, medio e direzionale): gli effetti di edifici particolarmente alti, che si possono rilevare in rapporto alle aree di pertinenza costruite sul grafo stradale, si perdono se si effettua una media su un elemento regolare e, in molti casi, più esteso. Non solo l'effetto è più rilevante per  $\lambda_f$  piuttosto che per  $\lambda_p$ , ma lo è anche più per Roma che per Cagliari, come in effetti dovrebbe essere, considerati i maggiori valori di altezza nel primo caso. I risultati relativi ai due casi studio di Roma e Cagliari, comunque, evidenziano la possibilità di una generalizzazione per la distribuzione dei valori di  $\lambda_p$  nei centri urbani (almeno per quelli caratterizzati da un impianto urbanistico simile a quello dei casi studio considerati) ma, per contro, la necessità di ricorrere sempre a una caratterizzazione locale per  $\lambda_f$ , a causa delle notevoli differenze riscontrate.

L'importanza di una ulteriore successiva evoluzione del metodo, in questo caso, è poi data da fattori quali l'abbondanza di elementi poligonali con area costruita nulla, come messo in evidenza in Figura 26 e Figura 27. Tale abbondanza è chiaramente legata alla definizione del tipo di elemento considerato. Inoltre, i risultati ottenuti in merito al calcolo dei parametri descrittivi dei canyon urbani evidenziano come, anche in questo caso, esista una possibilità di generalizzazione della distribuzione dei valori per larghe estensioni urbane. Tuttavia, qualora sia necessario selezionare un valore per RFc o RFb per un'area ristretta, dell'ordine di grandezza dei rioni e distretti analizzati in questo lavoro, è senza dubbio preferibile condurre materialmente il calcolo sull'area selezionata, e si sono

quindi testati metodi e algoritmi per rendere questo possibile. A tal proposito, si è visto che quando l'attenzione è rivolta a una caratterizzazione del canyon da un punto di vista più generale, che comprenda quindi anche la determinazione della sua lunghezza, si rende necessario basarsi su considerazioni di tipo geometrico e creare gli elementi utilizzati per l'analisi, piuttosto che affidarsi a basi di dati esistenti per la rappresentazione del grafo stradale del centro urbano. Questo è, infatti, non calibrato per le specifiche esigenze, e i casi particolari che si possono incontrare sono numerosi e di difficile gestione, anche automatica. Infatti, l'elemento stradale fornito, per sua natura, non sempre coincide con l'asse di un canyon urbano, come dovrebbe essere nel contesto delle analisi morfometriche per studi di aerodinamica urbana. Si è visto che, spesso, definire un altro tipo di suddivisione, basato su criteri geometrici, è più semplice che correggere e adattare il grafo stradale con l'intento di eliminare gli elementi stradali non pertinenti. I risultati dell'analisi su larga scala dei parametri relativi ai canyon utilizzando la suddivisione territoriale formata dai poligoni di Voronoi sono probabilmente i più significativi da un punto di vista di possibilità di caratterizzazione di una superficie urbana, a partire da dati sulla stessa ragionevolmente reperibili. Le somiglianze descritte al paragrafo 3.2 incoraggiano l'applicazione del procedimento descritto al paragrafo 2.2 anche su altre città, con l'obiettivo di verificare la validità (o meno) delle stesse anche in termini più generali. Il risultato ottenuto sarebbe infatti utile, se confermato anche su altri contesti, per attribuire dei valori numerici ai parametri caratteristici dei canyon in modo semplice ma indicativo, sia da un punto di vista di valore medio che di distribuzione di probabilità degli altri valori possibili per i parametri. Si è visto, soprattutto in riferimento a R<sub>Fc</sub>, che questa possibilità esiste, almeno in riferimento ai casi studio considerati. Inoltre, sono possibili ulteriori analisi combinate, e una maggiore attenzione rispetto alle zone selezionate può fornire ulteriori indicazioni utili e maggiore specificità.

L'esempio riportato al paragrafo 4.2, poi, mostra come può essere realizzabile, almeno per certe zone, una determinazione dei valori dei parametri morfometrici sulla base della costituzione architettonica della zona. Sono, comunque, necessari ulteriori approfondimenti per determinare la possibilità di estensione ad altri tipi di tessuto rispetto a quello considerato in questo lavoro. È importante, ad ogni modo, osservare che questo confronto e questo accorpamento per tipologia non

sarebbe possibile limitandosi solo all'uso di griglie regolari, almeno per le estensioni ridotte come quelle considerate al paragrafo 4.2: può capitare che le estensioni delle zone suscettibili di indagine siano abbastanza contenute da privare di senso l'utilizzo di una maglia regolare delle dimensioni usuali (lato di 100 – 300 – 500 m) e, d'altro canto, diminuire troppo la dimensione è inopportuno in generale, considerate le estensioni tipiche degli edifici.

Considerando, infine, i risultati relativi alle prove sui profili di velocità, quelli su Villa Pamphili mostrano come utilizzare una diversa griglia per la suddivisione dei settori per il calcolo di  $z_d$  e  $z_0$  da considerare nel profilo porti a differenze nella rappresentatività di quest'ultimo che sono interpretabili anche da un punto di vista fenomenologico. In particolare, il fatto che l'uso dei settori non suddivisi rappresenti meglio le quote superiori, mentre l'uso dei settori suddivisi quelle inferiori. Si è visto come il punto di “transizione” si possa identificare grossomodo intorno a  $z = 5H$ . Si è anche visto come la tendenza generale sia quella di una migliore rappresentatività al diminuire del raggio. Tuttavia, è necessario un confronto con i risultati ottenuti per l'edificio Enrico Fermi. In questo caso, infatti, si è invece riscontrato un comportamento non univoco della rappresentatività in funzione del raggio del settore; questa, infatti, varia anche con la direzione, e il raggio ottimale è in generale differente a seconda di questa. Inoltre, non si è riscontrata la caratteristica suddivisione delle altezze in due zone, in cui il calcolo di  $z_d$  e  $z_0$  in riferimento ai settori considerati nella loro interezza porta a una migliore rappresentazione delle quote maggiori rispetto a quelle più vicine al suolo. Questo aspetto è particolarmente importante, considerato anche il pre-trattamento dei dati, descritto al paragrafo 4.5, con il fine di considerare solo i profili ricadenti in una certa categoria e rispondenti a determinate condizioni. Infatti, a valle di queste considerazioni, si può supporre che le variazioni della rappresentatività con la direzione dipendano in qualche modo proprio dal tipo di tessuto considerato. Differenza fondamentale tra i due casi studio, in questo senso, è la localizzazione geografica della stazione di monitoraggio: isolata rispetto al centro urbano per Villa Pamphili, immersa in quest'ultimo per l'edificio Enrico Fermi. Questa, insieme alla verifica della transizione con la quota per altri casi studio, può essere materia di discussione futura.

## A Appendice (calcolo del parametro $\lambda_f$ )

Una volta suddiviso il territorio da caratterizzare, il calcolo di  $\lambda_p$  è agevole, per ognuno degli elementi che si sono creati. Infatti, Un certo numero di pixel ricadrà all'interno del poligono che delimita l'elemento di griglia e, nota la risoluzione del DEM utilizzato, attraverso la conta del numero di pixel che riportano valore di altezza diverso da 0 (piano stradale), si determina l'area planimetrica coperta dall'edificio ( $A_p$ ). Dal rapporto tra questa e la conta di tutti i pixel che ricadono all'interno del poligono, la definizione di  $\lambda_p$  è immediata.

Il calcolo di  $\lambda_f$ , invece, necessita di una procedura più complessa e di alcune considerazioni. In base alla definizione fornita in 1.2 (Equazione (6)), è evidente che il parametro sia dipendente dalla direzione di provenienza del vento, e come sia quindi possibile fornire un insieme di valori per ogni elemento di griglia. Ricordando le già introdotte area frontale dell'edificio  $A_F$  e area totale di pertinenza di un elemento di griglia  $A_T$ ,  $\lambda_f$  può essere definito per un certo elemento e per una certa direzione ( $\theta$ ):

$$\lambda_f(\theta) = \frac{A_F(\theta)}{A_T} \quad (33)$$

e, tramite il calcolo del valore medio, è possibile anche associare un unico valore a ogni elemento.

Materialmente, il calcolo si è svolto tramite un processo di elaborazione dell'immagine. A partire dal raster DEM georeferenziato, infatti, è possibile individuare tutti i pixel che cadono all'interno di ogni elemento utilizzando l'informazione vettoriale dei poligoni degli elementi di griglia. In Figura 62 si riporta un esempio di applicazione della procedura di calcolo di  $\lambda_f$  per un singolo elemento estrapolato dalla griglia adattiva costruita dal grafo stradale per la città di Cagliari. In particolare, successivamente all'individuazione di un certo elemento (a), è possibile calcolare il

parametro in riferimento alla direzione di provenienza da S (b), e, ruotando l'immagine, in riferimento anche a qualunque altra direzione si voglia analizzare (c, d). Qualunque sia la direzione e quindi la rotazione applicata, il calcolo può essere riferito all'orizzontale e proiettare, quindi, i valori delle altezze di ogni pixel sul piano ortogonale alla direzione di provenienza del vento (linee rosse in Figura 62 (d)).

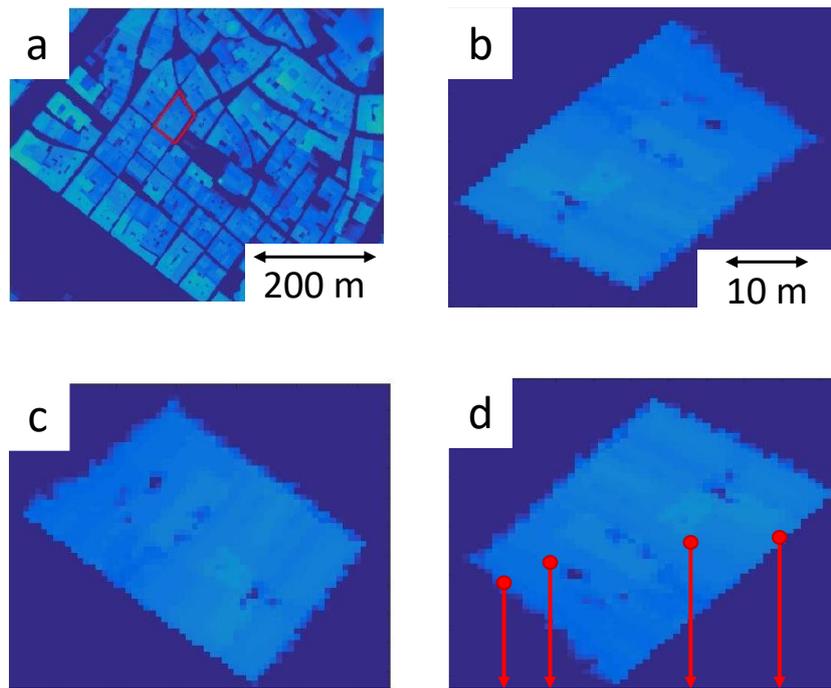


Figura 62. a: isolamento di uno specifico elemento del tessuto urbano tramite l'utilizzo di una griglia in formato vettoriale. b, c: rotazione dell'elemento, ai fini di simulare diverse direzioni di provenienza del vento. d: proiezione dei valori della sotto-matrice lungo la direzione ortogonale a quella di provenienza del vento.

Per il calcolo di  $A_F$  è possibile, di fatto, procedere in diversi modi. In questo lavoro si è sempre considerato il massimo valore di altezza per ogni colonna della sotto-matrice del DEM che rappresenta l'elemento di griglia considerato e si è posto:

$$A_F(\theta) = lp \, fd(\theta) \sum_{j=1}^{m(\theta)} h_{max,j} \quad (34)$$

in cui  $lp$  è la lunghezza (in m) del lato del pixel del DEM utilizzato,  $fd(\theta)$  è il fattore di distorsione per le lunghezze dovuto alla rotazione, calcolato sulla base del rapporto tra numero di elementi della matrice ruotata e numero di elementi della matrice originale,  $j$  è l'indice di colonna della matrice ruotata e  $m(\theta)$  è il numero di colonne della matrice ruotata che, in generale, dipende anche dalla rotazione e distorsione applicata.  $h_{max,j}$  è il valore massimo di altezza per la colonna  $j$  tra tutte le righe  $i$  della matrice.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Badas MG, Ferrari S, Garau M, Querzoli G (2017) On the effect of gable roof on natural ventilation in two-dimensional urban canyons. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 162:24–34. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.01.006>
- Badas MG, Salvadori L, Garau M, et al (2019) Urban areas parameterisation for CFD simulation and cities air quality analysis. *Int J Environ Pollut* 66:5–18. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2019.104514>
- Best MJ (2006) Progress towards better weather forecasts for city dwellers: From short range to climate change. *Theor Appl Climatol* 84:47–55. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0143-2>
- Blocken B (2015) Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Build Environ* 91:219–245. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>
- Boeing G (2017) OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Comput Environ Urban Syst* 65:126–139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>
- Bottema M (1995) Aerodynamic roughness parameters for homogeneous building groups - Part 2: Results. *Aerodyn Rough Parameters Homog Build Groups*
- Bottema M (1996) Roughness parameters over regular rough surfaces: Experimental requirements and model validation. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 64:249–265. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(96\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(96)00062-1)
- Brimblecombe P (2016) *Urban Pollution and Changes to Materials and Building Surfaces*. Peter Brimblecombe (City University of Hong Kong, Hong Kong)
- Burian S, Ram S, Maddula K, et al (2002) *Morphological analyses using 3D building databases: Albuquerque, New Mexico*
- Cao M, Lin Z (2014) Impact of urban surface roughness length parameterization scheme on urban atmospheric environment simulation. *J Appl Math* 2014:.. <https://doi.org/10.1155/2014/267683>
- Chan CK, Yao X (2008) Air pollution in mega cities in China. *Atmos Environ* 42:1–42. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.003>

- Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al (2011) The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *Int J Climatol* 31:273–288. <https://doi.org/10.1002/joc.2158>
- Cheng H, Castro IP (2002) Near wall flow over urban-like roughness. *Bound-Layer Meteorol* 104:229–259. <https://doi.org/10.1023/A:1016060103448>
- Counehan J (1971) Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements. *Atmospheric Environ* 1967 5:637–642. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(71\)90120-X](https://doi.org/10.1016/0004-6981(71)90120-X)
- di Sabatino S, Leo LS, Cataldo R, et al (2010) Construction of digital elevation models for a southern European city and a comparative morphological analysis with respect to Northern European and North American cities. *J Appl Meteorol Climatol* 49:1377–1396. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2117.1>
- Dockery DW, Pope CA, Xu X, et al (1993) An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *N Engl J Med* 329:1753–1759. <https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401>
- European Parliament, European Union Council (2008) 2008/50/EC Directive, 21 May, 2008, on air quality and clean air in Europe.
- Fernando HJS, Zajic D, Di Sabatino S, et al (2010) Flow, turbulence, and pollutant dispersion in urban atmospheres. *Phys Fluids* 22:1–20. <https://doi.org/10.1063/1.3407662>
- Gál T, Unger J (2009) Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Build Environ* 44:198–206. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.02.008>
- Garau M, Badas MG, Ferrari S, et al (2018) Turbulence and Air Exchange in a Two-Dimensional Urban Street Canyon Between Gable Roof Buildings. *Bound-Layer Meteorol* 167:123–143. <https://doi.org/10.1007/s10546-017-0324-4>
- Garratt JR (1994) Review: the atmospheric boundary layer. *Earth-Sci Rev* 37:89–134. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90026-4)
- Grimmond CSB, Oke TR (1999) Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J Appl Meteorol* 38:1262–1292. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2)

- Hanna S, Chang J (1992) Boundary-layer parameterization for applied dispersion modeling over urban areas. *Bound Layer Meteorol* 58:229–259. <https://doi.org/10.1007/BF02033826>
- Harman IN, Finnigan JJ (2007) A simple unified theory for flow in the canopy and roughness sublayer. *Bound-Layer Meteorol* 123:339–363. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9145-6>
- Hertwig D (2013) On Aspects of Large-Eddy Simulation Validation for Near-Surface Atmospheric Flows. *Amburgo*
- Hu C, Zhang F, Gong F-Y, et al (2019) Classification and mapping of urban canyon geometry using Google Street View images and deep multitask learning. *Build Environ* 167:. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106424>
- Hwang M-K, Bang J-H, Kim S, et al (2019) Estimation of thermal comfort felt by human exposed to extreme heat wave in a complex urban area using a WRF-MENEX model. *Int J Biometeorol*. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01705-1>
- Jackson M, Hood C, Johnson C, Johnson K (2016) Calculation of Urban Morphology Parameterisations for London for use with the ADMS-Urban Dispersion Model. *Int J Adv Remote Sens GIS* 5:1678–1687. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.52>
- Jackson PS (1981) On The Displacement Height In The Logarithmic Velocity Profile. *J Fluid Mech* 111:15–25. <https://doi.org/10.1017/S0022112081002279>
- Janhäll S (2015) Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmos Environ* 105:130–137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>
- Jhaldiyal A, Gupta K, Gupta PK, et al (2018) Urban Morphology Extractor: A spatial tool for characterizing urban morphology. *Urban Clim* 24:237–246. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.04.003>
- Kanda M, Inagaki A, Miyamoto T, et al (2013) A New Aerodynamic Parametrization for Real Urban Surfaces. *Bound-Layer Meteorol* 148:357–377. <https://doi.org/10.1007/s10546-013-9818-x>
- Kastner-Klein P, Rotach MW (2004) Mean flow and turbulence characteristics in an urban roughness sublayer. *Bound-Layer Meteorol* 111:55–84. <https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000010994.32240.b1>
- Kent CW, Grimmond CSB, Gatey D, Barlow JF (2018) Assessing methods to extrapolate the vertical wind-speed profile from surface observations in a city centre during strong winds. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 173:100–111. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.007>

- Kent CW, Grimmond S, Gatey D, Hirano K (2019) Urban morphology parameters from global digital elevation models: Implications for aerodynamic roughness and for wind-speed estimation. *Remote Sens Environ* 221:316–339. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.024>
- Ketterer C, Gangwisch M, Fröhlich D, Matzarakis A (2017) Comparison of selected approaches for urban roughness determination based on voronoi cells. *Int J Biometeorol* 61:189–198. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1203-2>
- Kutzbach JE (1961) Investigations of the modification of wind profiles by artificially controlled surface roughness. 1961.
- Lettau H (1969) Note on Aero-Dynamic Roughness-Parameter Estimation on the Basis of Roughness-Element Description. *J Appl Meteorol* 8:828–832. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1969\)008<0828:NOARPE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1969)008<0828:NOARPE>2.0.CO;2)
- Li X, Zhou Y, Gong P, et al (2020) Developing a method to estimate building height from Sentinel-1 data. *Remote Sens Environ* 240:111705. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111705>
- Liu S, Pan W, Zhang H, et al (2017) CFD simulations of wind distribution in an urban community with a full-scale geometrical model. *Build Environ* 117:11–23. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.021>
- Liu S, Pan W, Zhao X, et al (2018) Influence of surrounding buildings on wind flow around a building predicted by CFD simulations. *Build Environ* 140:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.011>
- Löwe R, Kleidorfer M, Arnbjerg-Nielsen K (2019) Data-driven approaches to derive parameters for lot-scale urban development models. *Cities* 95:.. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.06.005>
- Macdonald RW, Griffiths RF, Hall DJ (1998) An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos Environ* 32:1857–1864. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00403-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00403-2)
- Martilli A, Clappier A, Rotach MW (2002) An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Bound-Layer Meteorol* 104:261–304. <https://doi.org/10.1023/A:1016099921195>
- Masson V (2000) A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound-Layer Meteorol* 94:357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>

- Mauree D, Coccolo S, Perera ATD, et al (2018) A new framework to evaluate urban design using urban microclimatic modeling in future climatic conditions. *Sustain Switz* 10: <https://doi.org/10.3390/su10041134>
- Merlier L, Kuznik F, Rusaouën G, Salat S (2018) Derivation of generic typologies for microscale urban airflow studies. *Sustain Cities Soc* 36:71–80. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.017>
- Mi Z, Guan D, Liu Z, et al (2019) Cities: The core of climate change mitigation. *J Clean Prod* 207:582–589. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.034>
- Miao Y, Liu S (2019) Linkages between aerosol pollution and planetary boundary layer structure in China. *Sci Total Environ* 650:288–296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.032>
- Millward-Hopkins J, Tomlin A, Ma L, et al (2013a) Assessing the potential of urban wind energy in a major UK city using an analytical model. *Renew Energy* 60:701–710. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.020>
- Millward-Hopkins JT, Tomlin AS, Ma L, et al (2013b) Aerodynamic Parameters of a UK City Derived from Morphological Data. *Bound-Layer Meteorol* 146:447–468. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9761-2>
- Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, et al (2004) Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicol* 16:437–445. <https://doi.org/10.1080/08958370490439597>
- Oke TR (1988) Street design and urban canopy layer climate. *Energy Build* 11:103–113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- Pelliccioni A, Monti P, Gariazzo C, Leuzzi G (2012) Some characteristics of the urban boundary layer above Rome, Italy, and applicability of Monin-Obukhov similarity. *Environ Fluid Mech* 12:405–428. <https://doi.org/10.1007/s10652-012-9246-3>
- Pelliccioni A, Monti P, Leuzzi G (2015) An alternative wind profile formulation for urban areas in neutral conditions. *Environ Fluid Mech* 15:135–146. <https://doi.org/10.1007/s10652-014-9364-1>
- Pope III CA, Burnett RT, Thun MJ, et al (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *J Am Med Assoc* 287:1132–1141
- Ratti C, Di Sabatino S, Britter R, et al (2002) Analysis of 3-D Urban Databases with Respect to Pollution Dispersion for a Number of European and American Cities. *Water Air Soil Pollut Focus* 2:459–469. <https://doi.org/10.1023/A:1021380611553>

- Ratti C, Di Sabatino S, Britter R (2006) Urban texture analysis with image processing techniques: winds and dispersion. *Theor Appl Climatol* 84:77–90. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0146-z>
- Ratti C, Richens P (2004) Raster analysis of urban form. *Environ Plan B Plan Des* 31:297–309. <https://doi.org/10.1068/b2665>
- Raupach MR (1992) Drag and drag partition on rough surfaces. *Bound-Layer Meteorol* 60:375–395. <https://doi.org/10.1007/BF00155203>
- Ricci A, Burlando M, Freda A, Repetto MP (2017) Wind tunnel measurements of the urban boundary layer development over a historical district in Italy. *Build Environ* 111:192–206. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.10.016>
- Richards P., Hoxey R. (1993) Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- $\epsilon$  turbulence model. *Proc 1st Int Comput Wind Eng* 46–47:145–153. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90124-7](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90124-7)
- Richards PJ, Norris SE (2011) Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 99:257–266. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2010.12.008>
- Rolaf van Leeuwen F. (2002) A European perspective on hazardous air pollutants. *Toxicology* 181–182:355–359. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(02\)00463-8](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(02)00463-8)
- Salamanca F, Zhang Y, Barlage M, et al (2018) Evaluation of the WRF-Urban Modeling System Coupled to Noah and Noah-MP Land Surface Models Over a Semiarid Urban Environment. *J Geophys Res Atmospheres* 123:2387–2408. <https://doi.org/10.1002/2018JD028377>
- Salvadori L, Badas MG, Di Bernardino A, et al (2021) A Street Graph-Based Morphometric Characterization of Two Large Urban Areas. *Sustainability* 13:. <https://doi.org/10.3390/su13031025>
- Salvadori L, Badas MG, Garau M, et al (2019) Similar urbanistic typologies and morpho-metric parametrization: Analysis of a possible date of construction based classification. In: 19th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Harmo 2019. Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, HARMO
- Samsonov TE, Konstantinov PI, Varentsov MI (2015) Object-oriented approach to urban canyon analysis and its applications in meteorological modeling. *Urban Clim* 13:122–139. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.07.007>

- Shrestha S, Baral B, Dhital NB, Yang H-H (2021) Assessing air pollution tolerance of plant species in vegetation traffic barriers in Kathmandu Valley, Nepal. *Sustain Environ Res* 31:. <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00076-2>
- Simón-Moral A, Dipankar A, Roth M, et al (2020) Application of MORUSES single-layer urban canopy model in a tropical city: Results from Singapore. *Q J R Meteorol Soc* 146:576–597. <https://doi.org/10.1002/qj.3694>
- Soulhac L, Nguyen CV, Volta P, Salizzoni P (2017) The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion. PART III: Validation against NO<sub>2</sub> yearly concentration measurements in a large urban agglomeration. *Atmos Environ* 167:377–388. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.034>
- Soulhac L, Salizzoni P, Cierco F-X, Perkins R (2011) The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; part I, presentation of the model. *Atmos Environ* 45:7379–7395. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.008>
- Soulhac L, Salizzoni P, Mejean P, et al (2012) The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; PART II, validation of the model on a real case study. *Atmos Environ* 49:320–337. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.031>
- Streets DG, Bond TC, Carmichael GR, et al (2003) An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. *J Geophys Res Atmospheres* 108:GTE 30-1-GTE 30-23
- Striegel MF, Guin EB, Hallett K, et al (2003) Air pollution, coatings, and cultural resources. *Prog Org Coat* 48:281–288. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.05.001>
- Tanaka H, Tamura Y, Ohtake K, et al (2012) Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 107–108:179–191. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.04.014>
- Tian L, Xu G, Fan C, et al (2019) Analyzing Mega city-regions through integrating urbanization and eco-environment systems: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Int J Environ Res Public Health* 16:. <https://doi.org/10.3390/ijerph16010114>
- Tominaga Y, Stathopoulos T (2016) Ten questions concerning modeling of near-field pollutant dispersion in the built environment. *Build Environ* 105:390–402. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.027>
- Vahlsing C, Smith KR (2012) Global review of national ambient air quality standards for PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub> (24 h). *Air Qual Atmosphere Health* 5:393–399. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0131-2>

- Vardoulakis S, Fisher BEA, Pericleous K, Gonzalez-Flesca N (2003) Modelling air quality in street canyons: A review. *Atmos Environ* 37:155–182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00857-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00857-9)
- WHO (2000) *Air Quality Guidelines for Europe*, 2nd edition
- Wieringa J (1992) Updating the Davenport roughness classification. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 41:357–368. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90434-C](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90434-C)
- Wong MS, Nichol JE, To PH, Wang J (2010) A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis. *Build Environ* 45:1880–1889. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.019>
- Yuan C, Norford L, Britter R, Ng E (2016) A modelling-mapping approach for fine-scale assessment of pedestrian-level wind in high-density cities. *Build Environ* 97:152–165. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.006>
- Yuan C, Ren C, Ng E (2014) GIS-based surface roughness evaluation in the urban planning system to improve the wind environment – A study in Wuhan, China. *Meas Model Urban Atmosphere Present Past* 10:585–593. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.005>
- Zajic D, Fernando HJS, Brown MJ, Pardyjak ER (2015) On flows in simulated urban canopies. *Environ Fluid Mech* 15:275–303. <https://doi.org/10.1007/s10652-013-9311-6>