

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

**VULNERABILITÀ DEGLI AMBIENTI URBANI A
RILASCI DI SOSTANZE TOSSICHE AERIFORMI**

APPROCCIO SECONDO LA TEORIA DELLE RETI COMPLESSE

Relatori

Dott.ssa Sofia Fellini

Prof. Luca Ridolfi

Prof. Pietro Stefano Salizzoni
(École Centrale de Lyon)

Candidato

Michele Digiovanni

A.A. 2018/2019

INDICE

INTRODUZIONE	5
1. MODELLO	9
1.1. MODELLO FISICO DI PROPAGAZIONE	9
1.1.1. PROPAGAZIONE LUNGO UNA VIA.....	9
1.1.2. PROPAGAZIONE NEGLI INCROCI	20
1.2. PROPAGAZIONE SU RETE	21
1.2.1. COSTRUZIONE DELLA RETE.....	22
1.2.2. ALGORITMO DI PROPAGAZIONE	23
1.3. VULNERABILITÀ	25
2. STRUMENTI	29
2.1. STREET NETWORK	29
2.1.1. SHAPEFILE DI PARTENZA	30
2.1.2. UTILITIES PER L'ELABORAZIONE DEL RETICOLO	32
2.2. CALCOLO DELLA VELOCITÀ DEL VENTO NELLE VIE	35
2.2.1. INPUT DI SIRANE	36
2.2.2. OUTPUT DI SIRANE	37
2.3. CODICE PER IL CALCOLO DELLA VULNERABILITÀ	38
3. RISULTATI	41
3.1. PARIGI	41
3.1.1. GEOMETRIA DEL RETICOLO VIARIO.....	42
3.1.2. VELOCITÀ DEL VENTO NELLE VIE	47
3.1.3. VULNERABILITÀ	55
3.2. NEW YORK CITY	61
3.2.1. GEOMETRIA DEL RETICOLO VIARIO.....	62
3.2.2. VELOCITÀ DEL VENTO NELLE VIE	67
3.2.3. VULNERABILITÀ	75

3.3. FIRENZE	81
3.3.1. GEOMETRIA DEL RETICOLO VIARIO.....	82
3.3.2. VELOCITÀ DEL VENTO NELLE VIE	87
3.3.3. VULNERABILITÀ	95

CONCLUSIONI	101
--------------------------	-----

APPENDICE	107
------------------------	-----

A.1. DETTAGLI SUI PROGRAMMI UTILIZZATI	107
---	-----

A.2. DETTAGLI SULLE MODIFICHE AI RETICOLI URBANI	115
---	-----

A.2.1. PARIGI	115
---------------------	-----

A.2.2. NEW YORK CITY.....	116
---------------------------	-----

A.2.3. FIRENZE	118
----------------------	-----

BIBLIOGRAFIA	121
---------------------------	-----

INTRODUZIONE

Le città sono luoghi caratterizzati da un'elevata densità di popolazione. Immaginando che, in un punto di una città (ad esempio, in un incrocio stradale), venga rilasciata, accidentalmente o intenzionalmente, una **sostanza tossica gassosa**, essa si propagherebbe nelle vie seguendo percorsi dettati dalla direzione del vento. Così essa entrerebbe in contatto con un elevato numero di persone, costituendo una minaccia per il centro abitato. È dunque necessario avere a disposizione dei modelli che siano in grado di prevedere in che modo la sostanza tossica gassosa, rilasciata in un punto della città, si propaghi nelle vie e di ottenere in breve tempo una stima verosimile del numero di persone che entrerebbero in contatto con essa. In questo modo, le amministrazioni pubbliche potrebbero utilizzare i risultati di questi modelli per capire quali zone della città sono più vulnerabili nei confronti della sostanza tossica, ovvero in quali zone verrebbe contagiato un alto numero di persone, potendo così studiare un piano di prevenzione.

In letteratura sono presenti diversi **modelli** di propagazione delle sostanze tossiche gassose nell'atmosfera urbana. Tra questi si citano i modelli **CFD** ("Computational Fluid Dynamics"), i quali permettono di prevedere la dispersione delle sostanze tossiche in geometrie complesse, proprio come quelle urbane. Essi permettono di ottenere il campo di velocità e di concentrazione delle sostanze tossiche in tutto il dominio di studio (Blocken, 2015), a partire dai dati geometrici riguardanti le vie della città e dalle condizioni meteo, in particolare dalla velocità e dalla direzione del vento. Si tratta di modelli i cui risultati sono molto accurati, ma richiedono un elevato onere computazionale, quindi con lunghi tempi di calcolo, tale da richiedere l'utilizzo di computer ad alte prestazioni.

Altri tipi di modelli, mediante opportune ipotesi semplificative, permettono di ridurre l'onere computazionale e di rendere più semplice la previsione della concentrazione di sostanza tossica nelle vie cittadine (Di Sabatino, Buccolieri, & Salizzoni, 2013). Tra questi ci sono i modelli basati sul concetto di "**Street network**" (Carruthers, Edmunds, Lester, McHugh, & Singles, 2000). Si considerano edifici dalle geometrie semplificate e si suppone che la sostanza tossica venga trasportata nell'atmosfera urbana racchiusa tra gli edifici, ovvero nelle vie e negli incroci. Anche lo scambio di massa all'interno delle vie e tra l'atmosfera urbana e quella soprastante è semplificato rispetto ai modelli CFD, supponendo che questi processi siano regolati da pochi fattori chiave, come l'orientamento delle vie e la loro geometria. In questo ambito rientra il modello "**SIRANE**" (Soulhac L. , Salizzoni, Cierco, & Perkins, 2011), sviluppato all'École Centrale de Lyon, utilizzato per calcolare le concentrazioni di inquinanti nelle vie di una città. Recentemente, è stato presentato un modello che combina SIRANE con la chimica atmosferica (Kim, Wu, Seigneur, & Roustan, 2018). Per semplificare ulteriormente la geometria, è stato sviluppato un modello in cui gli ostacoli al flusso di sostanza tossica sono considerati cubici (Hamlyn, Hilderman, & Britter, 2007).

Un nuovo approccio per la valutazione della vulnerabilità di una città nei confronti di sostanze tossiche è basato sul concetto di **rete complessa** (Boccaletti, Latora, Moreno, Chavez, & Hwang, 2006). Si tratta di un potente strumento matematico utilizzato in diversi campi, dalle scienze sociali (Borgatti, Mehra, Brass, & Labianca, 2009) all'ingegneria (Giustolisi & Ridolfi, 2014). È stato inoltre

presentato un approccio mediante rete complessa per lo studio della meteorologia regionale (Gelbrecht, Boers, & Kurths, 2017). La complessità risiede non nei singoli elementi della rete, bensì nella sua topologia, dato che esistono numerosissimi elementi e interconnessioni tra di essi. In questo caso, si vede il reticolo viario di una città come un insieme di archi (vie) e nodi (incroci), all'interno dei quali si muove la sostanza tossica (Fellini, Salizzoni, Soulhac, & Ridolfi, 2018). Ogni arco porta con sé diverse informazioni sulle caratteristiche geometriche, topologiche e fluidodinamiche della rete stessa, tra cui, ad esempio, la geometria delle vie e degli edifici che si affacciano su di esse, l'orientamento nello spazio delle vie e velocità e direzione del vento in esse. Inoltre, tramite l'approccio mediante rete complessa, si utilizza una soluzione analitica per rappresentare lo scambio di massa di sostanza tossica nel reticolo e tra il reticolo e l'atmosfera soprastante (nei precedenti approcci, ad esempio tramite SIRANE, la soluzione è numerica).

In questa tesi, il modello **SIRANE** non viene utilizzato per calcolare la concentrazione di sostanza tossica nelle vie cittadine, ma solo per ricavare la velocità e la direzione del vento in esse. La concentrazione di inquinante viene infatti ricavata mediante approccio tramite **rete complessa**, in cui si adoperano determinate semplificazioni rispetto al modello SIRANE: ad esempio, tra le varie ipotesi, si considera che la sostanza tossica possa disperdersi verso l'atmosfera al di sopra dei tetti della città, senza rientrarvi, e che negli incroci la concentrazione di essa rimanga costante. In questo modo si ha a disposizione uno strumento speditivo per calcolare, a partire da dati iniziali di concentrazione di inquinante, supposto rilasciato in un preciso punto della città, la zona in cui questa concentrazione rimane al di sopra di una certa soglia, pericolosa per gli umani. Nota l'ampiezza di questa zona e la sua popolazione, è così immediato calcolarne la **vulnerabilità**, ovvero il numero di persone che potenzialmente potrebbero entrare in contatto con la sostanza nociva. Grazie alle semplificazioni effettuate, la vulnerabilità può essere agevolmente calcolata in diversi scenari di rischio: si considerano, infatti, diverse concentrazioni iniziali, diverse direzioni del vento e diversi punti di rilascio della sostanza tossica, potendo così individuare le aree più vulnerabili della città.

In questa tesi, le città studiate mediante l'approccio appena descritto sono **Parigi, New York e Firenze**. Per ognuna di esse, è stato inizialmente utilizzato SIRANE per calcolare la velocità del vento nelle vie, poi, tramite rete complessa, si è calcolata la concentrazione di sostanza tossica nelle vie e, noti i dati di popolazione, la vulnerabilità del reticolo urbano. Si è potuto così effettuare un confronto tra queste tre città, caratterizzate da un diverso impianto urbanistico, individuando quale di esse è più vulnerabile e quale lo è meno.

Di seguito si illustra brevemente il contenuto dei diversi capitoli.

Nel primo capitolo si illustra il **modello fisico** alla base del fenomeno di propagazione della sostanza tossica, in cui si descrive in che modo essa si propaga in ogni via del reticolo, come varia la sua concentrazione man mano che ci si allontana dal nodo sorgente di rilascio e come si calcola la vulnerabilità legata ad uno specifico nodo sorgente.

Nel secondo capitolo si espongono gli **strumenti** utilizzati per studiare la propagazione della sostanza tossica e la vulnerabilità delle città prese in esame. Si illustrano quindi lo strumento utilizzato per la costruzione e la modifica della rete viaria, quello usato per il calcolo della velocità del vento nelle vie e infine il codice di calcolo utilizzato per la valutazione della vulnerabilità.

Nel terzo capitolo si espongono i **risultati** ottenuti per le città studiate, ovvero le loro caratteristiche topologiche (come, ad esempio, l'orientamento delle vie), geometriche (larghezza delle vie e altezza

degli edifici che si affacciano su di esse), fluidodinamiche (velocità del vento nelle vie) e la loro vulnerabilità (sotto opportune condizioni iniziali, numero di persone potenzialmente raggiungibili dalla sostanza tossica).

Nelle conclusioni, alla luce dei risultati ottenuti separatamente per ogni città, si effettua un **confronto** tra di esse, individuando quale tipo di urbanistica è intrinsecamente più vulnerabile di altri.

Di queste città, non è stato studiato tutto il reticolo viario, bensì solo una parte di esso, in genere parte del centro cittadino: si è scelta, per ogni città, una zona centrale interamente urbanizzata, caratterizzata da edifici abbastanza alti e con pochi parchi. Si è scelto dunque di studiare una parte di città che, essendo centrale e densamente abitata, potenzialmente è più vulnerabile di altre parti di essa.

1. MODELLO

In questo capitolo si espongono le assunzioni e le leggi fisiche che stanno alla base del fenomeno di propagazione della sostanza tossica gassosa nell'atmosfera urbana. Si mostra in che modo, a partire da un nodo sorgente, la sostanza tossica si propaga in una via, come essa attraversa un incrocio e come si propaga nelle vie successive. Si mostra inoltre il calcolo della lunghezza totale delle vie in cui la concentrazione di sostanza tossica è maggiore di un valore soglia e, dopo aver stimato il numero di abitanti in ogni via, il calcolo della vulnerabilità associata a un certo nodo sorgente, ovvero il numero di persone che potenzialmente può entrare in contatto con la sostanza tossica.

1.1. MODELLO FISICO DI PROPAGAZIONE

La propagazione della sostanza tossica gassosa avviene all'interno della rete stradale della città. Le strade sono rappresentate come "canyon", ovvero delle cavità la cui forma è assunta rettangolare, con altezza H e larghezza W . Essa è aperta superiormente, consentendo così lo scambio con l'atmosfera soprastante. Si assume che il trasporto della sostanza tossica in una via avvenga in direzione longitudinale, con velocità pari a quella del vento nella via, e che esista anche una componente di velocità verticale, che permette l'allontanamento della sostanza tossica dalla via, riducendone così la concentrazione man mano che ci si allontana dalla sorgente. Si effettuano inoltre due importanti semplificazioni:

- In ogni incrocio, la concentrazione di sostanza tossica non varia, ovvero essa rimane costante durante l'attraversamento dell'incrocio da parte della sostanza tossica;
- Si trascura la dinamica della sostanza tossica al di sopra degli edifici, ovvero si considera l'allontanamento verticale di essa dalla via, ma non si considera il suo possibile rientro nel reticolo urbano.

1.1.1. PROPAGAZIONE LUNGO UNA VIA

Dato il reticolo viario di una città, si ipotizza che una sostanza tossica venga trasportata nel mezzo fluido, in questo caso l'aria, solo nella direzione longitudinale di ogni via (problema monodimensionale), alla velocità del vento in quella stessa via (U_{st}). In Figura 1.1.1.1 si osserva, schematicamente, la propagazione longitudinale della sostanza tossica in una via lunga L , caratterizzata da velocità del vento pari a U_{st} .

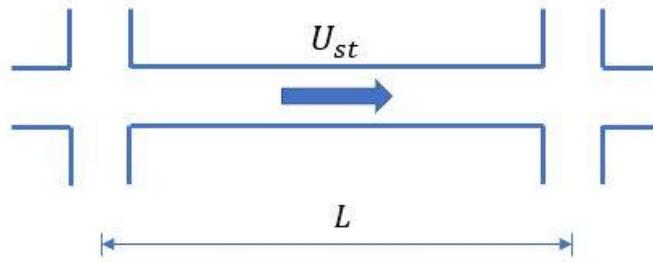


Figura 1.1.1.1 - Trasporto sostanza tossica in una via lunga L , caratterizzata da una velocità del vento U_{st} .

L'equazione di trasporto scritta per il problema monodimensionale è la seguente:

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{Trasporto advettivo}} + \underbrace{U_{st} \frac{\partial C}{\partial x}}_{\text{Comparsa/scomparsa sostanza}} + \underbrace{(\lambda_R + \lambda_F)C}_{\text{Trasporto per diffusione turbolenta}} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0. \quad (1.1)$$

Nell'equazione (1.1), C è la concentrazione della sostanza [kg/m], U_{st} è la velocità del fluido nella direzione longitudinale della via [m/s], ovvero, in questo caso, la velocità del vento in essa; λ_R è un coefficiente che tiene conto di possibili reazioni chimiche della sostanza tossica, λ_F tiene conto di fenomeni fisici che coinvolgono la sostanza tossica, mentre D è il coefficiente di diffusione turbolenta longitudinale.

Nel nostro problema, il termine di diffusione turbolenta viene considerato molto inferiore al termine advettivo, motivo per il quale viene trascurato. Si suppone inoltre che la sostanza tossica non reagisca chimicamente con altre sostanze, dunque anche il termine λ_R viene trascurato.

Poiché la via è aperta superiormente, si tiene inoltre conto del processo fisico di scambio verticale: la sostanza tossica tende ad allontanarsi dalla via in direzione verticale, contribuendo ad una diminuzione della concentrazione. Ciò è descritto, nell'equazione (1.1), dal termine λ_F , tramite il quale si tiene conto della possibilità di comparsa o scomparsa della sostanza tossica.

Si può dunque definire una velocità di scambio verticale, funzione della velocità del vento al di sopra degli edifici e delle caratteristiche geometriche della via, come descritto nell'equazione (1.2):

$$U_d = \begin{cases} \frac{u_*}{\sqrt{2} \pi}, & \text{per } \frac{H}{W} < 1.5, \\ \frac{u_*}{2\sqrt{2} \pi}, & \text{per } \frac{H}{W} > 1.5. \end{cases} \quad (1.2)$$

Nell'equazione (1.2) (Salizzoni, Soulhac, & Mejean, 2009), (Soulhac L., Salizzoni, Cierco, & Perkins, 2011), u_* è la velocità di attrito, H è l'altezza media degli edifici che si affacciano sulla via considerata e W è la larghezza della medesima via. Si osserva che, all'aumentare del rapporto H/W , la velocità di scambio verticale U_d assume valori più bassi, dunque, in questo caso, la sostanza tossica permane

più a lungo nella via; al contrario, se il rapporto H/W è più basso, la sostanza tossica tende più facilmente ad allontanarsi dalla via verso l'atmosfera soprastante (vedi Figura 1.1.1.2).

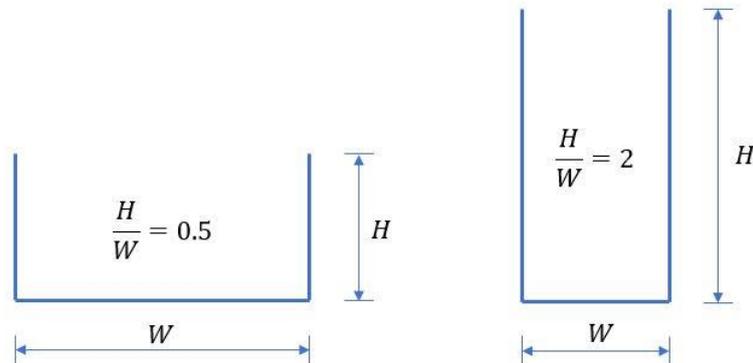


Figura 1.1.1.2 - Sezione trasversale della via al variare del rapporto H/W . A sinistra, rapporto basso, quindi ci si aspetta una maggiore velocità di allontanamento verticale U_d . A destra, rapporto più alto, pertanto ci si aspetta una minore U_d .

Ad esempio, un basso rapporto H/W può riguardare un ampio viale, costeggiato da edifici non troppo alti: in questo caso, la sostanza tossica potrà più facilmente spostarsi verso l'atmosfera soprastante. Al contrario, un alto rapporto H/W può riguardare le vie di un centro storico, caratterizzato da edifici non troppo alti, ma da vie decisamente strette, oppure una via sulla quale si affacciano edifici alti, come grattacieli: in questo secondo caso, la sostanza tossica permane più a lungo nella via, dato che mette più tempo ad abbandonarla in direzione verticale.

La velocità di attrito u_* è ricavabile dalla seguente relazione di Monin-Obukhov, che descrive il profilo verticale di velocità del vento nello strato limite atmosferico, ovvero nella porzione dell'atmosfera a diretto contatto con la superficie terrestre:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) - \psi_m \left(\frac{z-d}{L_{MO}} \right) \right]. \quad (1.3)$$

Nell'equazione (1.3), k è la costante di Von Karman (circa 0.41), L_{MO} è la lunghezza di Monin-Obukhov, funzione delle condizioni climatiche del sito, ψ_m è la funzione universale di Monin-Obukhov, z_0 è l'altezza geometrica di rugosità superficiale, altezza alla quale la velocità del vento diventa teoricamente nulla per effetto delle pareti degli edifici, e d è l'altezza di spostamento, altezza alla quale la velocità del vento si annulla a causa di ostacoli.

La Figura 1.1.1.3 rappresenta, qualitativamente, l'andamento della velocità longitudinale immediatamente al di sopra della via al variare della quota: a quote maggiori, la velocità è maggiore, a causa del trascinarsi da parte del vento che soffia sulla città, la cui velocità è più alta di quella nelle vie.

Dunque, noto il profilo verticale di velocità, tramite formula inversa si ricava la velocità di attrito u_* e, quindi, la velocità di scambio verticale U_d .

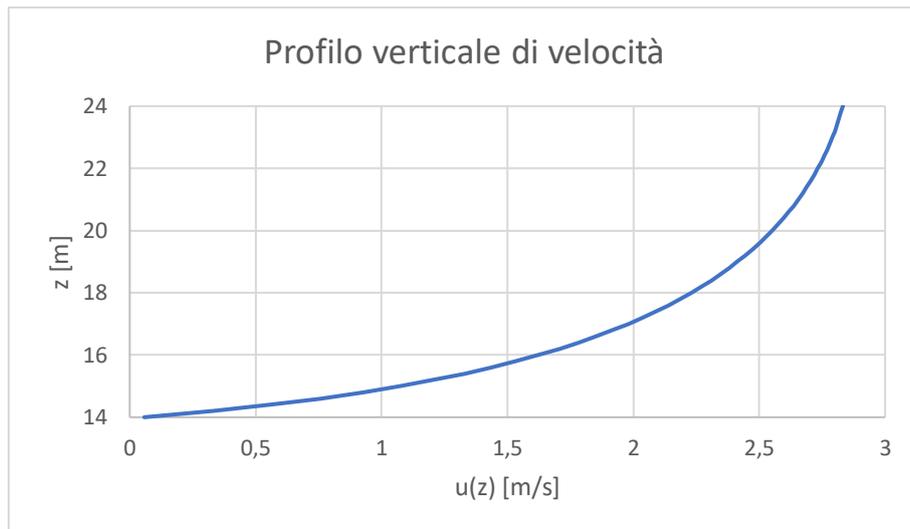


Figura 1.1.1.3 - Profilo verticale della velocità longitudinale al di sopra della via; si tratta di un esempio qualitativo, in cui si è considerato $d=13$ m, $z_0=0.9$ m, $\psi_m=0.7$ e $L_{MO}=10$ m, valori posti solo come esempio.

Una sostanza tossica viene quindi trasportata dal vento in direzione longitudinale con velocità U_{st} e parte di essa abbandona la via verso l'alto con velocità U_d , come illustrato in Figura 1.1.1.4.

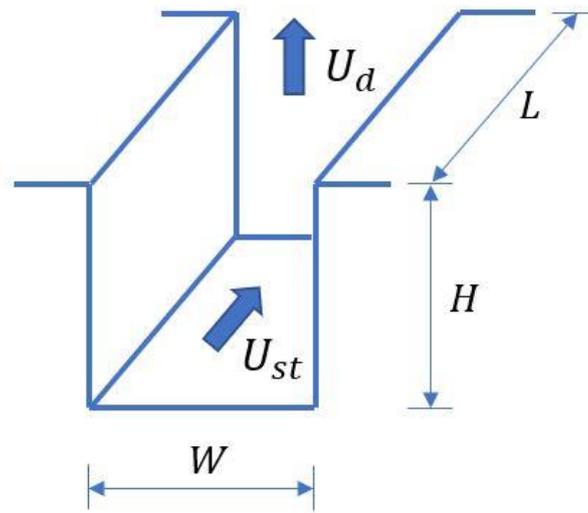


Figura 1.1.1.4 - Velocità longitudinale U_{st} e velocità di scambio verticale U_d

Lo scambio verticale è un fenomeno fisico di allontanamento della sostanza, per cui si ha la seguente relazione:

$$\lambda_F = \frac{U_d}{H}. \quad (1.4)$$

Nell'equazione (1.4) si osserva che il termine λ_F è dimensionalmente l'inverso del tempo: la quantità H/U_d è infatti il tempo che la sostanza impiega per allontanarsi in direzione verticale dalla via, ovvero il tempo di trasferimento verticale, descritto dall'equazione (1.5):

$$T_v = \frac{H}{U_d}. \quad (1.5)$$

A questo punto, si può riscrivere l'equazione differenziale (1.1) del trasporto, tenendo conto delle ipotesi fatte (Soulhac L. , Salizzoni, Mejean, & Perkins, 2013):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_{st} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{U_d}{H} C = 0. \quad (1.6)$$

Dunque, nell'equazione (1.6) non sono più presenti, rispetto all'equazione di partenza, il termine diffusivo e il termine di comparsa/scomparsa della sostanza tossica a seguito di reazioni chimiche; permangono invece il termine advettivo, che mostra come la sostanza si muova con la stessa velocità media del vento nella via (U_{st}), e il termine di allontanamento verticale della sostanza, dipendente dalla velocità U_d .

Si effettua la seguente sostituzione:

$$C = C' e^{-\frac{U_d}{H} t}, \quad (1.7)$$

per cui si ottiene:

$$\frac{\partial C'}{\partial t} e^{-\frac{U_d}{H} t} - \frac{U_d}{H} C' e^{-\frac{U_d}{H} t} + U_{st} \frac{\partial C'}{\partial x} e^{-\frac{U_d}{H} t} + \frac{U_d}{H} C' e^{-\frac{U_d}{H} t} = 0. \quad (1.8)$$

Effettuate le opportune semplificazioni, a partire dall'equazione (1.8) si ottiene:

$$\frac{\partial C'}{\partial t} + U_{st} \frac{\partial C'}{\partial x} = 0. \quad (1.9)$$

In questo modo, con l'equazione (1.9), l'informazione sull'allontanamento verticale è contenuta nella variabile C' e l'equazione di trasporto diventa formalmente quella del trasporto advettivo. La soluzione generale dell'equazione (1.9) è un'arbitraria funzione derivabile F , come mostrato nell'equazione (1.10).

$$C'(x, t) = F(x - U_{st} t). \quad (1.10)$$

Per sapere com'è fatta la funzione $F(x)$, si può imporre una condizione iniziale per la concentrazione, ovvero una condizione per $t=0$:

$$C'(x, 0) = F(x). \quad (1.11)$$

La condizione iniziale può essere descritta in diversi modi, come si espone di seguito.

Rilascio istantaneo

Ci sono diversi modi per rappresentare il rilascio istantaneo di una sostanza inquinante in un punto della rete viaria: ad esempio, tramite una funzione δ , ovvero si ipotizza un rilascio in un punto con concentrazione infinita in un tempo infinitesimo, oppure tramite una funzione "a gradino", ovvero un rilascio in una porzione finita di strada con concentrazione anch'essa finita.

Funzione δ

In un punto, si considera il rilascio di una sostanza con concentrazione infinita in un tempo infinitesimo; ciò è fatto tramite la funzione δ : plottando la concentrazione (adimensionalizzata rispetto al valore iniziale) in funzione dello spazio, al tempo zero (istante di rilascio) si ha una concentrazione infinita nel punto di rilascio.

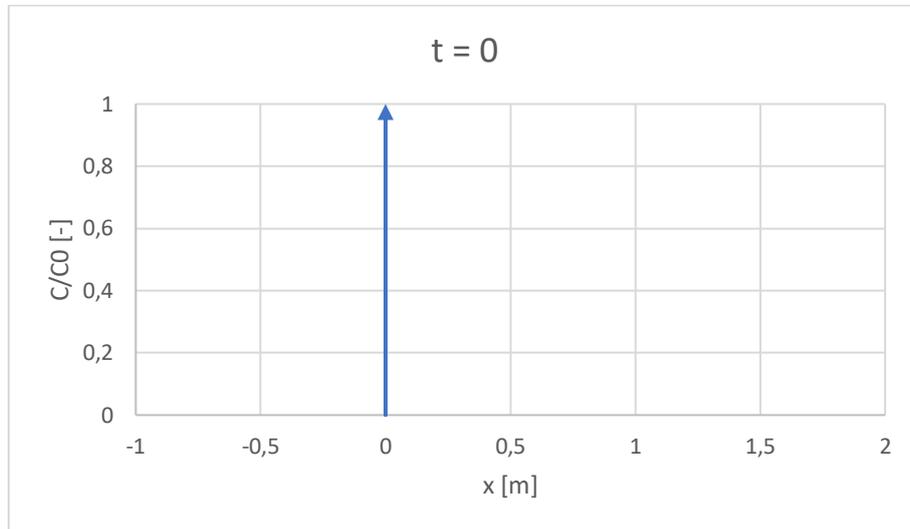


Figura 1.1.1.5 - Funzione δ per $t = 0$

Dal punto di vista matematico, la concentrazione all'istante $t=0$ può essere rappresentata nel seguente modo:

$$C(x, 0) = M_0 \delta(x). \quad (1.12)$$

Nell'equazione (1.12), M_0 è la massa iniziale di sostanza tossica [kg].

Date le equazioni (1.7) e (1.10), la concentrazione ad un tempo t generico è la seguente:

$$C(x, t) = M_0 e^{-\frac{U_d}{H}t} \delta(x - U_{st}t). \quad (1.13)$$

Dunque, nell'equazione (1.13) si nota che si ha un picco con concentrazione infinita, rappresentato dalla funzione δ , il quale, nel tempo, si sposta lungo la via, con celerità U_{st} . Il termine esponenziale decrescente non riesce a smorzare il picco, pertanto, lungo la via, la concentrazione continua a rimanere infinita.

Pertanto, la funzione δ non è capace di rappresentare in modo realistico ciò che accade nella realtà, in quanto, poiché il reticolo viario è aperto superiormente, consentendo lo scambio con l'atmosfera, la concentrazione tende man mano a diminuire.

Come esempio, si immagina una via caratterizzata da velocità del vento $U_{st} = 3 \text{ m/s}$. In un istante t generico, la sostanza tossica si trova nella seguente posizione:

$$x = U_{st} t. \quad (1.14)$$

Per $t = 10$ secondi, la sostanza tossica è concentrata nel punto di ascissa $x = 30$ metri, mentre, per $t = 20$ secondi, essa è concentrata in $x = 60$ metri.

Come si nota, al trascorrere del tempo, la sostanza tossica si sposta, ma rimane concentrata in un punto e la concentrazione rimane infinita, come se non ci fosse alcuno scambio verticale.

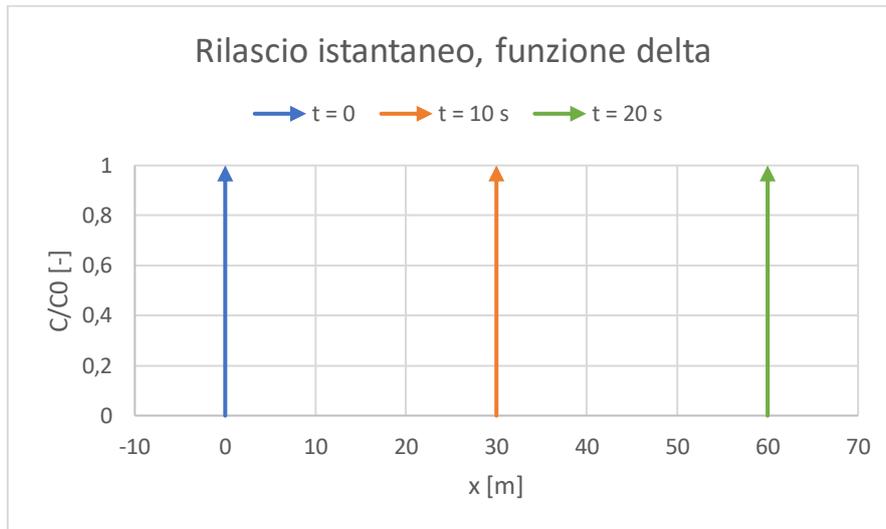


Figura 1.1.1.6 – Funzione δ per $t = 0, 10, 20$ s

In Figura 1.1.1.6 si può osservare contemporaneamente la concentrazione della sostanza tossica in diversi istanti temporali (0, 10 e 20 secondi), notando che non c'è alcuno smorzamento man mano che essa procede lungo la via.

È dunque necessario introdurre un'altra funzione, per poter rappresentare matematicamente lo smorzamento di concentrazione dovuto all'allontanamento verticale.

Funzione di Heaviside

Si rappresenta ora la concentrazione (adimensionalizzata rispetto al valore iniziale) mediante una funzione "gradino", ovvero non più concentrata in un punto, bensì spalmata su un tratto finito di strada, di lunghezza a , con concentrazione finita.

All'istante $t = 0$, per $a = 1$ m, si ha la seguente concentrazione:

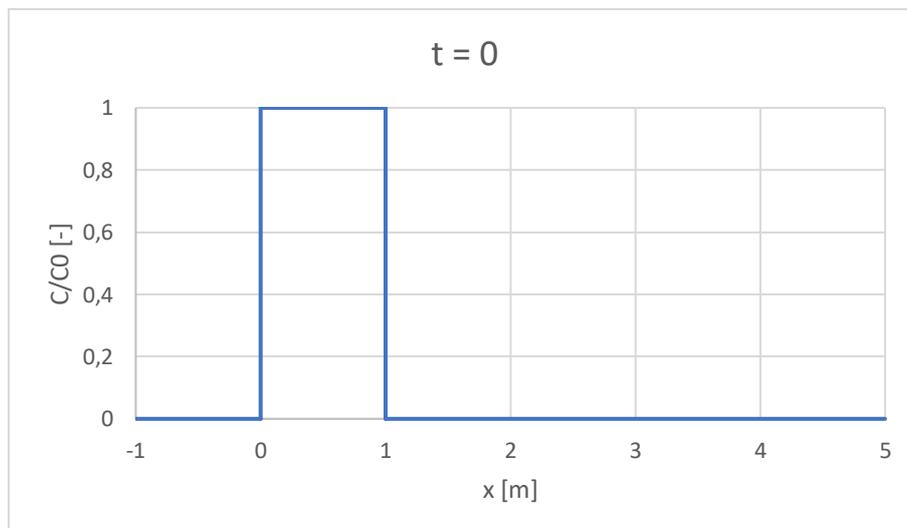


Figura 1.1.1.7 – Funzione di Heaviside per $t = 0$

La condizione iniziale, in termini matematici, è espressa nel seguente modo:

$$C'(x, 0) = C(x, 0) e^{-\frac{U_d}{H} 0} = C_0 [\theta(x) - \theta(x - a)]. \quad (1.15)$$

Nell'equazione (1.15), C_0 è la concentrazione iniziale [kg/m], ottenuta dividendo la massa iniziale [kg] per la lunghezza sulla quale essa è distribuita (a , [m]):

$$C_0 = \frac{M_0}{a}. \quad (1.16)$$

Nell'equazione (1.15) compare la funzione di Heaviside:

$$\theta(x) = \begin{cases} 0 & \text{per } x < 0 \\ 1 & \text{per } x > 0 \end{cases} \quad (1.17)$$

Mediante la funzione di Heaviside (equazione (1.17)), è possibile descrivere un "gradino".

In analogia all'equazione (1.13), ad un istante t generico, si ha:

$$C(x, t) = C_0 e^{-\frac{U_d}{H} t} [\theta(x - U_{st}t) - \theta(x - U_{st}t - a)]. \quad (1.18)$$

Dunque, tramite la funzione di Heaviside, si rappresenta un gradino che si sposta lungo la via nel tempo, con una concentrazione che pian piano decresce, data la presenza del termine esponenziale decrescente.

Come esempio, si considera una via con le seguenti caratteristiche:

- Velocità longitudinale del vento $U_{st} = 3 \text{ m/s}$;
- Velocità di scambio verticale $U_d = 0.3 \text{ m/s}$;
- Altezza media della via $H = 10 \text{ m}$.

Anche in questo caso, come per la δ , la posizione della sostanza tossica ad un generico istante t è la seguente:

$$x = U_{st} t. \quad (1.19)$$

In base all'equazione (1.19), per $t = 10$ secondi, la sostanza tossica si trova in $x = 30$ metri, mentre essa si trova in $x = 60$ metri per $t = 20$ secondi.

Osservando questi casi, si nota che il gradino, oltre a spostarsi lungo la via, diventa più basso, in quanto la concentrazione della sostanza inquinante, pian piano, diminuisce a causa del trasferimento verticale.

In Figura 1.1.1.8 si può osservare contemporaneamente la concentrazione della sostanza tossica in diversi istanti temporali (0, 10 e 20 secondi), notando chiaramente la diminuzione di concentrazione man mano che ci si allontana dalla sorgente.

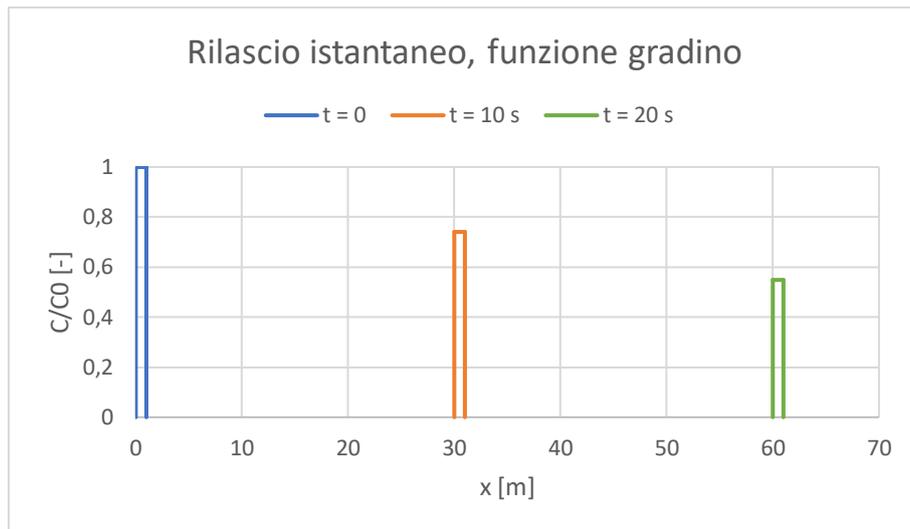


Figura 1.1.1.8 – Funzione di Heaviside per $t = 0, 10, 20$ s

Dunque, la funzione a gradino, a differenza della funzione δ , si presta bene per rappresentare una concentrazione che varia sia nello spazio (lungo la via) sia nel tempo.

Rilascio continuo

In questo caso, non si ha più una δ , oppure un gradino, che si sposta lungo la via nel tempo, bensì si ha un rilascio continuo dalla sorgente, in cui ci sarà concentrazione costante nel tempo. Il fronte di concentrazione, invece, si sposta con celerità U_{st} lungo la via, dando luogo anche in questo caso a smorzamento, dovuto al trasferimento verticale.

Dal punto di vista matematico, per risolvere l'equazione (1.6), si esegue un cambio di coordinate, considerando un osservatore che si muove assieme al fronte, ovvero con velocità U_{st} :

$$\tau = t; \quad \xi = x - U_{st}t. \quad (1.20)$$

L'equazione differenziale (1.6) diventa la seguente:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{U_d}{H} C = 0. \quad (1.21)$$

La soluzione dell'equazione (1.21) è la seguente:

$$C(\tau, \xi) = C_0 e^{-\frac{U_d}{H}\tau}. \quad (1.22)$$

Effettuando nuovamente un cambio di coordinate, la soluzione dell'equazione (1.6) è:

$$C(t, x) = C_0 e^{-\frac{U_d}{H}t} \theta(x - U_{st}t). \quad (1.23)$$

Dunque, osservando l'equazione (1.23), scritta per un generico istante t , si ha, lungo la via, una concentrazione con andamento decrescente man mano che ci si allontana dalla sorgente.

Si considera lo stesso esempio della funzione gradino, con la differenza che ora la sorgente emette continuamente la sostanza tossica. Le caratteristiche della via sono le seguenti:

- Velocità longitudinale del vento $U_{st} = 3 \text{ m/s}$;
- Velocità di scambio verticale $U_d = 0.3 \text{ m/s}$;
- Altezza media della via $H = 10 \text{ m}$.

La posizione del fronte della sostanza tossica ad un generico istante t è la seguente:

$$x = U_{st} t. \quad (1.24)$$

In base all'equazione (1.24), per $t = 20$ secondi, la sostanza tossica si trova in $x = 60$ metri, mentre per $t = 40$ secondi, essa si trova in $x = 120$ metri e per $t = 60$ secondi, essa si trova nel punto di ascissa $x = 180$ metri. In Figura 1.1.1.9 si osserva il profilo di concentrazione in una via di lunghezza pari a 180 metri dopo 60 secondi dal rilascio della sostanza tossica, avvenuto in $x = 0$, ovvero all'inizio della via.

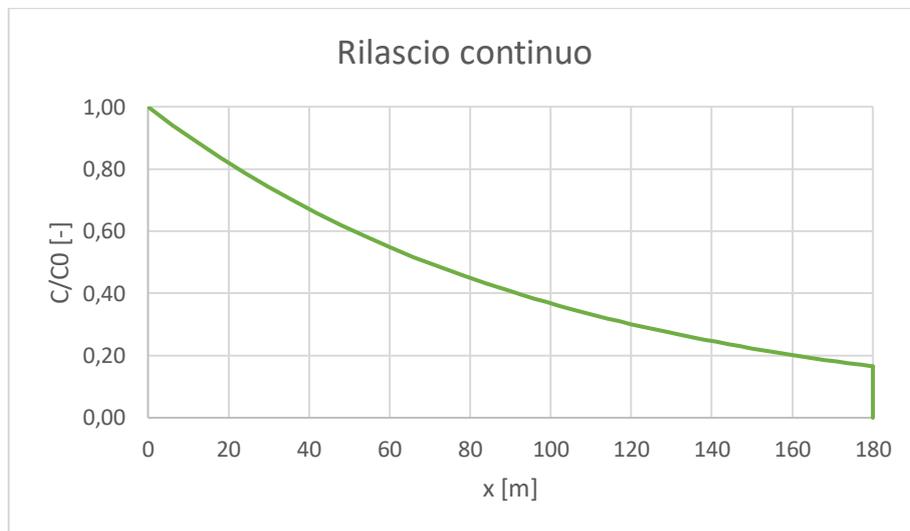


Figura 1.1.1.9 – Rilascio continuo, $t = 60 \text{ s}$

Si osserva che, nel caso di rilascio continuo, la concentrazione alla sorgente rimane costante, pari a C_0 , e col trascorrere del tempo la sostanza tossica riempie tutta la via, pur decrescendo in concentrazione allontanandosi dalla sorgente.

Concentrazione al termine della strada

Data la lunghezza L della via, si può calcolare il tempo che il fronte di concentrazione impiega per percorrerla tutta, mostrato nell'equazione (1.25):

$$T_{st} = \frac{L}{U_{st}}. \quad (1.25)$$

Dunque, che il rilascio alla sorgente sia continuo o istantaneo, la concentrazione al termine della via è data dall'equazione (1.26):

$$C_L \left(L, \frac{L}{U_{st}} \right) = C_0 e^{-\frac{U_d}{H} \frac{L}{U_{st}}} = C_0 e^{-\frac{1}{T_v} T_{st}}. \quad (1.26)$$

La concentrazione C_L può essere maggiore o minore di un valore soglia C_{th} , al di sotto del quale gli effetti del contagio sono trascurabili.

Se C_L è maggiore di C_{th} , vuol dire che tutta la via è stata contagiata; se invece C_L è minore di C_{th} , allora è stata contagiata solo una parte della via, di lunghezza:

$$L_{th} = -U_{st} T_v \log(C_{th}/C_0) < L \quad (1.27)$$

Si considera, come esempio, un rilascio continuo in due casi: ipotizzando gli stessi valori di U_{st} e di U_d , si assegna all'altezza media dello street canyon nel primo caso un valore $H = 10 \text{ m}$, nel secondo caso $H = 20 \text{ m}$.

Com'è intuibile, la concentrazione ad una generica ascissa x nel primo caso sarà minore che nel secondo: nel primo caso si ha un'altezza minore, quindi, per la sostanza tossica, è "più facile" abbandonare la via, mentre nel secondo caso essa permane più a lungo.

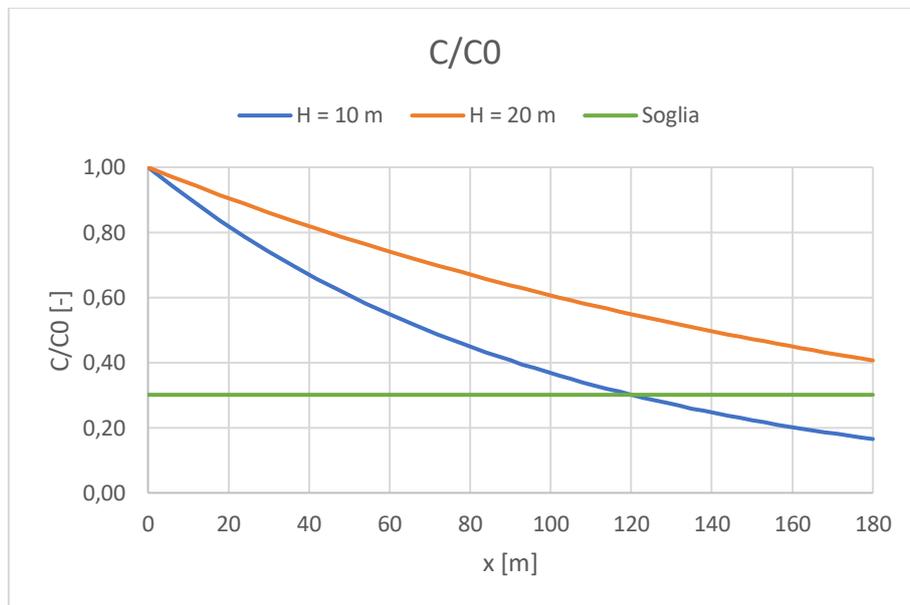


Figura 1.1.1.10 – Rilascio continuo, concentrazione alla fine della via in due casi: nel primo (linea blu), si hanno edifici più bassi, pertanto una concentrazione che decresce più rapidamente, mentre nel secondo (linea arancio) si hanno edifici più alti, pertanto una concentrazione che decresce più lentamente.

Come si può osservare in Figura 1.1.1.10, alla fine della via (in questo esempio lunga 180 metri), nel primo caso si ha una concentrazione inferiore alla soglia, pertanto non tutta la strada risulta contaminata ed è necessario calcolare la lunghezza L_{th} : su 180 metri, sono contaminati i primi 120 metri.

Nel secondo caso, invece, la concentrazione rimane sempre al di sopra della soglia, fino al termine della strada: in questo caso, tutta la via risulta contaminata.

1.1.2. PROPAGAZIONE NEGLI INCROCI

Una volta individuata la concentrazione al termine della via, se essa è superiore al valore di soglia, la sostanza tossica attraversa l'incrocio, propagandosi nelle altre vie a seconda della direzione del vento.

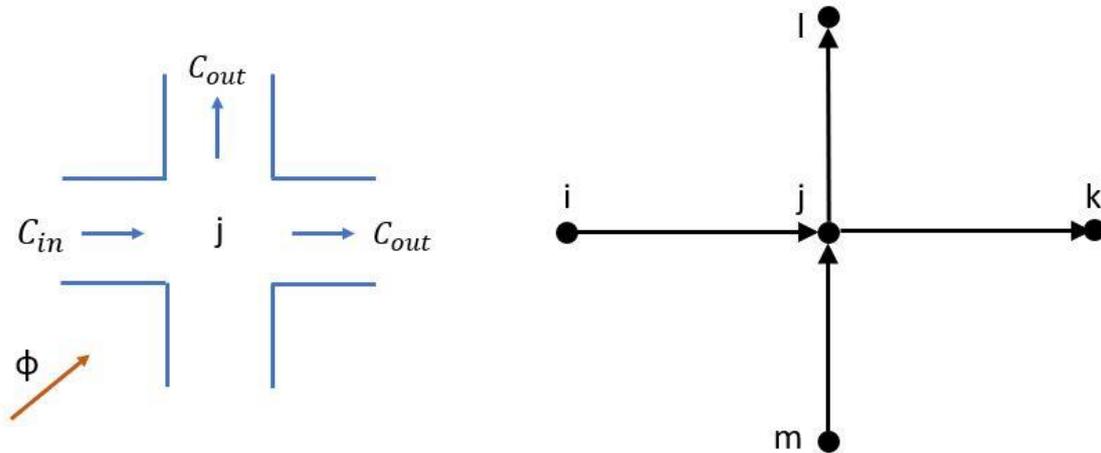


Figura 1.1.2.1 – Schematizzazione di un generico incrocio j

Si può schematizzare il reticolo urbano come una rete costituita da archi (le vie) e nodi (gli incroci). Si considera un generico nodo j , come si può osservare in Figura 1.1.2.1. Esso è il termine della via $i-j$, dalla quale si ipotizza che arrivi la sostanza tossica, con una concentrazione superiore al valore di soglia. La sostanza tossica si propaga verso le vie $j-l$ e $j-k$.

Il nodo ha un suo volume, prodotto tra l'area dell'incrocio e l'altezza media degli edifici che si affacciano su di esso, come mostrato nell'equazione (1.28):

$$v_j = A_j H_j. \quad (1.28)$$

La sostanza tossica, in generale, impiega un certo tempo per attraversare l'incrocio, dato dal rapporto tra la radice dell'area dell'incrocio e la velocità di percorrenza del nodo stesso:

$$t_j = \frac{\sqrt{A_j}}{U_j}. \quad (1.29)$$

Considerando che si vuole costruire un modello semplice, si ipotizza che il volume del nodo e il suo tempo di percorrenza siano molto più piccoli rispettivamente del volume della via in ingresso e del suo tempo di percorrenza:

$$v_j \ll v_{ij} = L_{ij} W_{ij} H_{ij}, \quad (1.30)$$

$$t_j \ll t_{ij}. \quad (1.31)$$

Queste due ipotesi implicano che il transito nel nodo viene considerato istantaneo e che la concentrazione della sostanza tossica, durante l'attraversamento del nodo, rimane costante, ovvero non si ha perdita di concentrazione verso l'atmosfera.

La sostanza tossica, uscendo dall'incrocio, si dirige verso le altre vie a seconda della direzione del vento: nel caso rappresentato in Figura 1.1.2.1, ad esempio, essa si dirige verso le vie $j-l$ e $j-k$. Per semplicità, la concentrazione iniziale nelle vie $j-l$ e $j-k$ è la stessa: in teoria, la nube tossica dovrebbe in qualche modo dividersi tra le due vie in uscita dall'incrocio, dunque con una concentrazione diversa da quella della via in ingresso, individuabile mediante bilancio di massa. Tuttavia, poiché si è interessati a costruire un modello semplice, si ignora il bilancio di massa e la concentrazione nelle vie in uscita dall'incrocio è la stessa. Questa è anche una ipotesi a favore di sicurezza, poiché la concentrazione non diminuisce, come si osserva in Figura 1.1.2.2.

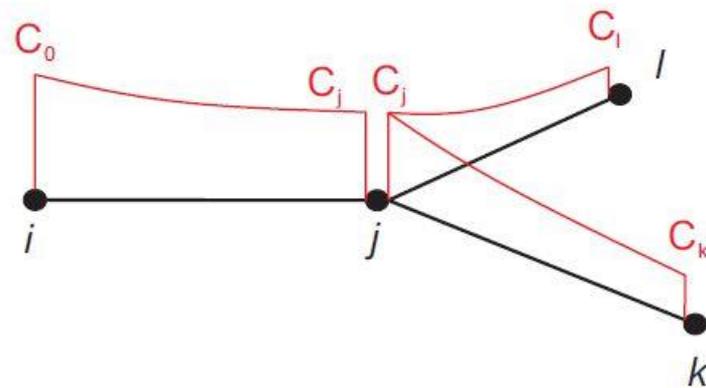


Figura 1.1.2.2 - Ripartizione della concentrazione nelle vie in uscita dall'incrocio

Dopo aver attraversato l'incrocio, la sostanza tossica si propaga nelle altre vie, come visto nel paragrafo 1.1.1. Questo processo continua fino a quando la concentrazione della sostanza tossica giunge al valore soglia C_{th} .

1.2. PROPAGAZIONE SU RETE

Il reticolo viario è assimilabile ad una rete complessa, costituita da nodi (incroci), collegati tra loro da archi (vie). Ogni arco porta con sé informazioni topologiche e fluidodinamiche della rete stessa.

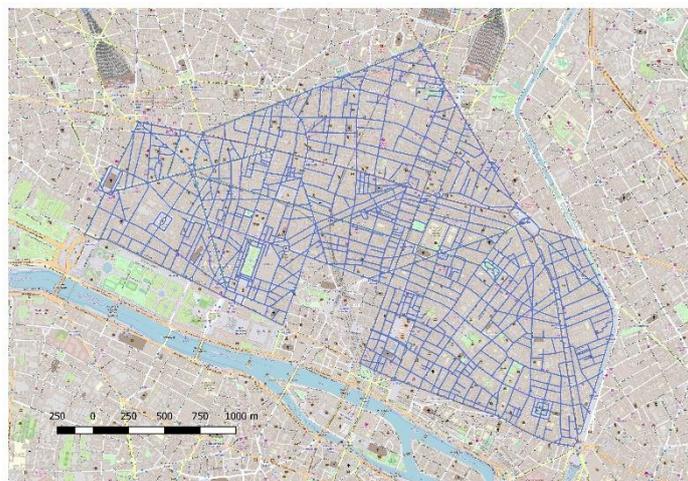


Figura 1.2.1 – Reticolo viario di parte del centro di Parigi

In Figura 1.2.1 si osserva un esempio di reticolo viario di parte del centro di Parigi, in cui sono ben visibili gli archi, che costituiscono le vie della città.

Ogni nodo è una potenziale sorgente di sostanza tossica, che si ipotizza venga rilasciata al livello stradale. Essa si propaga nella rete in base alla direzione del vento. L'insieme delle vie e dei nodi in cui la concentrazione di sostanza tossica rimane superiore al valore di soglia viene chiamato area di influenza del nodo sorgente; essa varia in base alla direzione del vento e al nodo sorgente.

1.2.1. COSTRUZIONE DELLA RETE

Si considera una rete complessa costituita da N nodi. Per definirla, si costruiscono delle matrici, che ne rappresentano le varie caratteristiche.

La topologia della rete è definita dalla matrice di adiacenza A , di dimensione $N \times N$. Ogni suo elemento è riferito ad un nodo e definisce se esiste o meno un collegamento con altri nodi: in caso positivo, esso vale 1, altrimenti vale 0.

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } \exists \text{ collegamento } i - j \\ 0, & \text{se } \nexists \text{ collegamento } i - j \end{cases} \quad (1.32)$$

Come esempio, si considera la rete in Figura 1.2.1.1, molto semplice, costituita da 4 nodi, collegati tra loro da archi (link) direzionati.

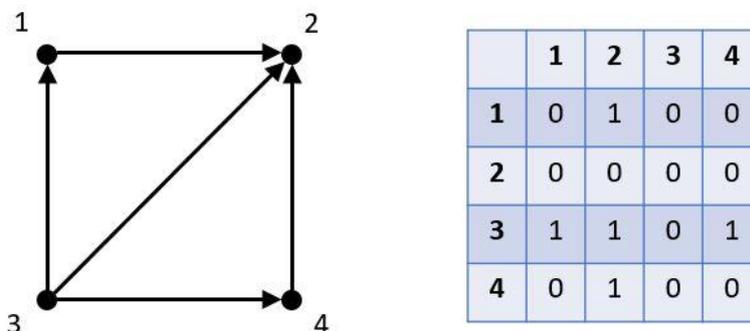


Figura 1.2.1.1 - Esempio di rete complessa e rispettiva matrice di adiacenza. In quest'ultima, la colonna a sinistra indica i nodi di partenza, la riga in alto i nodi di arrivo.

La matrice di adiacenza (vedi Figura 1.2.1.1) è dunque di dimensione 4×4 . Si osserva che il nodo 3 è un nodo di sole partenze e il nodo 2 è un nodo di soli arrivi. I nodi 1 e 4, invece, sono sia punti di arrivo, sia di partenza.

Ci sono poi le matrici H ed L , che definiscono la geometria degli archi: gli elementi generici H_{ij} e L_{ij} rappresentano rispettivamente l'altezza media e la lunghezza dell'arco (via) che collega i nodi i e j .

Le caratteristiche fluidodinamiche sono invece rappresentate dalle matrici U e T_v : gli elementi generici U_{ij} e $T_{v,ij}$ rappresentano rispettivamente la velocità U_{st} e il tempo di trasferimento verticale dell'arco che collega i nodi i e j .

Infine, c'è la matrice P , il cui elemento generico P_{ij} rappresenta la popolazione dell'arco che collega i nodi i e j . Tutte le matrici elencate hanno dimensione $N \times N$, essendo N il numero dei nodi della rete.

1.2.2. ALGORITMO DI PROPAGAZIONE

La sostanza tossica viene rilasciata a livello stradale in un incrocio, che corrisponde ad un nodo sorgente s . Le vie, rispetto a questo incrocio, possono avere verso entrante o uscente, a seconda della direzione del vento che soffia sulla città: essa, infatti, determina, in una via, la direzione della velocità U_{st} in ciascuna via.

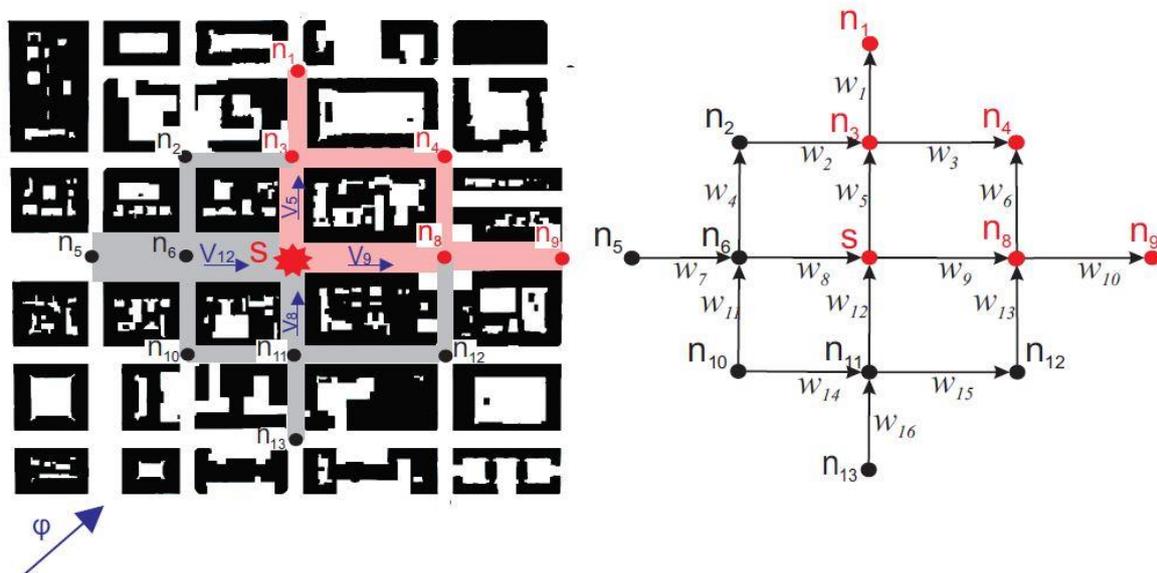


Figura 1.2.2.1 – Nodo sorgente; la freccia in basso a sinistra indica la direzione del vento, in base alla quale la sostanza tossica si sposta nel reticolo viario.

Dato il nodo sorgente s , le vie che escono da esso sono quelle in cui la sostanza tossica si propaga. Ad esempio, in Figura 1.2.2.1 si osserva in che modo essa si propaga: considerando che il vento soffia da sud-ovest, la propagazione avviene nelle vie verso nord e verso est rispetto al nodo sorgente.

Man mano che la sostanza tossica si propaga lungo le vie, la concentrazione diminuisce, poiché la rete è aperta superiormente e parte della sostanza abbandona la rete per spostarsi verso l'atmosfera soprastante.

La sostanza tossica raggiunge poi gli incroci successivi, ovvero i nodi primi vicini rispetto al nodo sorgente. A questo punto, se la concentrazione in questi nodi è superiore al valore di soglia, la propagazione continua nelle altre vie verso i nodi secondi vicini. Si itera questo procedimento finché la concentrazione rimane al di sopra del valore soglia.

La concentrazione nel nodo sorgente s è la concentrazione iniziale, infatti si ha:

$$C_s = C_0. \quad (1.33)$$

Si definiscono i nodi primi vicini del nodo s come nodi u , appartenenti all'insieme $N_1(s)$.

Dall'equazione (1.27), la distanza percorribile dalla sostanza tossica lungo un qualsiasi percorso tra il nodo sorgente e il generico nodo u primo vicino, scritta in forma matriciale, è la seguente:

$$W_{su} = -T_{su} U_{su} \log\left(\frac{C_{th}}{C_s}\right). \quad (1.34)$$

Nell'equazione (1.34), T_{su} è il tempo di trasferimento verticale, U_{su} è la U_{st} del tratto $s-u$ e C_{th} è la concentrazione soglia. Tuttavia, questa distanza può essere maggiore o minore della lunghezza del percorso $s-u$, ovvero L_{su} . Ciò che interessa è capire se tutta la via è contaminata oppure solo una parte di essa, per cui il percorso contaminato sarà:

$$D_{su} = \min(W_{su}, L_{su}). \quad (1.35)$$

Dunque, se $W_{su} \geq L_{su}$, tutta la via è contaminata e nel nodo u primo vicino si ha una concentrazione maggiore o uguale al valore soglia:

$$C_u = C_s e^{-\frac{1}{T_{su}} \frac{L_{su}}{U_{su}}}. \quad (1.36)$$

Se invece $W_{su} < L_{su}$, il percorso contaminato si limita a W_{su} e nel nodo primo vicino la concentrazione è minore della soglia, pertanto l'algoritmo, in questo percorso, si interrompe.

Se nel nodo primo vicino la concentrazione è superiore alla soglia, l'algoritmo procede, calcolando la concentrazione nelle vie che, dai nodi primi vicini, raggiungono i nodi secondi vicini, appartenenti all'insieme $N_2(s)$. L'iter viene ripetuto fino a quando la concentrazione scende sotto il valore di soglia in tutti i nodi. Si possono così sommare le lunghezze di tutti i percorsi contaminati a partire da s , i quali costituiscono la **zona di influenza** del nodo s .

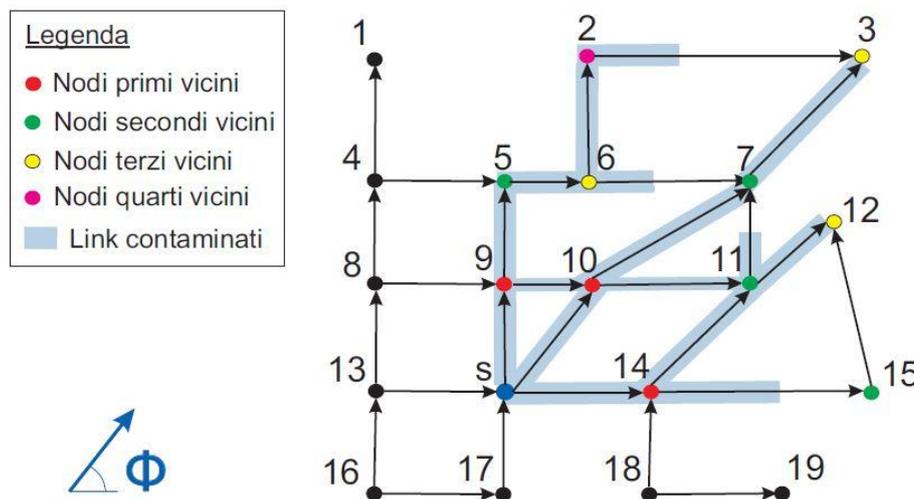


Figura 1.2.2.2 - Propagazione della sostanza tossica

In Figura 1.2.2.2 si osserva un esempio di propagazione a partire dal nodo sorgente s . Si osserva anche che, in alcuni nodi, la sostanza tossica giunge da vie diverse, quindi con concentrazioni diverse.

Un esempio di ciò è il nodo 10: in esso, la sostanza tossica giunge dal percorso $(s,9,10)$ e da $(s,10)$. Dunque, si considera ogni percorso indipendente, poi si sceglie, per il percorso $(10,7)$, il valore massimo di lunghezza contaminata:

$$D_{su} = \max[\min(W_{su}, L_{su}), D_{su}]. \quad (1.37)$$

In altre parole, si sceglie per il nodo 10 la concentrazione più alta tra quelle che giungono in questo nodo, in modo tale da avere, per la via successiva, ovvero la (10,7), il percorso contaminato più lungo.

La zona di influenza deve essere determinata per ogni nodo del reticolo, in modo da valutare qual è il peggiore, ovvero il nodo per il quale, rilasciando a partire da esso una sostanza tossica, si contagia un numero maggiore di persone.

1.3. VULNERABILITÀ

Una volta calcolata, per il nodo s e per una specifica direzione del vento φ , la zona di influenza, sono necessarie informazioni sul numero di abitanti delle vie contaminate, per poter calcolarne la vulnerabilità. I dati di popolazione non sempre sono disponibili, pertanto è necessario ricavarli mediante formule empiriche. Tra queste, se ne sceglie una in cui si ipotizza che la popolazione sia direttamente proporzionale alla lunghezza della via e all'altezza degli edifici che si affacciano su di essa. Per una generica via contaminata $i-j$, lunga L_{ij} , la popolazione può essere calcolata nel seguente modo:

$$P_{ij} = 2 n_F \frac{A_B}{A_P} = 2 \frac{H_{ij}}{H_F} \frac{L_{ij} W_B}{A_P}. \quad (1.38)$$

Nell'equazione (1.38) si ha:

- $n_F = \frac{H_{ij}}{H_F}$ è il numero di piani dell'edificio (ipotizzato essere lungo quanto la via e situato su un unico lato di essa), rapporto tra H_{ij} (altezza dell'edificio, corrispondente all'altezza media della via) e H_F (altezza del piano, posta pari a 3 metri);
- $A_B = L_{ij} W_B$ è l'area dell'edificio, prodotto tra la lunghezza L_{ij} della via e la larghezza W_B dell'edificio stesso, quest'ultima posta pari a 10 metri;
- A_P è l'area pro capite, ovvero metri quadri per ogni abitante, da calcolare, diversa per ogni città.

Dunque, il primo passo consiste nel calcolare A_P . Se sono disponibili dati di popolazione di un quartiere della città, tramite proporzione delle aree è possibile stimare la popolazione dell'area oggetto di studio, dopodiché si ricava A_P .

Ad esempio, se l'area di cui si conosce il numero di abitanti (inclusa in tutto o in parte nell'area di studio) è A_1 , popolata da P_1 abitanti, e l'area di studio è A_{tot} , nel seguente modo si ottiene la popolazione dell'area di studio P_{tot} :

$$P_{tot} = \frac{A_{tot}}{A_1} P_1. \quad (1.39)$$

A questo punto, considerando che la popolazione totale è la somma della popolazione di ogni via, si ottiene:

$$P_{tot} = \sum P_{ij} = \frac{2 W_B}{H_F A_P} \sum H_{ij} L_{ij} = \frac{C}{A_P} \sum H_{ij} L_{ij}, \quad \text{con } C = \frac{2 W_B}{H_F}. \quad (1.40)$$

Così, invertendo l'equazione (1.40), si ottiene A_P , che è l'unica incognita.

$$A_P = \frac{C}{P_{tot}} \sum H_{ij} L_{ij}. \quad (1.41)$$

Dunque, si può ora applicare l'equazione (1.38) per calcolare la popolazione in ogni singola via.

Si può calcolare anche la densità di popolazione di una generica via $i-j$, utile per capire quali quartieri sono più densamente popolati, quindi potenzialmente più vulnerabili:

$$dP_{ij} = \frac{P_{ij}}{L_{ij}}. \quad (1.42)$$

L'equazione (1.42) rappresenta il numero di abitanti per ogni metro di lunghezza della via $i-j$.

La vulnerabilità legata al nodo sorgente s può essere calcolata nel seguente modo:

$$V_s = \sum_{i,j} D_{ij} dP_{ij}. \quad (1.43)$$

Come si osserva nell'equazione (1.43), la vulnerabilità è la somma del prodotto tra la lunghezza di ogni via contaminata e la sua densità di popolazione. Restituisce come risultato il numero di persone contagiate.

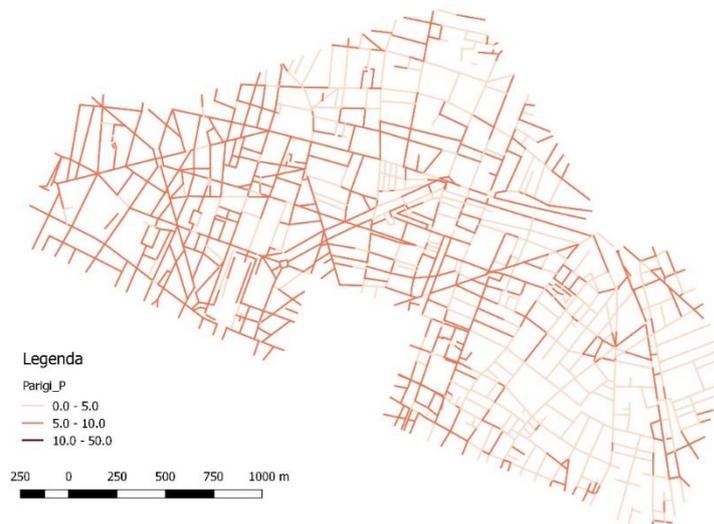


Figura 1.3.1 - Densità di popolazione di parte del centro di Parigi. I tratti più scuri indicano vie con densità maggiore, i tratti più chiari indicano vie con densità minore.

In Figura 1.3.1 si ha un esempio di mappa di densità di popolazione: si osserva che alcuni quartieri sono più densamente popolati di altri.

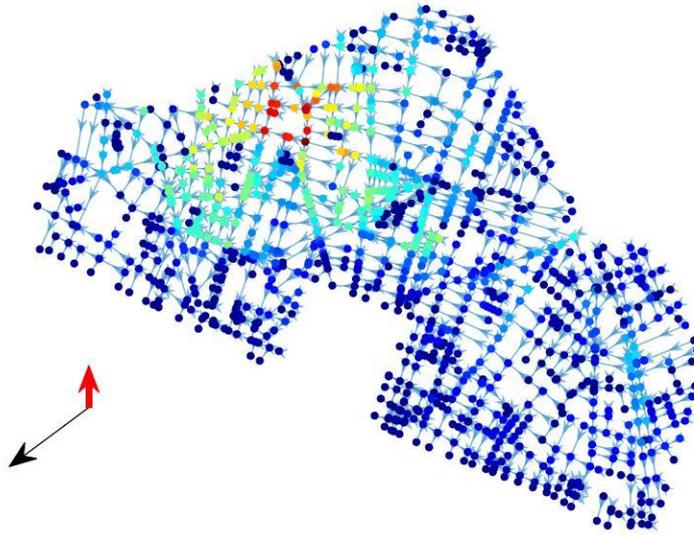


Figura 1.3.2 – Esempio di mappa di vulnerabilità di parte del centro di Parigi, nel caso in cui il vento soffia da nord-est, come si evince dalla freccia in basso a sinistra. I punti rossi indicano i nodi più vulnerabili, quelli blu i nodi meno vulnerabili.

Il calcolo della vulnerabilità deve essere effettuato per ogni nodo del reticolo viario e per ogni direzione del vento. In Figura 1.3.2 si osserva un esempio di mappa di vulnerabilità, realizzata per la direzione del vento $\varphi = 45^\circ$: i nodi in rosso sono quelli a partire dai quali si genera un danno maggiore, ovvero si ha un numero maggiore di persone a contatto con la sostanza tossica. Questa mappa varia a seconda della direzione del vento considerata. Si può tuttavia osservare che, laddove la densità di popolazione è maggiore, anche la vulnerabilità tendenzialmente aumenta.

2. STRUMENTI

In questo capitolo si introducono gli strumenti adoperati per lavorare sul reticolo viario delle città. Si descrive il concetto di rete complessa e come costruirla tramite un particolare tipo di file georeferenziati, detti “shapefile”. Si descrivono gli strumenti utilizzati per modificare gli shapefile e aggiungere ad essi nuove informazioni, come, ad esempio, la velocità del vento nelle vie, operazione svolta tramite il programma SIRANE. Si descrive infine il codice utilizzato per il calcolo della vulnerabilità.

2.1. STREET NETWORK

Una città è costituita da un elevato numero di edifici, ognuno dei quali ha una sua geometria, a volte molto complessa, e da spazi vuoti tra gli edifici, che costituiscono le vie, le piazze, gli incroci, i parchi, le linee ferroviarie, i corsi d’acqua ecc. In questi spazi vuoti si ipotizza che venga rilasciata una sostanza tossica, che col tempo si propaga.

Per studiarne la propagazione, si vuole utilizzare un modello semplice: gli spazi vuoti vengono visti come vie e, laddove esse sono interconnesse, come incroci. Si costruisce così un reticolo viario idealizzato, semplificato, costituito da archi (vie) e nodi (incroci). Si tratta di una **rete complessa**, ovvero una rete caratterizzata da una topologia non banale, con un elevatissimo numero di elementi, i quali sono tra loro interconnessi in diversi modi (Boccaletti, Latora, Moreno, Chavez, & Hwang, 2006).

Il modello costruito in questo modo semplifica di molto la realtà: infatti, nel modello non ci sono strade reali ed edifici reali, bensì entità matematiche corrispondenti agli archi della rete. Essi contengono le seguenti informazioni:

- **geometria** degli edifici (ovvero la loro altezza media) e della via che essi rappresentano (larghezza media, ovvero la distanza in quella via tra gli edifici, e lunghezza);
- **topologia** (urbanistica della città, ovvero in che direzione sono orientate le vie e le loro interconnessioni);
- **caratteristiche fluidodinamiche** (velocità media del vento in ogni via e velocità di scambio verticale).

In questa rete, ogni via è confinata inferiormente dalla strada e lateralmente dagli edifici, ma è aperta superiormente. Essa ha un’altezza media H , data dall’altezza media degli edifici che si affacciano su di essa, e da una larghezza media, W , data dalla distanza tra gli edifici. Se il rapporto tra altezza e larghezza è maggiore di $1/3$, si parla di street canyon:

$$\frac{H}{W} > \frac{1}{3} \rightarrow \textit{Street canyon}$$

Per costruire questo modello di rete complessa, si utilizzano degli **shapefile**, ovvero dei file di dati, costituiti da un certo numero di elementi, i quali sono georeferenziati, ovvero possono essere rappresentati in un certo sistema di riferimento. In questo caso specifico, gli elementi sono costituiti dagli archi della rete complessa, ovvero dalle vie.

Per tutte e tre le città esaminate, non si ha a disposizione uno shapefile con tutte queste informazioni, pertanto è necessario costruirlo a partire da due shapefile di partenza, uno costituito da polilinee, che rappresentano le strade, l'altro costituito da poligoni, che rappresentano gli edifici.

A partire da questi due shapefile, che contengono poche informazioni, se ne ricava uno solo, con tutti i dati per poter effettuare i successivi calcoli di velocità del vento (vedi paragrafo 2.2) e di vulnerabilità (vedi paragrafo 2.3).

2.1.1. SHAPEFILE DI PARTENZA

Si fa riferimento alla parte studiata della città di Parigi, ovvero parte del suo centro. Tutti gli shapefile della città di Parigi hanno come sistema di riferimento EPSG:2154, RGF93/Lambert93.

Il primo shapefile utilizzato è quello delle **polilinee**, i cui elementi rappresentano le vie oppure parti di esse. Ogni elemento ha un ID ed è georeferenziato, pertanto può essere rappresentato graficamente su una mappa mediante il software QGIS, come in Figura 2.1.1.1.

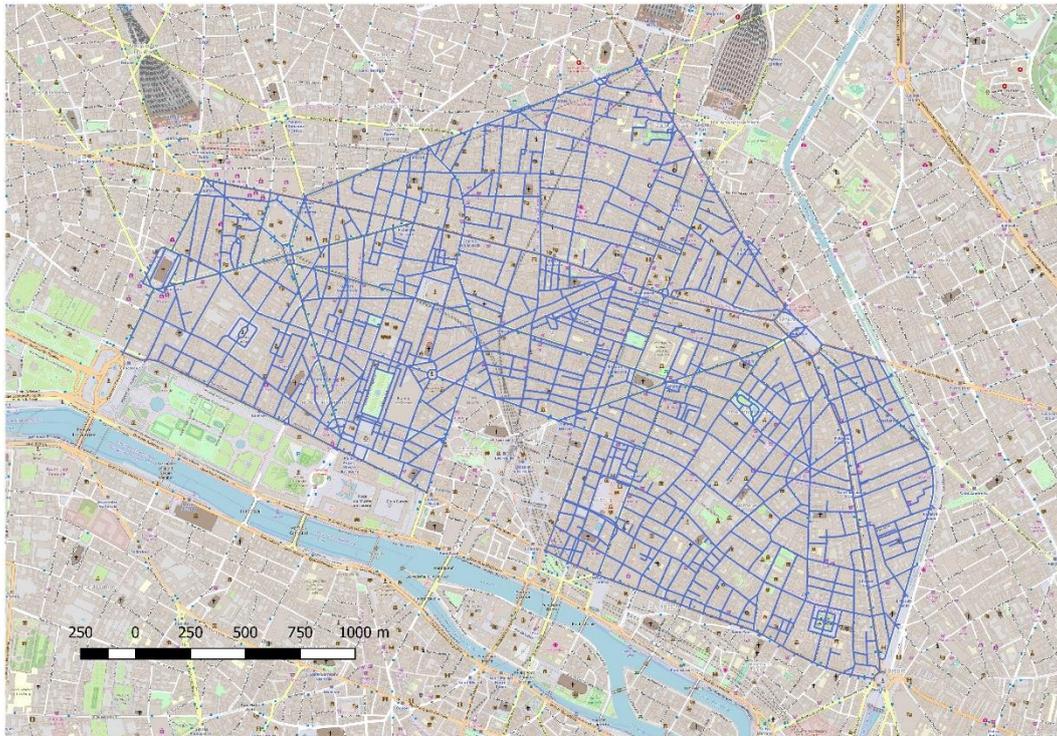


Figura 2.1.1.1 - Parigi centro, shapefile di polilinee

In questo shapefile, ancora non sono presenti informazioni geometriche sulla sezione di ogni via, né informazioni fluidodinamiche.

Il secondo shapefile utilizzato è quello che rappresenta gli **edifici** della parte considerata della città. Ogni elemento, dunque, rappresenta un edificio e porta con sé le seguenti informazioni:

- L'altezza media di ogni edificio ("HAUTEUR") rispetto al piano stradale, in metri;
- La quota minima ("Z_MIN") del piano stradale s.l.m. nell'area dell'edificio, in metri;
- La quota massima ("Z_MAX") del piano stradale s.l.m. nell'area dell'edificio, in metri.

Queste informazioni sono presenti sotto forma di campi nella tabella degli attributi dello shapefile, che può essere visualizzata portando lo shapefile su QGIS.

ID	PREC_PLANI	PREC_ALTI	ORIGIN_BAT	HAUTEUR	NATURE	Z_MIN	Z_MAX
BATIMENT000...	1.5	1.0	Autre	10		44.30	44.30
BATIMENT000...	1.5	1.0	Autre	11		44.70	45.90
BATIMENT000...	1.5	1.0	Autre	11		45.00	45.00

Figura 2.1.1.2 - Esempio di tabella degli attributi dello shapefile degli edifici

Nell'esempio di Figura 2.1.1.2, sono presenti anche altri campi, i quali tuttavia non sono necessari ai fini dell'analisi.

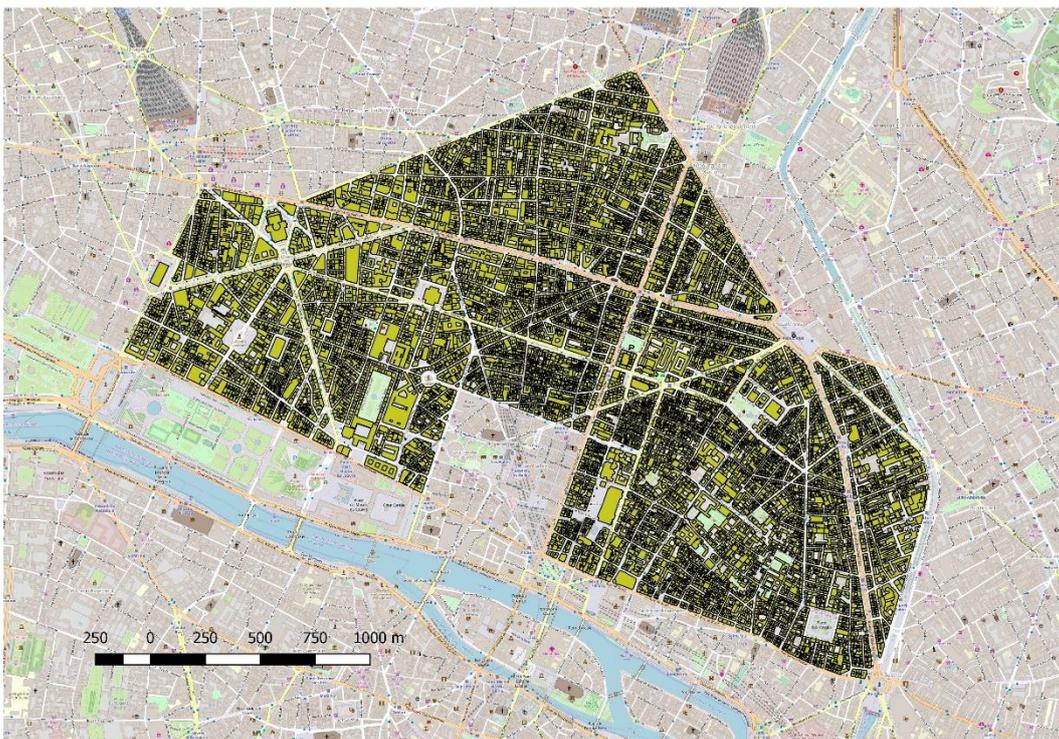


Figura 2.1.1.3 – Parigi centro, shapefile di edifici

In Figura 2.1.1.3 si osserva lo shapefile degli edifici, i quali sono rappresentati da poligoni georeferenziati. Questo shapefile, dunque, porta con sé informazioni geometriche. L'obiettivo è ora quello di costruire un ulteriore shapefile, costituito da segmenti, che contenga informazioni sulle vie e sugli edifici che si affacciano su di esse.

2.1.2. UTILITIES PER L'ELABORAZIONE DEL RETICOLO

Per ottenere un unico shapefile i cui elementi contengono informazioni di entrambi gli shapefile di partenza, si opera in due passi; il primo consiste nell'utilizzo della utility "**Simplifie_Graphe**", la quale, a partire dallo shapefile di polilinee, permette di ottenerne uno di segmenti. Quest'ultimo ha un numero diverso di elementi rispetto a quello di partenza, poiché la utility semplifica le geometrie delle vie, in molti casi rendendole più rettilinee laddove sono presenti delle curve. Tuttavia, non avvengono modifiche ai campi della tabella degli attributi: ancora non sono presenti informazioni geometriche.



Figura 2.1.2.1 - Schema di funzionamento di *Simplifie_Graphe*

In Figura 2.1.2.2 si può osservare la differenza tra lo shapefile di polilinee e quello di segmenti: le vie risultano semplificate, spesso diventano rettilinee se c'erano delle curve, talvolta con qualche deformazione, con una piccola variazione della direzione longitudinale della via interessata dalla modifica.

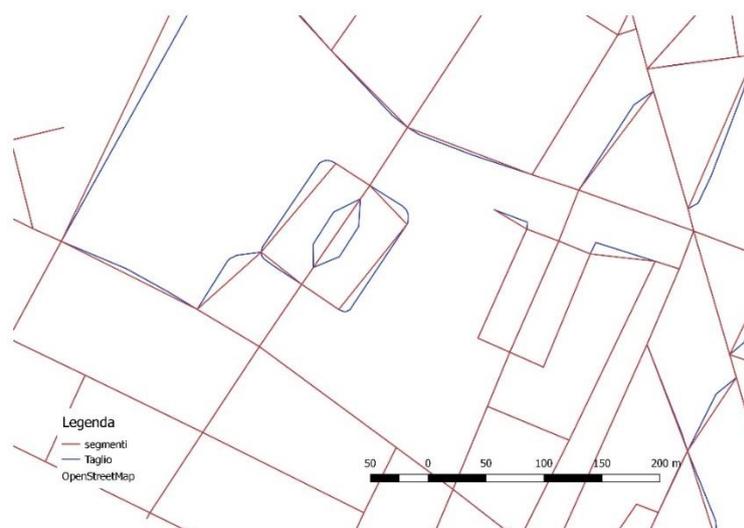


Figura 2.1.2.2 - Confronto tra shapefile di polilinee (in blu, più arrotondate) e di segmenti (in rosso, rettilinei, in quanto semplificano l'andamento delle vie).

Il secondo passo è quello di unire lo shapefile appena ottenuto di segmenti e quello degli edifici, utilizzando la utility "**Prog-HW**". Si ottiene così un nuovo shapefile di segmenti, in cui ogni elemento contiene anche informazioni geometriche su larghezza e altezza delle vie, ricavate tramite lo shapefile degli edifici.

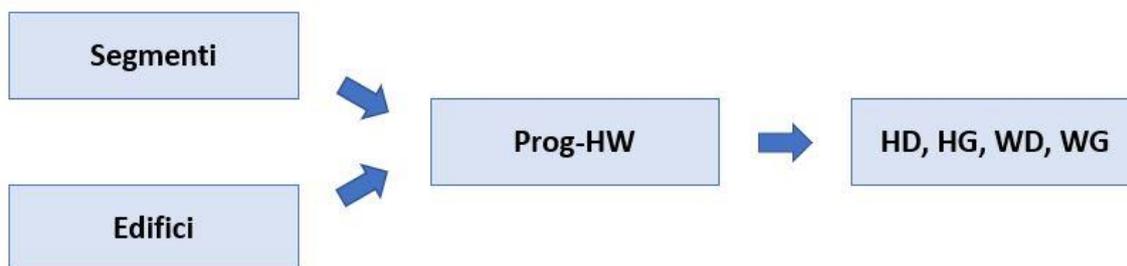


Figura 2.1.2.3 - Schema di funzionamento di Prog-HW

Come si osserva in Figura 2.1.2.4, nella tabella degli attributi compaiono nuovi campi, tra i quali sono importanti i seguenti:

- HG, altezza media sinistra della via;
- HD, altezza media destra della via;
- H, altezza media della via, ottenuta mediando HG e HD;
- WG, larghezza sinistra della via rispetto al suo asse longitudinale;
- WD, larghezza destra della via;
- W, larghezza della via, ottenuta sommando WG e WD.

Di questi campi, sono importanti soprattutto HG, HD, WG, WD, i quali vengono utilizzati da SIRANE per calcolare la velocità del vento in ogni via (vedi paragrafo 2.2).

H	HD	HG	W	WD	WG
12.50	25.00	0.00	22.46	22.46	0.00
17.00	17.00	17.00	15.74	9.73	6.01
22.83	25.00	20.65	0.07	-4.04	4.11

Figura 2.1.2.4 - Parte della tabella attributi dell'output di Prog-HW

Lo shapefile così ottenuto, tuttavia, deve essere modificato: non devono essere presenti campi di altezze e/o di larghezze negativi o nulli, inverosimili per degli street canyon, per non avere errori nelle elaborazioni successive (si vedrà che SIRANE non accetta valori negativi o nulli).

Pertanto, è opportuno osservare, con l'aiuto di Google Maps e di Street View, gli elementi dello shapefile, per capire che tipo di elementi ha valori negativi o nulli. Tra questi, ce ne sono alcuni appartenenti a piazze, parchi, giardini o grandi viali che delimitano il contorno del dominio: trattandosi di ampi spazi aperti, rappresentati da più elementi, può capitare che alcuni di essi abbiano altezza nulla, il che è ragionevole. Essi verranno pertanto eliminati.

Sono tuttavia presenti alcuni errori, ovvero elementi rappresentanti delle vie con altezza e/o larghezza negativi o nulli. Essi vanno corretti, inserendo un valore ragionevole del campo corrispondente. Ad esempio, se un elemento riporta altezza destra nulla, ma in realtà sono presenti degli edifici, si può inserire il valore dell'altezza degli edifici del lato sinistro.



Rue Cambon



Rue de Nancy

Figura 2.1.2.5 - Esempi di vie di Parigi con campi errati, successivamente modificati

In Figura 2.1.2.5 sono presenti due esempi, relativi alla città di Parigi, in cui era errato il valore di larghezza destra o sinistra: esso è stato posto successivamente pari a 0,1 metri, ovvero un valore positivo poco maggiore di zero, ipotizzando così che la larghezza di un lato rappresenti tutta la via.

A questo punto, dallo shapefile output di Prog-HW, dopo aver modificato gli elementi con valori errati dei campi, si eliminano tutti gli elementi con altezze e/o larghezze negative o nulle. Il nuovo shapefile ha dunque meno elementi, ma nessuno di essi è negativo o nullo.

Si può osservare lo shapefile modificato in Figura 2.1.2.6, in cui risulta evidente la mancanza delle vie che delimitano il contorno dell'area oggetto di studio: esse, infatti, hanno altezza o destra o sinistra nulla, poiché gli edifici al di fuori del contorno non sono stati presi in esame.

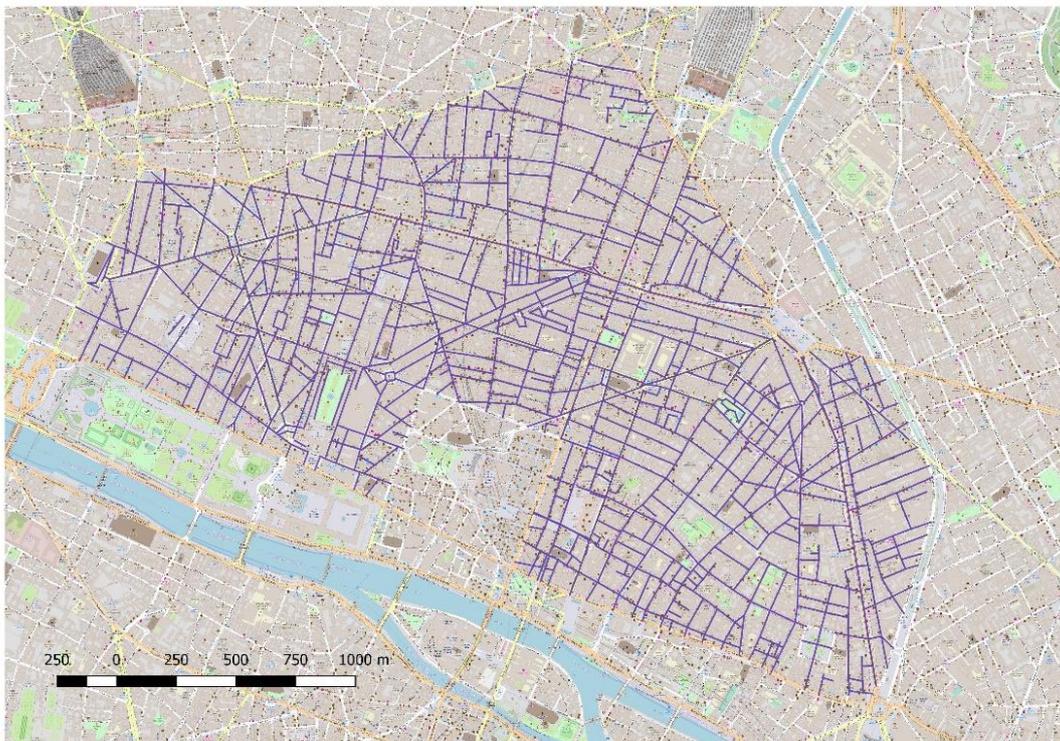


Figura 2.1.2.6 - Shapefile output di Prog-HW modificato

2.2. CALCOLO DELLA VELOCITÀ DEL VENTO NELLE VIE

La velocità del vento nelle vie di una città può essere ricavata in diversi modi. In questa tesi, si è scelto di usare **SIRANE**, un modello di dispersione atmosferica, il cui fine è quello di monitorare la qualità dell'aria nelle città. È stato sviluppato per oltre 15 anni dal gruppo AIR ("Atmosphere, Impact and Risk") del Laboratorio di Meccanica dei Fluidi ed Acustica dell'Ecole Centrale de Lyon.

SIRANE può essere utilizzato per ricavare le concentrazioni di sostanze tossiche presenti nel reticolo viario di una città, a partire da monitoraggi e da dati meteo (Soulhac L. , Salizzoni, Cierco, & Perkins, 2011).

In questo caso specifico, ciò che si vuole ricavare tramite SIRANE è solo la **velocità del vento nelle vie U_{st}** , a partire dai dati meteo, dalla geometria e dalla posizione geografica del reticolo viario della città presa in esame: la concentrazione della sostanza tossica e la vulnerabilità della città verranno calcolate in un secondo momento e dipenderanno anche dalla U_{st} ricavata tramite SIRANE (vedi paragrafo 2.3).

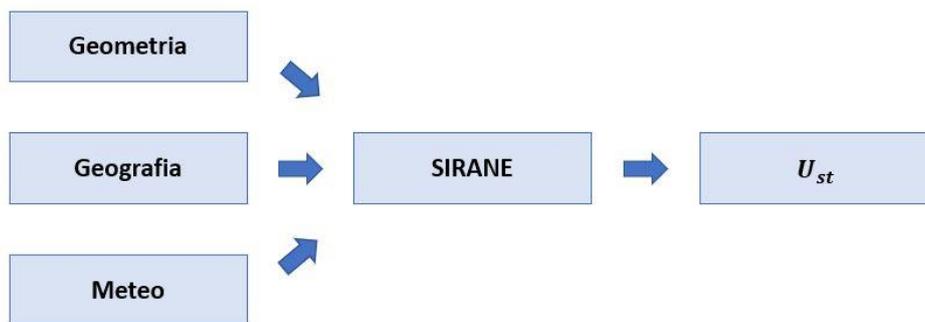


Figura 2.2.1 - Schema di funzionamento di SIRANE

Alla base del funzionamento di SIRANE ci sono le seguenti ipotesi:

- Il flusso d'aria nella singola via ha una componente advettiva longitudinale e una componente di ricircolo in direzione trasversale; la velocità media che si ottiene in direzione longitudinale, U_{st} , è funzione della velocità e della direzione del vento atmosferici (U , φ), dalle caratteristiche geometriche della via (H/W) e dalla scabrezza delle pareti degli edifici.
- La concentrazione di sostanze inquinanti nelle vie è ottenuta per via numerica tramite equazioni di bilancio di massa, le quali tengono conto delle sorgenti di inquinamento, della ripartizione della massa di inquinante nelle diverse vie che entrano o escono da un incrocio e dallo scambio con l'atmosfera soprastante.
- Nelle intersezioni si tiene conto sia del flusso orizzontale, sia di quello verticale.
- Il profilo di velocità del vento nelle vie segue la legge di Monin-Obukhov (vedi paragrafo 1.1).
- Si tiene conto anche del trasporto di inquinanti al di sopra dei tetti degli edifici, quindi al di fuori del reticolo, poiché queste sostanze possono rientrare nel reticolo stesso.

Tuttavia, le ipotesi relative al bilancio di massa e alla concentrazione di inquinanti non sono rilevanti ai fini di questo studio, in quanto l'unico obiettivo che si vuole raggiungere utilizzando SIRANE è ricavare la velocità U_{st} : si adottano infatti, per il calcolo della concentrazione di inquinanti, ulteriori ipotesi semplificative, per rendere meno oneroso il calcolo della vulnerabilità (vedi paragrafo 2.3).

Si presentano di seguito gli input e gli output di SIRANE.

2.2.1. INPUT DI SIRANE

Tutti i file di input sono contenuti in un'unica cartella di input. Come esempio, si riporta la cartella relativa alla città di Parigi.



Figura 2.2.1.1 - Cartella di input di SIRANE

In Figura 2.2.1.1 si osserva che la cartella di input è costituita da numerose sottocartelle e da un file di testo che le richiama tutte. Si riporta ora il contenuto delle sottocartelle.

- **BATIMENTS:** questa cartella dovrebbe contenere dei file relativi alle altimetrie nel reticolo viario della città, utili al più per fini grafici.
- **COLORMAPS:** questa cartella contiene dei file utili per rappresentare graficamente la distribuzione sul reticolo viario delle concentrazioni di sostanze inquinanti. In questo caso non interessano le concentrazioni, ma solo le velocità del vento.
- **EMISSIONS:** questa cartella è costituita a sua volta da altre sottocartelle, le quali contengono file relativi alle emissioni di sostanze inquinanti puntuali, lineari e superficiali. Anche se in questo caso non interessano le emissioni, è bene che i file siano coerenti con la geografia del reticolo viario, dato che sono richieste le coordinate geografiche; le emissioni verranno ovviamente poste pari a zero.
- **ESPECES:** questa cartella contiene informazioni sulla chimica delle sostanze inquinanti.
- **FOND:** questa cartella contiene informazioni sulle concentrazioni di fondo delle sostanze inquinanti, istante per istante.
- **GRILLES:** questa cartella contiene le griglie geografiche all'interno delle quali è presente il reticolo viario studiato, pertanto le coordinate devono essere corrette, nel sistema di riferimento considerato (ad esempio, per Parigi, il sistema di riferimento corretto è Lambert93). Esse sono riferite alle emissioni superficiali, ai dati meteo e agli output.
- **METEO:** questa cartella contiene informazioni, istante per istante, sui dati meteo; ai fini di questa analisi, in cui ciò che si vuole ottenere è la velocità del vento nelle vie U_{st} , i dati meteo

importanti sono due: la velocità U del vento atmosferico (ovvero sopra i palazzi) e la direzione φ del vento.

- **RECEPTEURS**: questa cartella indica quali sono i punti in cui sono state monitorate le concentrazioni di inquinanti. Essa contiene dei file di testo: i file che mostrano, istante per istante, le concentrazioni in un determinato punto della città e un file finale che li richiama.
- **RESEAU**: questa cartella contiene gli shapefile del reticolo viario oggetto di indagine e un file di testo che contiene informazioni geografiche come, ad esempio, la latitudine della città studiata. Lo shapefile deve essere inserito nel sistema di riferimento corretto.
- **STATISTIQUES**: questa cartella contiene due file di testo relativi ad alcune statistiche delle sostanze inquinanti.
- **Donnees.dat**: questo file di testo richiama tutte le cartelle viste pocanzi e serve per far partire SIRANE.

Per ulteriori dettagli sui dati di input utilizzati in questa analisi, si veda l'Appendice.

2.2.2. OUTPUT DI SIRANE

Sempre facendo riferimento alla città di Parigi, in Figura 2.2.2.1 si riporta la cartella di output, nella quale appaiono delle sottocartelle e dei nuovi shapefile.

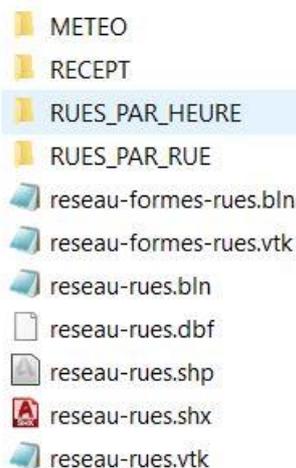


Figura 2.2.2.1 - Cartella di output di SIRANE

I nuovi shapefile contengono lo stesso reticolo viario degli shapefile di input, ma hanno un ID leggermente modificato (questa volta il primo elemento ha ID pari a zero, non a uno). Di seguito si riporta il contenuto delle cartelle:

- **METEO**: essa contiene i dati meteo utilizzati, tra cui U e φ .
- **RECEPT**: essa contiene dei file di testo relativi alle concentrazioni di inquinanti in un certo punto della città nel giorno e nelle ore considerate (dati specificati negli input): le concentrazioni sono nulle, come era immaginabile, dato che anche i valori iniziali erano nulli.

- **RUES_PAR_HEURE**: è la cartella interessante ai fini di questa analisi, in quanto contiene dei file di testo, relativi al giorno e alle ore considerate, in cui, per ogni elemento, sono riportati diversi valori, tra cui la **velocità del vento** in quell'elemento U_{st} , che è il valore di interesse.
- **RUES_PAR_RUE**: essa è vuota.

A questo punto, si può inserire, tramite l'ausilio di QGIS, nella tabella degli attributi dello shapefile di output, un nuovo campo (chiamato U_{st}), per poter visualizzare graficamente la distribuzione spaziale delle velocità del vento nelle vie, i cui valori sono ricavati dalla cartella "RUES_PAR_HEURE".

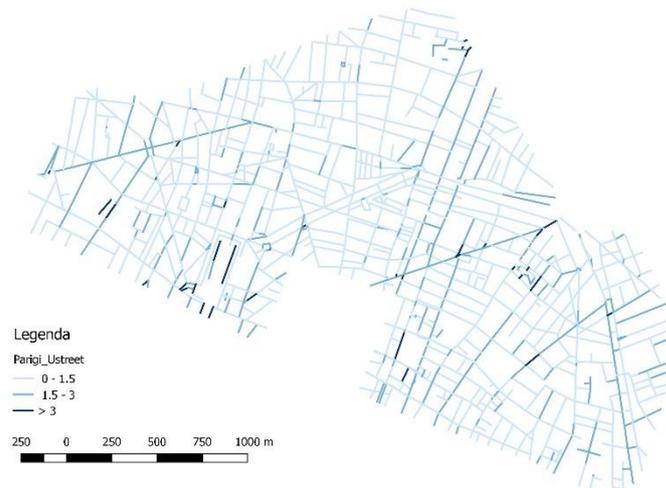


Figura 2.2.2.2 - Parigi, U_{st} nel caso in cui $U = 5\text{ m/s}$ e $\varphi = 45^\circ$

In Figura 2.2.2.2 si può osservare la distribuzione della velocità del vento U_{st} nella parte di Parigi studiata, nel caso in cui la velocità del vento al di sopra degli edifici è $U = 5\text{ m/s}$ e la sua direzione è $\varphi = 45^\circ$.

2.3. CODICE PER IL CALCOLO DELLA VULNERABILITÀ

Una volta ottenuto, tramite SIRANE, il valore della velocità del vento in ogni via U_{st} , si procede con i successivi calcoli della densità di popolazione in ogni via e della vulnerabilità del reticolo associata a un nodo sorgente. Per fare ciò, i calcoli sono stati effettuati mediante l'utilizzo del software MatLab.

Partendo dallo shapefile output di SIRANE, si calcola, per ogni elemento, la velocità di trasferimento verticale U_d , la quale è funzione del rapporto tra altezza e larghezza della via (H/W), come mostrato nell'equazione (1.2).

Conoscendo, per ogni elemento, i valori H ed L , si può facilmente calcolare la popolazione e la densità di popolazione in ognuno di essi, come mostrato nell'equazione (1.38).

A questo punto, si sceglie un nodo del reticolo (ovvero un incrocio) e si ipotizza che a partire da esso venga rilasciata la sostanza tossica. In base alla direzione del vento U_{st} in ogni via (fornita da

SIRANE), si decide quali vie sono entranti nel nodo e quali uscenti da esso: la sostanza tossica, dunque, si propaga attraverso le vie uscenti dal nodo sorgente, come mostrato nel paragrafo 1.2.2.

Si sceglie un valore per il rapporto tra concentrazione nel nodo sorgente C_0 e la concentrazione soglia C_{th} (al di sotto della quale si ipotizza che non ci siano effetti nocivi per la salute umana): si calcola così la zona di influenza del nodo sorgente, ovvero la somma di tutti i percorsi per cui $C_0/C_{th} > 1$.

Nota la densità di popolazione in ogni via, si calcola così la vulnerabilità legata al nodo sorgente, ovvero il numero di persone contagiate, tramite l'equazione (1.43).

Questo procedimento viene ripetuto per tutti gli altri nodi del reticolo, calcolando la vulnerabilità del reticolo associata ad ognuno di essi. Si può così costruire una mappa di vulnerabilità, ovvero una mappa in cui a ogni nodo è associato un colore diverso a seconda del valore di vulnerabilità che si ottiene rilasciando a partire da esso una sostanza tossica.

La mappa così ottenuta è relativa ad una specifica direzione del vento: è dunque possibile costruirne altre relative a diverse direzioni del vento e capire quale direzione comporta un danno maggiore.

3. RISULTATI

In questo capitolo si espone l'analisi effettuata per le città prese in esame: Parigi, New York, Firenze. In tutti i casi, sono state analizzate le caratteristiche geometriche del reticolo viario, è stata poi calcolata la velocità del vento nelle diverse vie (e la loro distribuzione spaziale) e infine si è calcolata la vulnerabilità del reticolo stesso.

3.1. PARIGI

Parigi, capitale della Francia, è una delle più popolate città d'Europa e una delle più importanti al mondo dal punto di vista economico, finanziario e culturale. Essa è stata infatti abitata da importanti pensatori e custodisce opere d'arte di inestimabile valore, che l'hanno resa un punto di riferimento di tutto il mondo occidentale.

L'attuale urbanistica del centro cittadino si è sviluppata nel corso degli ultimi secoli, ma è nel XIX secolo che essa ha assunto una forma molto ben definita. Infatti, nella seconda metà dell'Ottocento, è stato effettuato un imponente piano di ristrutturazione della città, diretto da **Georges-Eugène Haussmann** (Parigi, 1809 – Parigi, 1891), amministratore e uomo politico, per incarico di Napoleone III ("Haussmann, Georges-Eugène", enciclopedia Treccani). In quel periodo storico sono stati costruiti i grandi viali rettilinei, i "boulevards", spesso demolendo le precedenti costruzioni.



Figura 3.1.1 - Parigi, boulevard Haussmann, vista in direzione longitudinale e dettaglio di una facciata

In Figura 3.1.1 si può osservare un boulevard, strada molto ampia sulla quale si affacciano edifici molto simili tra loro, sia per estetica, sia per altezza: essi hanno un'altezza in genere inferiore ai dieci piani. Le immagini sono prese dalla funzione Street View di Google Maps.

La zona della città oggetto di studio è parte del centro cittadino, sulla "rive droite", ed è racchiusa interamente da ampi viali. Essa comprende al suo interno edifici importanti come il Palais Royal, l'Opera Garnier e il Centre Pompidou, mentre, tra le piazze importanti, si citano Place Vendome e

Place des Vosges. Questa zona, tuttavia, non comprende punti di interesse come, ad esempio, il museo del Louvre: esso si trova immediatamente a sud della zona esaminata, ma non è stato preso in esame in quanto presenta, davanti al suo ingresso, un'ampia piazza e dei giardini, luoghi che, per la loro geometria, permettono facilmente alle sostanze tossiche il trasferimento verso l'atmosfera soprastante, risultando così poco interessanti per questa analisi.

3.1.1. GEOMETRIA DEL RETICOLO VIARIO

Le informazioni sul reticolo viario della parte studiata della città sono ricavate da due shapefile: quello delle strade (costituito da polilinee) e quello degli edifici (costituito da poligoni). Tutti gli shapefile utilizzati per Parigi hanno come sistema di riferimento EPSG:2154, RGF93/Lambert93 e la loro rappresentazione grafica è stata effettuata tramite il software QGIS.

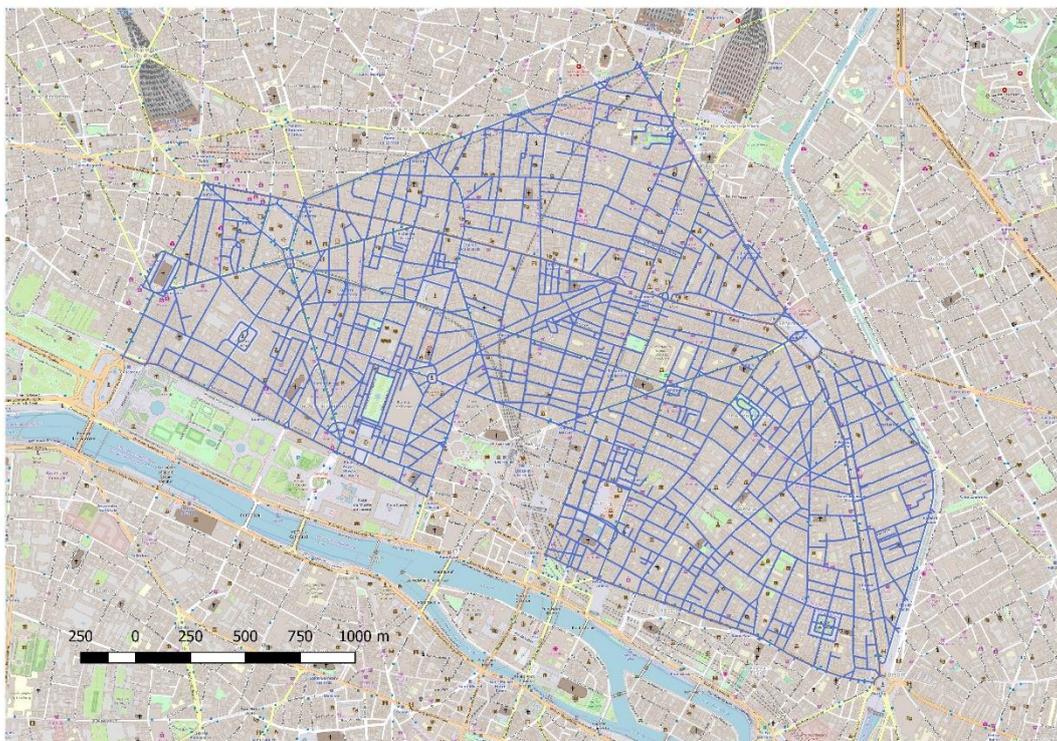


Figura 3.1.1.1 - Parigi, shapefile di polilinee

In Figura 3.1.1.1 si osserva lo shapefile di polilinee sovrapposto alla mappa. Esso contiene 2147 elementi, ognuno dei quali è riferito ad una via o ad una parte di essa. A ogni elemento è associato un nome (ID).

In Figura 3.1.1.2 si osserva il secondo shapefile di partenza, che rappresenta gli edifici e porta con sé le informazioni geometriche sul reticolo viario. Esso è costituito da 10785 elementi, ognuno dei quali ha forma poligonale.

A partire da questi due shapefile, tramite le utilities, se ne ricava uno nuovo, costituito da segmenti, ognuno dei quali porta con sé le informazioni dei due shapefile di partenza (vedi 2.1.2).

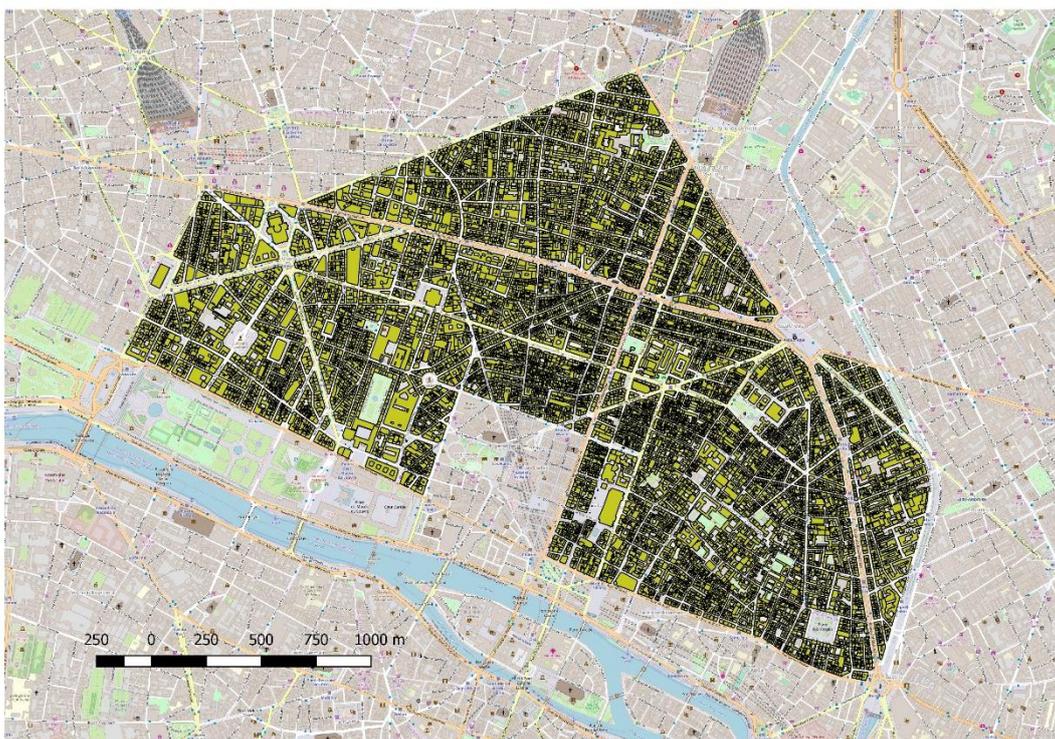


Figura 3.1.1.2 - Parigi, shapefile di edifici

Lo shapefile così ottenuto ha 2211 elementi e, tra le informazioni che contiene, ci sono HD, HG, WD e WG, ovvero, nell'ordine, altezza destra e sinistra, larghezza destra e sinistra di ogni elemento. Questo shapefile viene ulteriormente modificato, poiché, per poter essere utilizzato tra gli input di SIRANE, deve avere i suddetti campi positivi.

Tabella 3.1.1.1 - Elementi con campi negativi o nulli

	= 0		< 0		≤ 0	
	n° elem	%	n° elem	%	n° elem	%
HD	133	6.7	-	-	133	6.7
HG	188	9.5	-	-	188	9.5
WD	121	6.1	37	1.9	158	8.0
WG	169	8.6	38	1.9	207	10.5

In Tabella 3.1.1.1 si può osservare il numero di elementi con campi negativi o nulli. Di questi, alcuni devono essere modificati (ad esempio, se il valore del campo è errato), dopodiché si eliminano tutti gli elementi rimanenti con almeno uno dei suddetti campi negativi o nulli (vedi paragrafo 2.1.2).

In questo modo, lo shapefile che si ottiene dopo la modifica ha 1599 elementi. Esso è visibile in Figura 3.1.1.3: si nota la mancanza delle vie periferiche del dominio preso in esame: ciò accade perché non sono stati considerati gli edifici al di fuori del dominio, pertanto l'altezza del lato esterno delle vie periferiche risulta nulla, per cui questi elementi non sono stati considerati. Inoltre, sono assenti alcuni elementi facenti parte di piazze, parchi e gallerie.

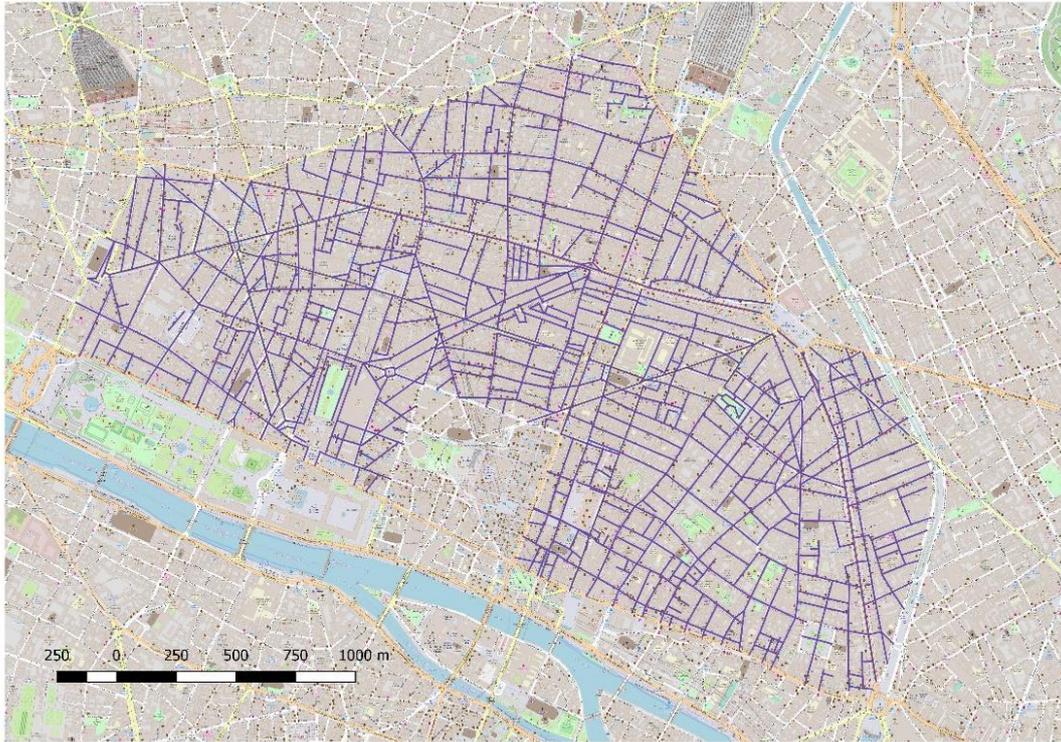
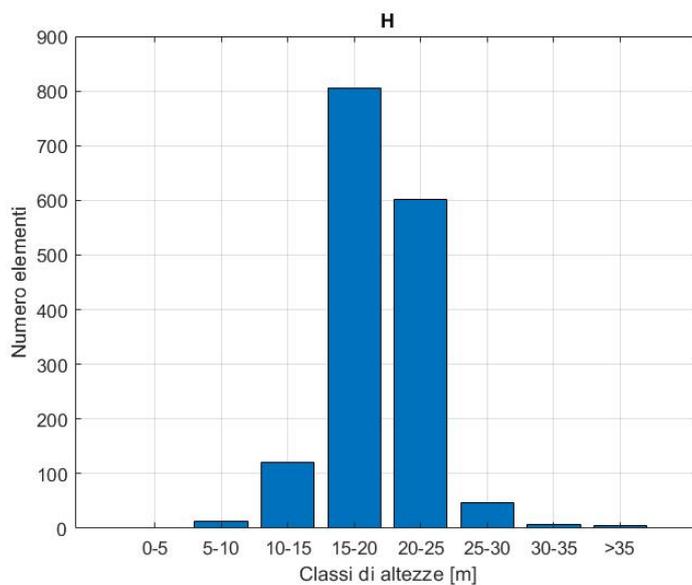


Figura 3.1.1.3 - Parigi, shape-file modificato

Si riportano ora gli istogrammi relativi ai campi H (altezze), W (larghezze) e H/W (rapporto tra altezza e larghezza) degli elementi dello shapefile modificato.

Altezze H degli street canyon

Nell'istogramma di Figura 3.1.1.4 sono riportati in ascissa le classi di altezze in metri, in ordinata il numero di elementi appartenenti ad ogni classe; in tabella è riportato il numero esatto di elementi.



H [m]	n° elem
0-5	0
5-10	12
10-15	121
15-20	806
20-25	602
25-30	46
30-35	7
>35	5

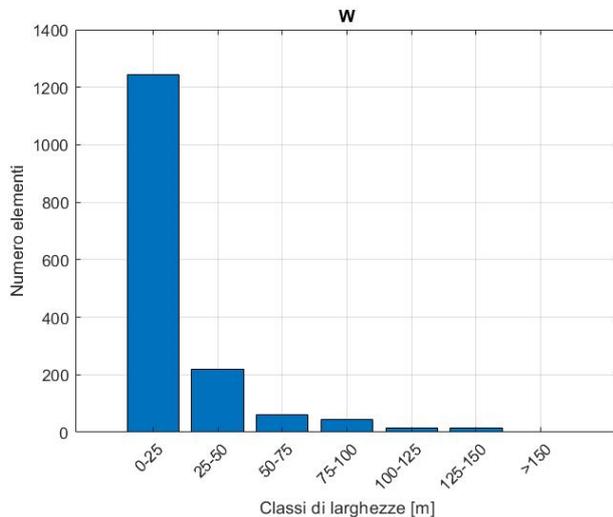
Figura 3.1.1.4 - Iistogramma e tabella delle classi di altezze H

La classe di altezze più rappresentata è l'intervallo 15 – 20 metri: sono circa 800 (su 1599) le vie i cui palazzi hanno un'altezza media che ricade in questo intervallo (circa il 50%).

Sono praticamente assenti edifici alti.

Larghezze W degli street canyon

Nell'istogramma di Figura 3.1.1.5 sono riportati in ascissa le classi di larghezze in metri, in ordinata il numero di elementi appartenenti ad ogni classe, in tabella è riportato il numero esatto di elementi.



W [m]	n° elem
0-25	1245
25-50	218
50-75	60
75-100	43
100-125	15
125-150	15
>150	3

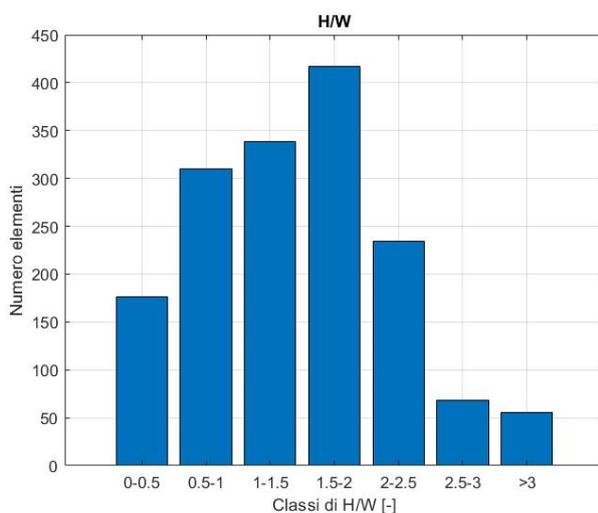
Figura 3.1.1.5 - Iistogramma e tabella delle classi di larghezze W

Si osserva che la classe di larghezze più rappresentata è l'intervallo 0 - 25 m: fanno parte di questa classe circa 1200 elementi (su 1599), ovvero circa il 78%.

Gli elementi con alti valori di larghezze, in realtà sono parte di piazze.

Rapporto H/W tra altezza e larghezza degli street canyon

Nell'istogramma di Figura 3.1.1.6 sono riportati in ascissa le classi di H/W [-], in ordinata il numero di elementi appartenenti ad ogni classe, in tabella è riportato il numero esatto di elementi.



H/W [-]	n° elem
0-0.5	176
0.5-1	310
1-1.5	338
1.5-2	417
2-2.5	234
2.5-3	68
>3	56

Figura 3.1.1.6 - Iistogramma e tabella delle classi di H/W

Questo rapporto è molto più significativo dei singoli valori di altezza e larghezza: se, ad esempio, la via ha un alto valore di H/W vuol dire che essa è molto più alta che larga, pertanto le sostanze

tossiche ivi presenti impiegheranno più tempo ad abbandonarla, mantenendo alta la loro concentrazione. Al contrario, un basso rapporto H/W favorisce una rapida diminuzione della concentrazione.

La classe del rapporto H/W più rappresentata è l'intervallo 1.5 – 2, di cui fanno parte circa 400 elementi (su 1599), ovvero circa il 26%. La classe di H/W > 3 è invece poco rappresentata: ne fanno parte poco più di 50 elementi, ovvero appena il 3.5%. Ciò è dovuto al fatto che a Parigi, anche nel centro cittadino, ci sono molti grandi viali, i "boulevard", sui quali si affacciano edifici non eccessivamente alti. Le vie molto strette (che, a parità di altezza, fanno aumentare il rapporto H/W) non sono numerose, pertanto gli "street-canyon" (ovvero le vie con H/W>3) sono relativamente pochi.

È ora interessante notare la distribuzione spaziale degli elementi appartenenti alle diverse classi di H/W, per capire dove sono localizzati gli street-canyon e gli elementi con H/W più basso.



Figura 3.1.1.7 - Distribuzione spaziale delle classi di H/W

In Figura 3.1.1.7 è riportato lo shapefile con elementi di colore diverso a seconda del rapporto H/W: più scuro per valori alti, più chiaro per valori bassi.

Si osserva che gli elementi con alto valore di H/W non sono molti e non sono concentrati in un punto preciso della città: dato che è stata esaminata solo una parte del centro, essa è abbastanza omogenea dal punto di vista di H/W. Si riconoscono inoltre i viali più importanti dal colore più chiaro e si nota che questi ultimi elementi non sono pochi.

3.1.2. VELOCITÀ DEL VENTO NELLE VIE

Ai fini di questo studio, si vogliono ricavare le velocità del vento nelle vie U_{st} tramite SIRANE, a partire dai dati geometrici (contenuti nello shapefile) del reticolo viario, dai dati geografici (griglie, nel sistema di riferimento Lambert93, che contengono il reticolo viario al loro interno) e dai dati meteo (velocità U e direzione φ del vento atmosferico, ovvero quello che soffia sulla città, al di sopra degli edifici).

Per quanto riguarda i **dati meteo**, sono stati considerati i seguenti 8 casi:

- Velocità del vento 5 m/s, direzione 45° (nord est – sud ovest)
- Velocità del vento 5 m/s, direzione 90° (est – ovest)
- Velocità del vento 5 m/s, direzione 135° (sud est – nord ovest)
- Velocità del vento 5 m/s, direzione 180° (sud – nord)
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 45°
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 90°
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 135°
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 180°

I casi in cui la direzione del vento è di 225, 270, 315 e 360 gradi danno gli stessi risultati dei casi in cui si ha direzione del vento rispettivamente di 45, 90, 135 e 180 gradi.

ISTOGRAMMI DELLE CLASSI DI VELOCITA'

Si considerano, nel caso di velocità del vento pari a **5 m/s**, tre classi di velocità del vento nelle vie:

- 0 – 1,5 m/s
- 1,5 – 3 m/s
- >3 m/s

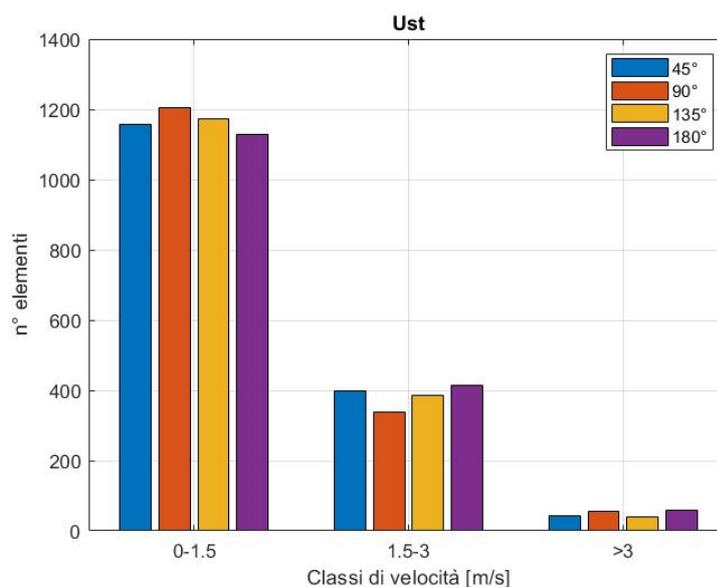


Figura 3.1.2.1 - Classi di U_{st} , per $U = 5$ m/s

In Figura 3.1.2.1 è riportato l'istogramma in cui si ha in ascissa le classi di velocità del vento nelle vie e in ordinata il numero di elementi (vie) per ogni classe e per ogni direzione del vento.

Si osserva che la classe di velocità del vento nelle vie più rappresentata è l'intervallo 0 – 1.5 m/s: dunque, nella maggior parte delle vie, la velocità del vento è molto inferiore alla velocità del vento che soffia sulla città, in questo caso 5 m/s.

In Tabella 3.1.2.1 si osservano i valori esatti del numero di elementi per ogni classe.

Tabella 3.1.2.1 - Classi di U_{st} , per $U = 5$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-1.5	1156	1205	1173	1128
1.5-3	399	338	385	413
>3	44	56	41	58

Al variare della direzione del vento, varia il numero di elementi appartenenti ad ogni classe di velocità. In particolare, si nota che la direzione nord – sud (180°) è quella per la quale ci sono più elementi con “alte” velocità del vento (classe >3 m/s) e meno elementi con velocità del vento più basse (0 – 1.5 m/s) rispetto alle altre direzioni.

Si possono osservare in Tabella 3.1.2.2 le percentuali di elementi appartenenti ad ogni classe, ricordando che in totale gli elementi (vie o tratti di esse) sono 1599.

Tabella 3.1.2.2 - Percentuali classi di U_{st} , per $U = 5$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-1.5	72.3	75.4	73.4	70.5
1.5-3	25.0	21.1	24.1	25.8
>3	2.8	3.5	2.6	3.6

Osservando gli ordini di grandezza, si nota che oltre il 70% di elementi è caratterizzato da basse velocità del vento (0 – 1.5 m/s), mentre le velocità intermedie caratterizzano circa il 20 – 25% degli elementi e infine quelle “alte”, ovvero velocità di poco superiori a 3 m/s, riguardano circa il 3% degli elementi. Le differenze di percentuali tra le diverse direzioni del vento sono molto piccole.

Si riportano in Tabella 3.1.2.3 le velocità massime del vento nelle vie a seconda della direzione del vento.

Tabella 3.1.2.3 - U_{st} max, per $U = 5$ m/s

	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
Ust max	3.47	3.47	3.48	3.44

In ogni caso, la velocità del vento nelle vie è sempre inferiore a quella del vento che soffia sulla città. Inoltre, si osserva che le velocità massime riguardano solo una piccola percentuale di elementi,

come visto nelle tabelle precedenti: dunque, nelle vie, la velocità del vento è molto più bassa di quella del vento che soffia sulla città.

Si considerano, nel caso di velocità del vento pari a **10 m/s**, quattro classi di U_{st} :

- 0 – 2 m/s
- 2 – 4 m/s
- 4 – 6 m/s
- >6 m/s

In Figura 3.1.2.2 è riportato l'istogramma in cui si ha in ascissa le classi di velocità del vento nelle vie e in ordinata il numero di elementi (vie) per ogni classe e per ogni direzione del vento.

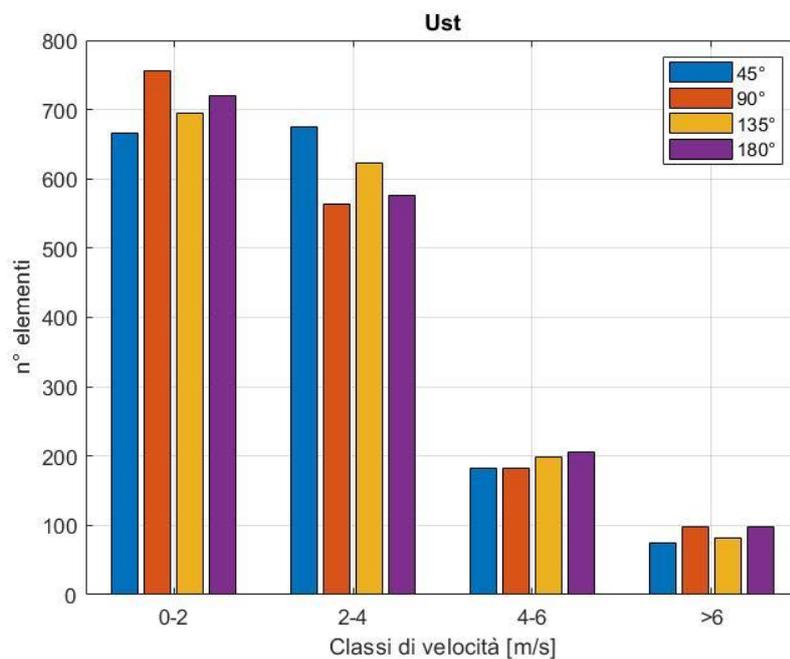


Figura 3.1.2.2 - Classi di U_{st} per $U = 10$ m/s

Si osserva che la classe di velocità del vento nelle vie più rappresentata è l'intervallo 0 – 2 m/s, ovvero la classe di velocità più basse. Solo pochi elementi sono caratterizzati da velocità più "alte", ovvero poco più di 6 m/s, velocità comunque più bassa rispetto a quella del vento che soffia sulla città (in questo caso, 10 m/s).

In Tabella 3.1.2.4 si osservano i valori esatti del numero di elementi per ogni classe.

Tabella 3.1.2.4 - classi di U_{st} per $U = 10$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-2	666	756	695	720
2-4	675	563	623	576
4-6	183	182	199	205
>6	75	98	82	98

Al variare della direzione del vento, varia il numero di elementi appartenenti ad ogni classe di velocità. In particolare, si nota che, per le direzioni nord – sud (180°) ed est – ovest (90°), ci sono più elementi nelle classi estreme (velocità basse e alte) rispetto alle altre due direzioni.

Si possono osservare in Tabella 3.1.2.5 le percentuali di elementi appartenenti ad ogni classe, ricordando che in totale gli elementi (vie o tratti di esse) sono 1599.

Tabella 3.1.2.5 - Percentuali classi di U_{st} , per $U = 10$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-2	41.7	47.3	43.5	45.0
2-4	42.2	35.2	39.0	36.0
4-6	11.4	11.4	12.4	12.8
>6	4.7	6.1	5.1	6.1

Osservando gli ordini di grandezza, si nota che le prime due classi di velocità sono più rappresentate delle altre due, con percentuali tra il 40 e il 45% per la prima classe (0 – 2 m/s) e tra 35 e 45% per la seconda (2 – 4 m/s). La terza classe (velocità del vento tra 4 e 6 m/s) è meno rappresentata, con una percentuale di circa il 12%, mentre l'ultima, ovvero le velocità più alte, ha circa il 5 – 6% degli elementi. Nonostante le differenze tra le direzioni del vento, in tutti i casi si ha lo stesso andamento approssimativamente decrescente del numero di elementi all'aumentare della velocità del vento nelle vie.

Si riportano in Tabella 3.1.2.6 le velocità massime del vento nelle vie a seconda della direzione del vento.

Tabella 3.1.2.6 - U_{st} max, per $U = 10$ m/s

	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
Ust max	7.40	7.41	7.44	7.34

Anche in questo caso, la velocità massima del vento nelle vie, in ogni direzione, rimane inferiore a quella del vento che soffia sulla città (10 m/s). Dunque, nelle vie della parte della città presa in esame, la velocità del vento è di molto inferiore a 10 m/s, dato che le classi di velocità più rappresentate sono quelle "basse".

DISTRIBUZIONE DELLA VELOCITA' NELLO SPAZIO

Di seguito è riportato il reticolo viario della parte di Parigi analizzata, in cui ogni via è colorata in modo diverso a seconda della velocità del vento che la percorre. Con i colori più scuri sono rappresentate velocità maggiori, con i colori più chiari velocità minori.

Si considerano gli 8 casi visti in precedenza, ovvero due diverse velocità del vento che soffia sulla città (5 e 10 m/s) e quattro direzioni del vento (45, 90, 135, 180 gradi).

In Figura 3.1.2.3, Figura 3.1.2.4, Figura 3.1.2.5 e Figura 3.1.2.6 si osserva la distribuzione di U_{st} per $U = 5$ m/s.

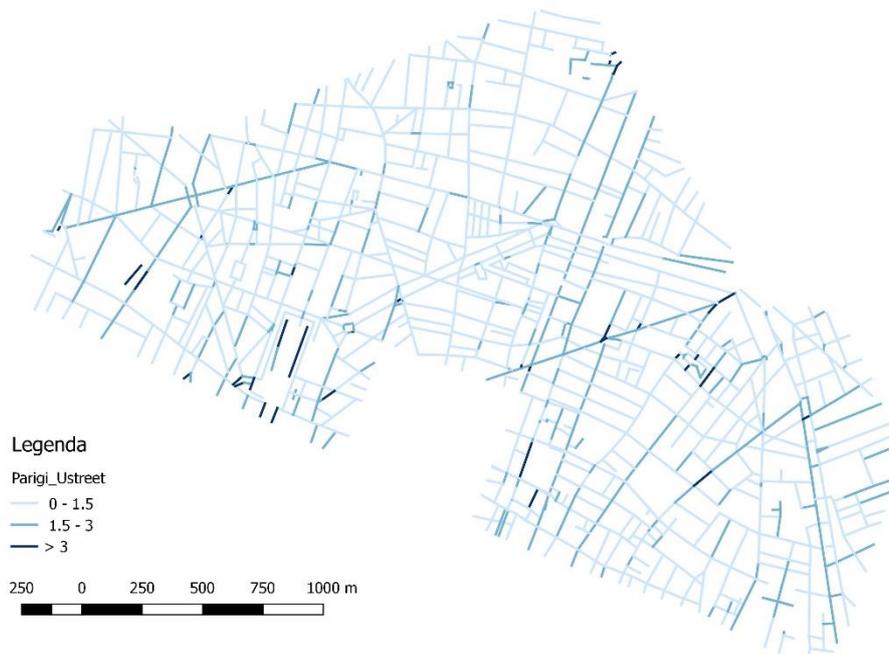


Figura 3.1.2.3 - U_{st} , per $U = 5 \text{ m/s}$, $\varphi = 45^\circ$

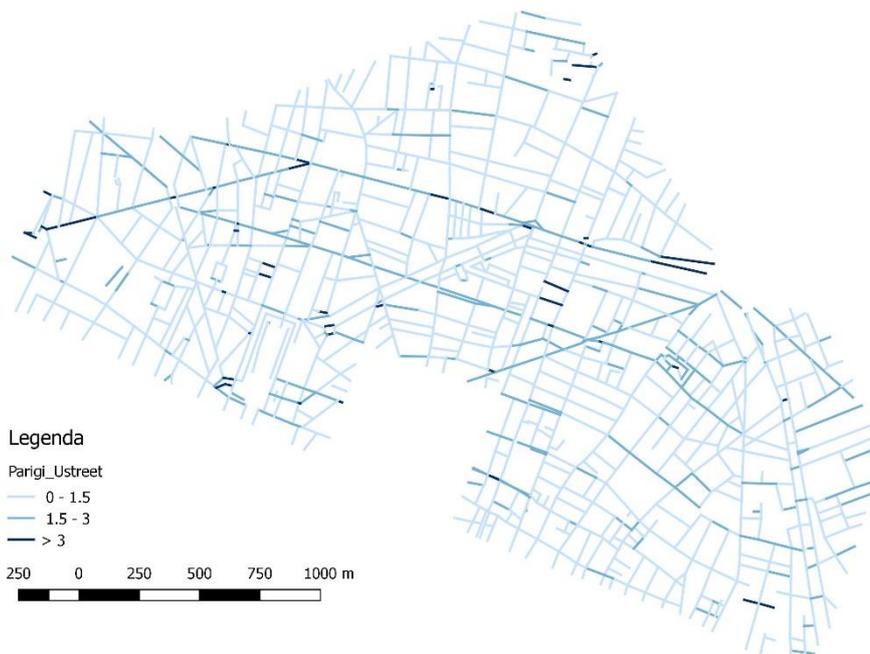


Figura 3.1.2.4 - U_{st} , per $U = 5 \text{ m/s}$, $\varphi = 90^\circ$



Figura 3.1.2.5 - U_{st} , per $U = 5 \text{ m/s}$, $\varphi = 135^\circ$

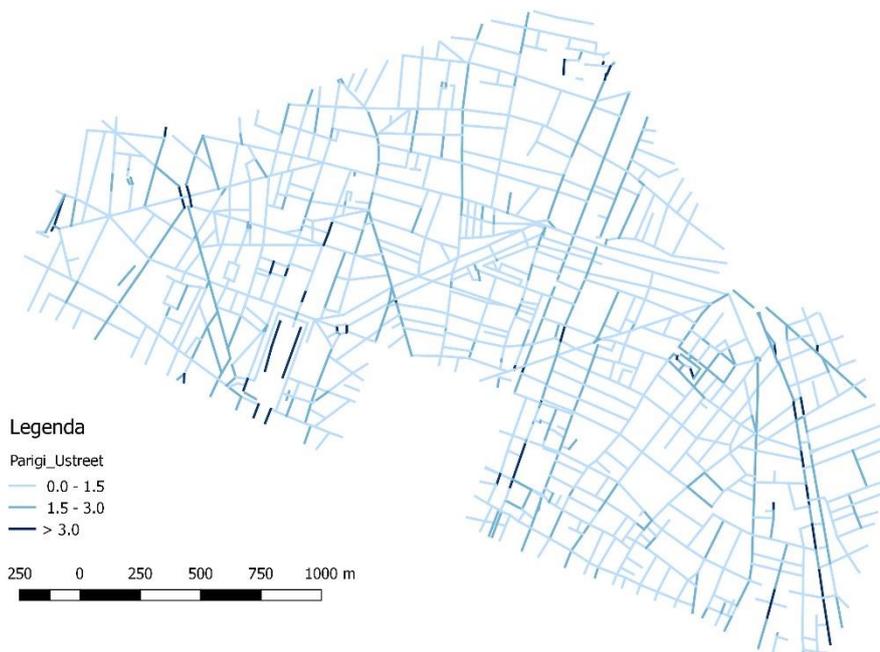


Figura 3.1.2.6 - U_{st} , per $U = 5 \text{ m/s}$, $\varphi = 180^\circ$

Si osserva che la velocità U_{st} è bassa nella maggior parte dei casi, compresa tra 0 e 1.5 m/s, quindi molto inferiore alla velocità U al di sopra degli edifici (5 m/s). Inoltre, gli elementi caratterizzati da U_{st} maggiore sono, a parità di direzione del vento, le vie con un più basso rapporto H/W (viali più

larghi). Al variare della direzione del vento, variano gli elementi con U_{st} maggiore: essi sono quelli orientati all'incirca come la direzione del vento.

In Figura 3.1.2.7, Figura 3.1.2.8, Figura 3.1.2.9 e Figura 3.1.2.10 si osserva la distribuzione di U_{st} per $U=10$ m/s.

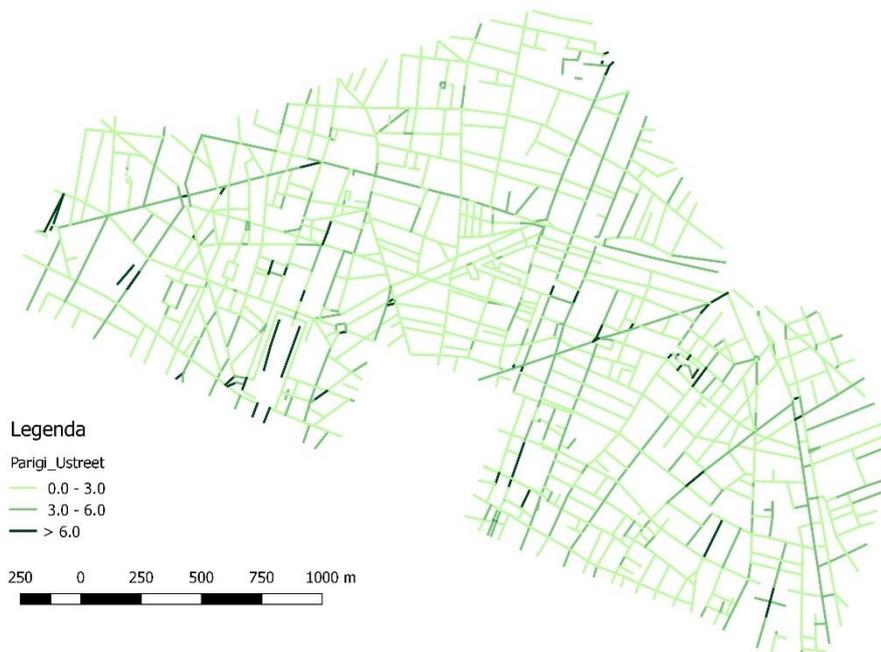


Figura 3.1.2.7 - U_{st} , per $U = 10$ m/s, $\varphi = 45^\circ$

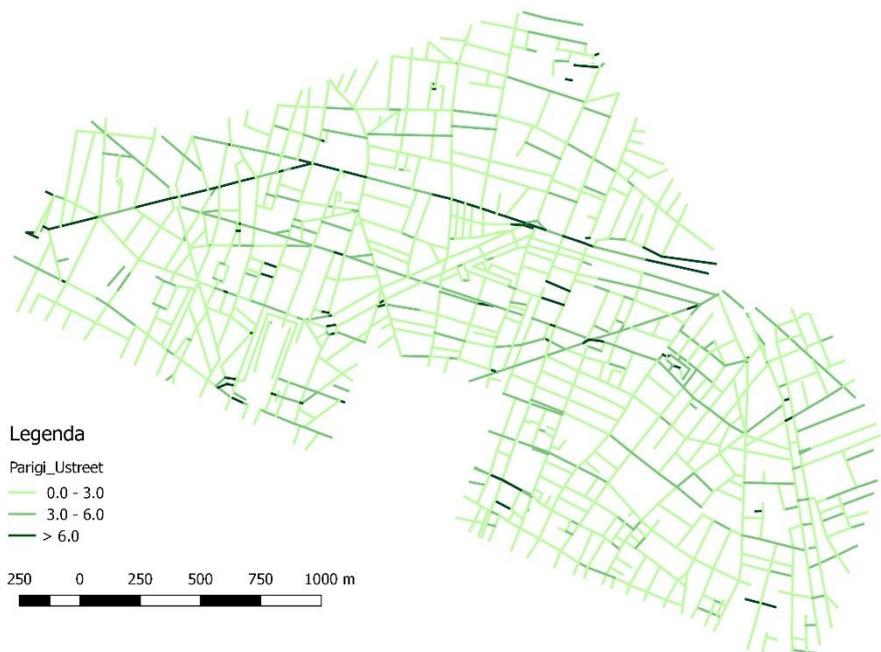


Figura 3.1.2.8 - U_{st} , per $U = 10$ m/s, $\varphi = 90^\circ$

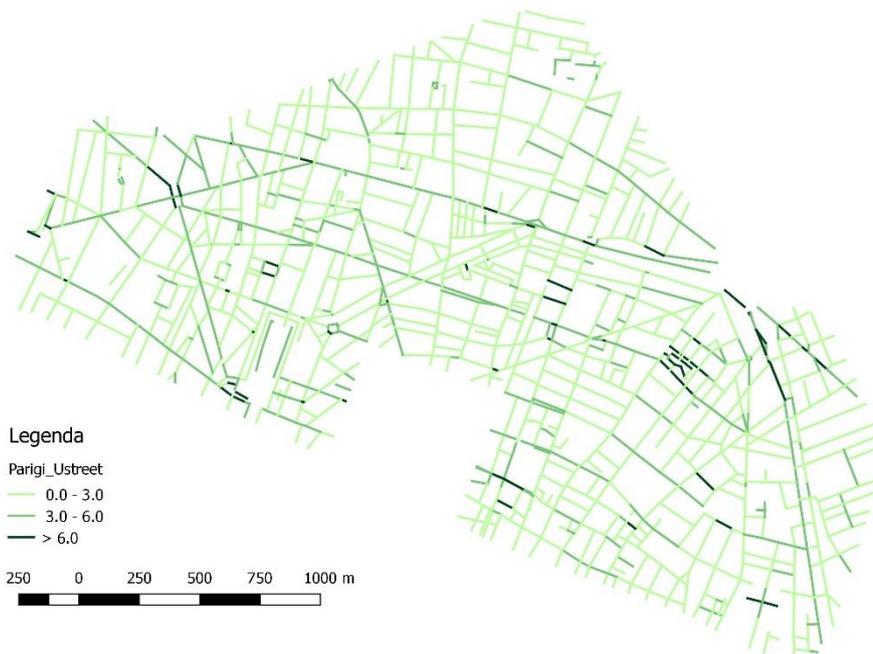


Figura 3.1.2.9 - U_{st} , per $U = 10 \text{ m/s}$, $\varphi = 135^\circ$

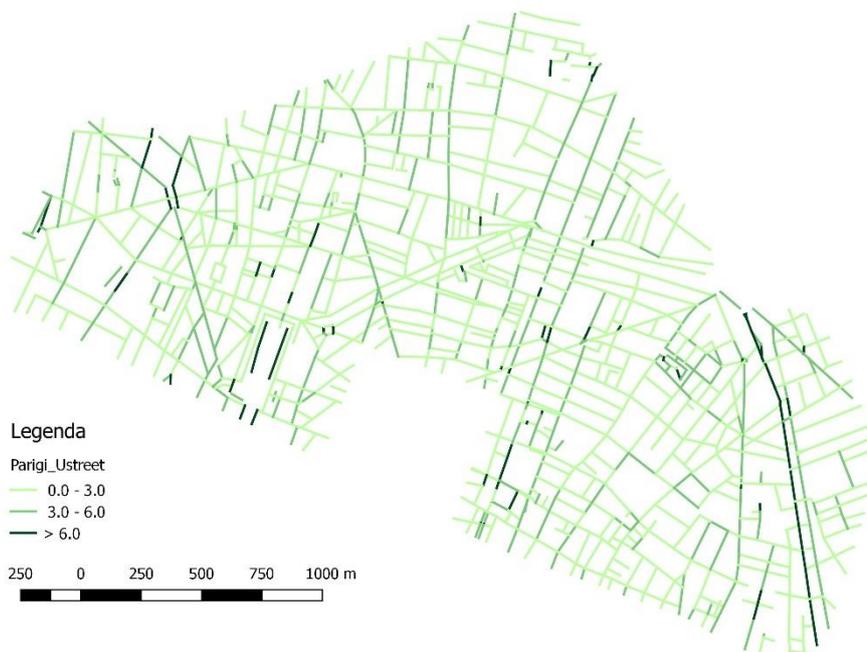


Figura 3.1.2.10 - U_{st} , per $U = 10 \text{ m/s}$, $\varphi = 180^\circ$

Per $U = 10 \text{ m/s}$, si osserva una situazione simile a quella per $U = 5 \text{ m/s}$: la maggior parte degli elementi ha bassi valori di U_{st} , che aumentano per vie più larghe (con un più basso valore di H/W) e per vie orientate all'incirca come la direzione del vento.

3.1.3. VULNERABILITÀ

Per il calcolo della vulnerabilità, sono stati considerati due casi:

- $C_0/C_{th} = 10$, ovvero la concentrazione iniziale della sostanza tossica nel nodo sorgente C_0 è 10 volte la concentrazione di soglia C_{th} , al di sotto della quale gli effetti della sostanza tossica sono trascurabili;
- $C_0/C_{th} = 100$.

Per ognuno di questi casi, sono state considerate 8 direzioni del vento: 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315, 360 gradi.

La vulnerabilità è legata alla densità di popolazione in ogni via (a sua volta legata al numero di piani, quindi all'altezza degli edifici che si affacciano sulla via considerata) e alla sua lunghezza contaminata, come mostrato nel paragrafo 1.3.

Il primo passo consiste nel calcolo della popolazione dell'area studiata a partire da aree di cui si conosce il numero di abitanti: in questo caso, sono note l'area e la popolazione di due quartieri del centro di Parigi, il II e il III arrondissement, che sono totalmente inclusi nell'area di studio, come si osserva in Figura 3.1.3.1.

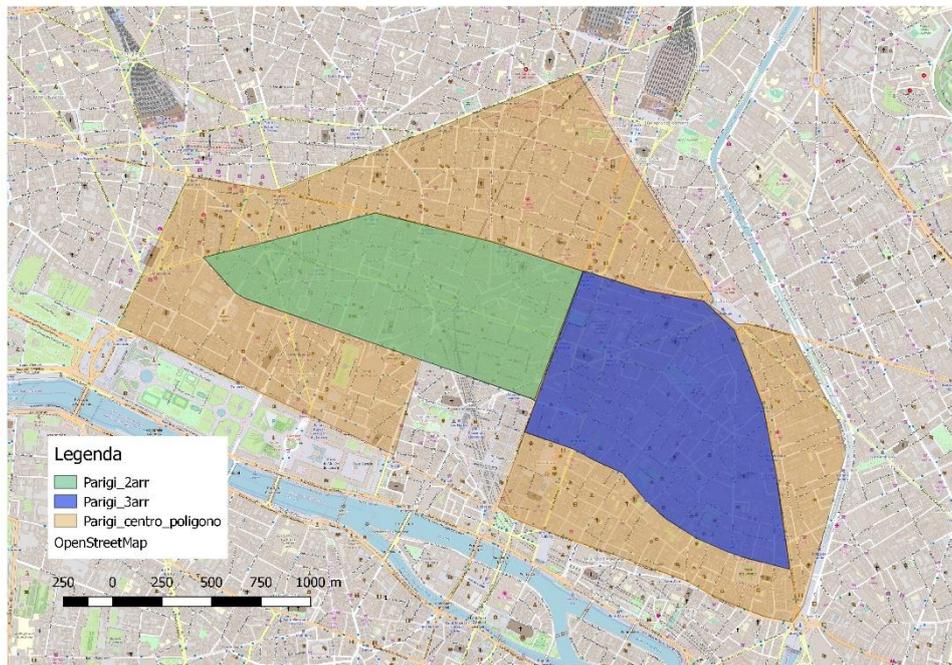


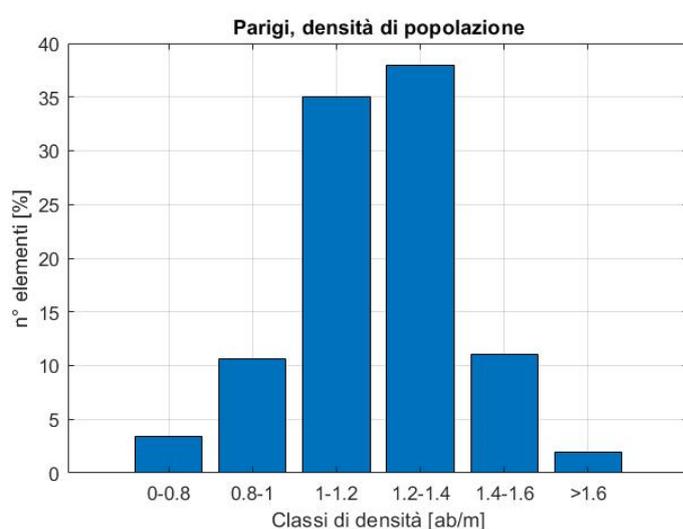
Figura 3.1.3.1 - L'area di studio è rappresentata in arancio. Il II e il III arrondissement (rispettivamente in verde e in blu), di cui si conosce la popolazione, sono totalmente inglobati nell'area di studio.

Dunque, note l'area e la popolazione dei due arrondissement e l'area totale della zona studiata, tramite proporzione si ottiene il valore di popolazione dell'area studiata. Nello specifico, la proporzione è stata effettuata separatamente, prima tra l'area di studio e il II arrondissement, poi tra l'area di studio e il III arrondissement. Sono così stati ottenuti due valori di popolazione dell'area di studio, per cui, nei successivi calcoli, si è considerato il valor medio, come mostrato in Tabella 3.1.3.1.

Tabella 3.1.3.1 - Area e popolazione della zona di studio e del II e III arrondissement.

	A	P
	[m²]	[ab]
A2	1.50E+06	20700
A3	1.77E+06	35100
Atot,2		105436
Atot,3	7.66E+06	152138
Atot		128787

Utilizzando l'equazione (1.41) si ottiene il valore di A_p , pari a $108 \text{ m}^2/\text{ab}$. Si calcolano poi la popolazione e la densità di popolazione in ogni via, mediante le equazioni (1.38) e (1.42). La densità di popolazione può essere divisa in classi, per capire quali valori di essa sono più ricorrenti.



dP	n° elementi	
	[ab/m]	[-]
0-0.8	55	3.4
0.8-1	170	10.6
1-1.2	560	35.0
1.2-1.4	607	38.0
1.4-1.6	176	11.0
> 1.6	31	1.9

Figura 3.1.3.2 - Istogramma delle classi di densità di popolazione e relativa tabella.

Si osserva in Figura 3.1.3.2 che le classi di densità più ricorrenti sono 1-1.2 e 1.2-1.4 ab/m; esse comprendono rispettivamente il 35 e il 38% del totale degli elementi.

Come visto precedentemente, si è assunto che, in ogni via, la densità sia direttamente proporzionale all'altezza degli edifici che si affacciano su di essa. Dunque, non sono presenti valori molto alti di densità in quanto nell'area studiata non ci sono edifici molto alti.

Anche la distribuzione spaziale della densità di popolazione rispecchia i valori di altezza degli edifici: dunque, in Figura 3.1.3.3, gli elementi di colore scuro (con densità maggiore) corrispondono esattamente agli elementi caratterizzati da edifici più alti. Dunque, la figura rappresenta non solo la densità di popolazione, ma anche, a meno di una costante, la distribuzione dell'altezza degli edifici. Si osserva che, stando alle ipotesi fatte, la zona ovest è quella con densità maggiore, mentre la zona est ha densità minore. In base a queste considerazioni, è facile immaginare che la zona più vulnerabile sia quella ovest (vedi equazione (1.38)). Tuttavia, si ricorda che la proporzionalità tra popolazione e altezza degli edifici è solo un'ipotesi, poiché non erano disponibili valori esatti di popolazione per ogni via. Infatti, osservando la Tabella 3.1.3.1, si osserva che la zona est (III arrondissement) ha una maggiore densità rispetto a quella ovest, pur avendo edifici più bassi: ciò potrebbe essere legato al fatto che certi edifici possano ospitare uffici, musei etc., pertanto non

sono inclusi nel calcolo della popolazione. Si rimane comunque fedeli all'ipotesi fatta sull'altezza degli edifici, poiché è impossibile stabilire per ogni via, quali edifici ospitano uffici e quali appartamenti.

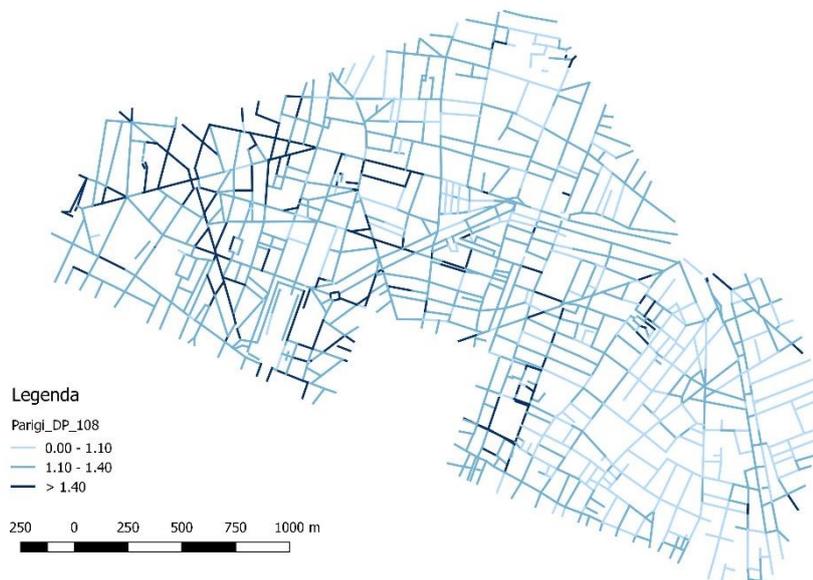


Figura 3.1.3.3 - Distribuzione spaziale della densità di popolazione. I valori più alti sono in colore scuro.

Una volta calcolata la densità di popolazione in ogni via, tramite l'equazione (1.43) si calcola, per ogni nodo del reticolo viario, la vulnerabilità. Inoltre, al variare della direzione del vento, si considera il nodo peggiore, ovvero quello a partire dal quale la sostanza tossica raggiunge il maggior numero di persone, a cui è legata la vulnerabilità massima, per quella direzione del vento. I valori di vulnerabilità massima al variare della direzione del vento sono riportati in Tabella 3.1.3.2.

Tabella 3.1.3.2 - Vulnerabilità massima al variare della direzione del vento, nelle due condizioni di rapporto tra concentrazione iniziale e di soglia pari a 10 e a 100.

dir [°]	Vulner. max [ab]	
	10	100
0	8890	21716
45	11264	26281
90	7648	20405
135	8334	24282
180	8302	18800
225	9995	25055
270	8045	25479
315	9209	26940

Si osserva che le direzioni peggiori sono 45° (ovvero nord-est) nel caso di rapporto tra concentrazione iniziale e concentrazione di soglia pari a 10 e 315° (ovvero nord-ovest) per un rapporto pari a 100. Nel primo caso, la sostanza tossica raggiunge circa **11000 persone**, mentre nel secondo caso essa raggiunge circa **27000 persone**.

Si può osservare visivamente la variazione di vulnerabilità massima al variare della direzione del vento in Figura 3.1.3.4.

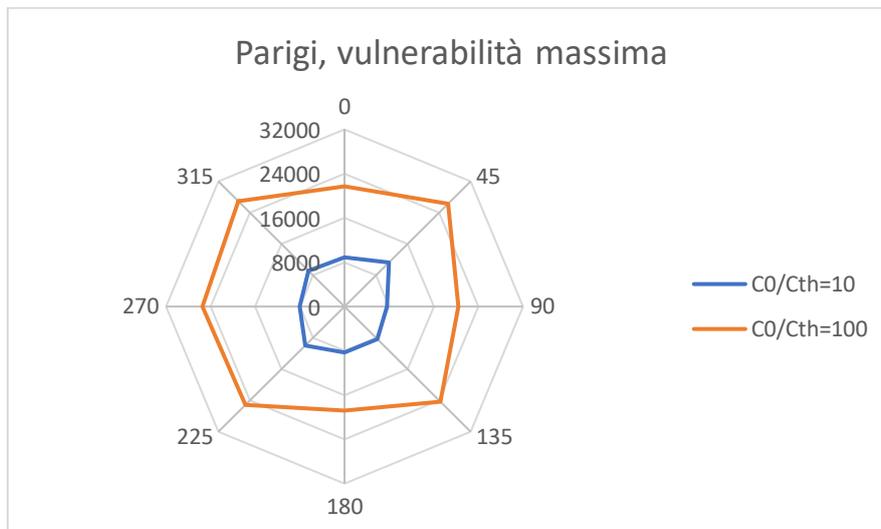


Figura 3.1.3.4 - Vulnerabilità massima al variare della direzione del vento. I valori di vulnerabilità sono riportati in numero di abitanti.

Si osserva che, in ogni condizione di vento, la vulnerabilità è sempre maggiore per concentrazioni più elevate di sostanza tossica.

A questo punto, si realizzano mappe di vulnerabilità del reticolo viario, ovvero mappe in cui si valuta la vulnerabilità legata a ogni nodo. Dunque, se si hanno N nodi, si considerano N situazioni diverse, per ognuna delle quali si ha il rilascio di sostanza tossica in un solo nodo i -esimo ($i = 1, \dots, N$) e si valuta il numero di abitanti interessati dal contagio legato proprio al nodo i -esimo. Pertanto, le mappe di vulnerabilità non mostrano la zona di influenza di ogni singolo nodo, ma soltanto la vulnerabilità legata a ognuno di essi.

In Figura 3.1.3.5 e Figura 3.1.3.6 si osservano le mappe di vulnerabilità della parte esaminata di Parigi in tutti i casi considerati. Si nota che, in tutti i casi, le zone più vulnerabili sono quelle centro-occidentali del reticolo, caratterizzate infatti da edifici leggermente più alti, quindi da una maggiore densità di popolazione. La direzione peggiore del vento è nord-est nel caso in cui $C_0/C_{th} = 10$, mentre essa è nord-ovest nel caso in cui $C_0/C_{th} = 100$.

Inoltre, osservando la distribuzione spaziale dei nodi "rossi", ovvero quelli a partire dai quali la sostanza tossica contagia un maggior numero di persone, si può intuire quale sia la zona di influenza di ogni singolo nodo: se, ad esempio, il vento soffia da NE, la zona di influenza sarà quella immediatamente a SO del nodo sorgente.

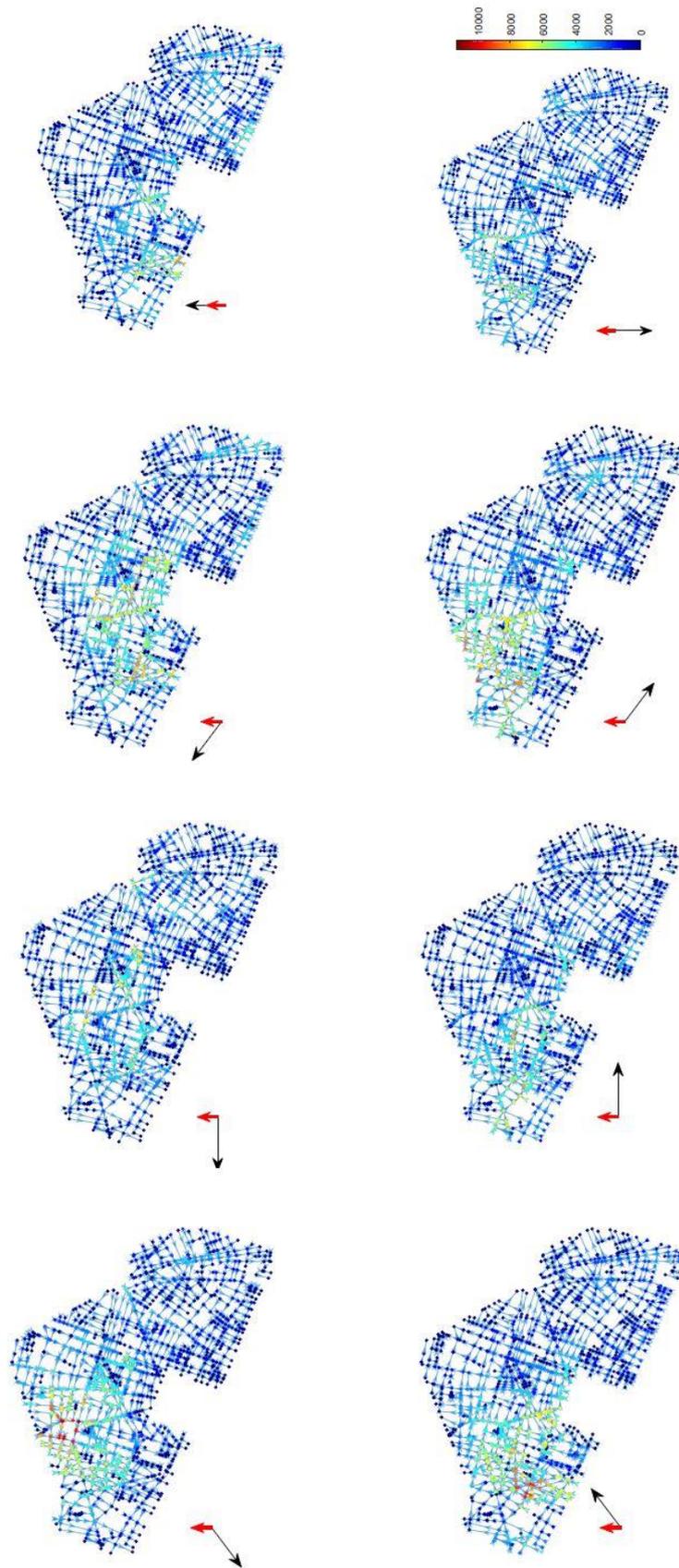


Figura 3.1.3.5 - Mappe di vulnerabilità per $C_0/C_{th} = 10$, al variare della direzione del vento, rappresentata dalla freccia nera in basso a destra per ogni immagine.

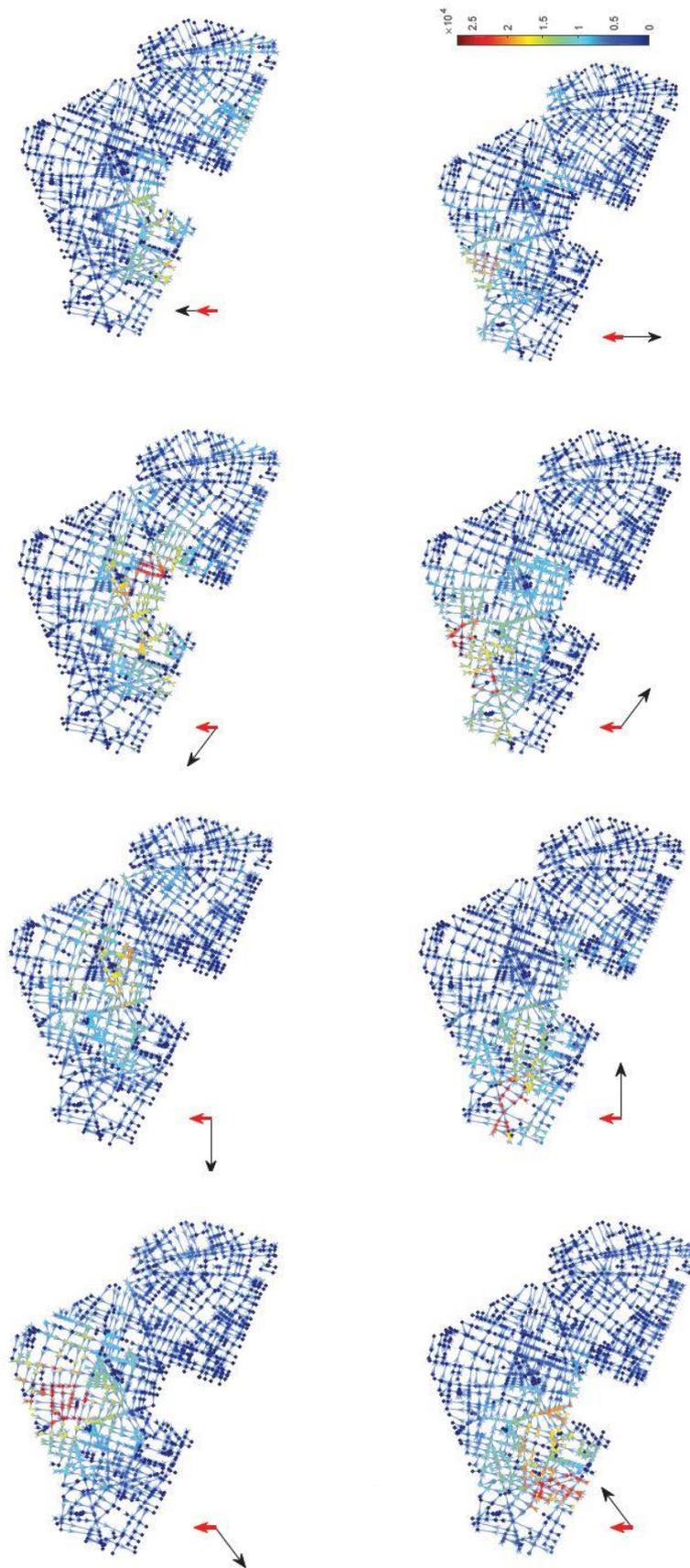


Figura 3.1.3.6 - Mappe di vulnerabilità per $C_0/C_{th} = 100$, al variare della direzione del vento, rappresentata dalla freccia nera in basso a destra per ogni immagine.

3.2. NEW YORK CITY

New York è la città più popolosa degli Stati Uniti d'America ed è probabilmente la più importante al mondo dal punto di vista economico e finanziario. Nata piuttosto recentemente, se confrontata con le città europee, a partire dalla punta meridionale dell'isola di Manhattan, dove si insediarono coloni Olandesi e Inglesi, è poi cresciuta molto rapidamente nel XIX secolo in seguito a forti migrazioni dall'Europa.

Dal punto di vista urbanistico, il primo piano per Manhattan risale a inizio Ottocento (1807 – 1811): ad esso si deve il tipico sistema viario a scacchiera ("gridiron"), con 12 "avenue" (che hanno direzione N – S) e 155 "street" (E – O), che caratterizza quasi tutta l'isola.

Lo skyline urbano di Manhattan è dominato da imponenti grattacieli, molti di essi costruiti nel Novecento: ad esempio, si citano il Chrysler Building (1930) e l'Empire State Building (1931), che sono stati entrambi i grattacieli più alti del mondo. Attualmente, il più alto della città è la Freedom Tower, alta ben 541 metri, costruita molto recentemente (2014). In Figura 3.2.1 si osservano Times Square, probabilmente la piazza più famosa della città, e una parte della 5th avenue: in entrambi i casi, si nota la presenza di edifici molto alti. Le immagini sono prese dalla funzione Street View di Google Maps.



Figura 3.2.1 - Times Square a sinistra, la 5th avenue sulla destra

A Manhattan si possono ammirare architetture contemporanee che portano la firma delle più grandi archistar del momento, tra cui Renzo Piano, Santiago Calatrava e Lord Norman Foster, e molti nuovi grattacieli sono in costruzione, rendendo lo scenario architettonico cittadino in continua evoluzione.

La zona della città oggetto di studio è tutta la parte meridionale dell'isola di Manhattan, ovvero la parte di essa situata a sud di Central Park. Essa comprende due quartieri: **Lower Manhattan**, la punta meridionale dell'isola, dove si trovano la Freedom Tower e Wall Street (dove si trova la Borsa), e **Midtown**, dove si trovano alcuni importanti grattacieli, tra cui i già citati Empire State Building e il Chrysler Building.

3.2.1. GEOMETRIA DEL RETICOLO VIARIO

Le informazioni sul reticolo viario della parte studiata della città sono ricavate da due shapefile: quello delle strade (costituito da polilinee) e quello degli edifici (costituito da poligoni). Tutti gli shapefile utilizzati per New York hanno come sistema di riferimento EPSG: 32118, NAD83/New York Long Island e la loro rappresentazione grafica è stata effettuata tramite il software QGIS.

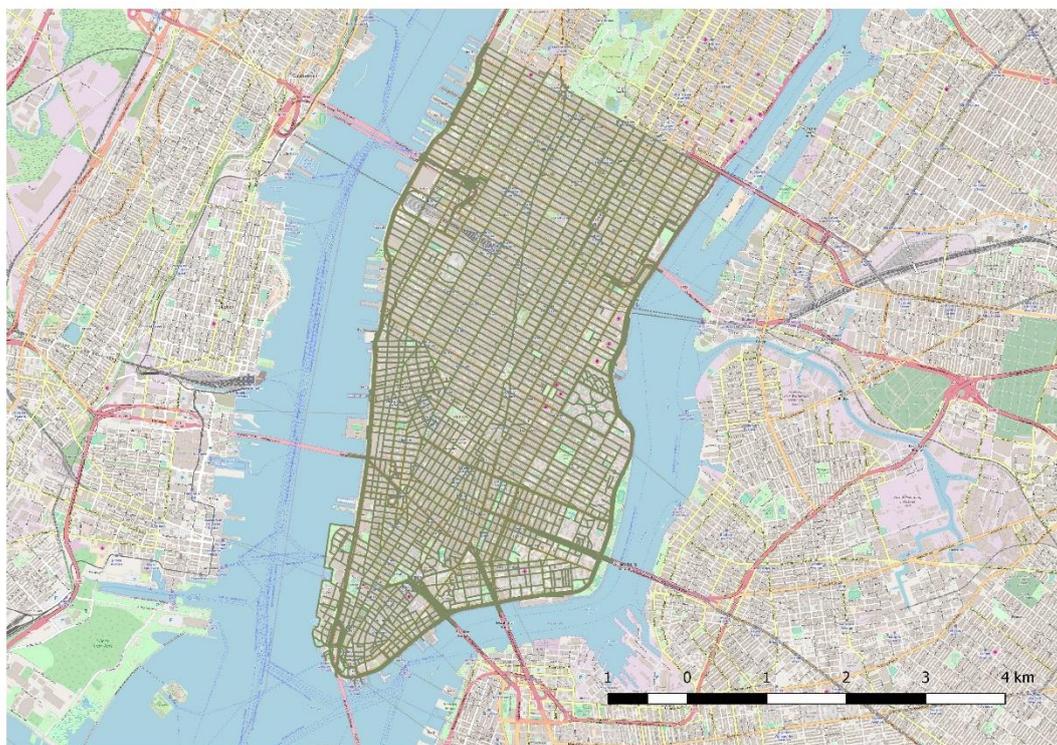


Figura 3.2.1.1 - Manhattan, shape-file di polilinee

In Figura 3.2.1.1 si osserva lo shapefile di polilinee sovrapposto alla mappa. Esso contiene 5967 elementi, ognuno dei quali è riferito ad una via o ad una parte di essa. A ogni elemento è associato un ID.

In Figura 3.2.1.2 si osserva il secondo shapefile di partenza, che rappresenta gli edifici e porta con sé le informazioni geometriche sul reticolo viario. Esso è costituito da 21532 elementi, ognuno dei quali ha forma poligonale.

A partire da questi due shapefile, tramite le utilities, se ne ricava uno nuovo, costituito da segmenti, ognuno dei quali porta con sé le informazioni dei due shapefile di partenza (vedi paragrafo 2.1.2).

Lo shapefile così ottenuto ha 6159 elementi e, tra le informazioni che contiene, ci sono HD, HG, WD e WG, ovvero, nell'ordine, altezza destra e sinistra, larghezza destra e sinistra di ogni elemento. Questo shapefile viene ulteriormente modificato, poiché, per poter essere utilizzato tra gli input di SIRANE, deve avere i suddetti campi positivi.

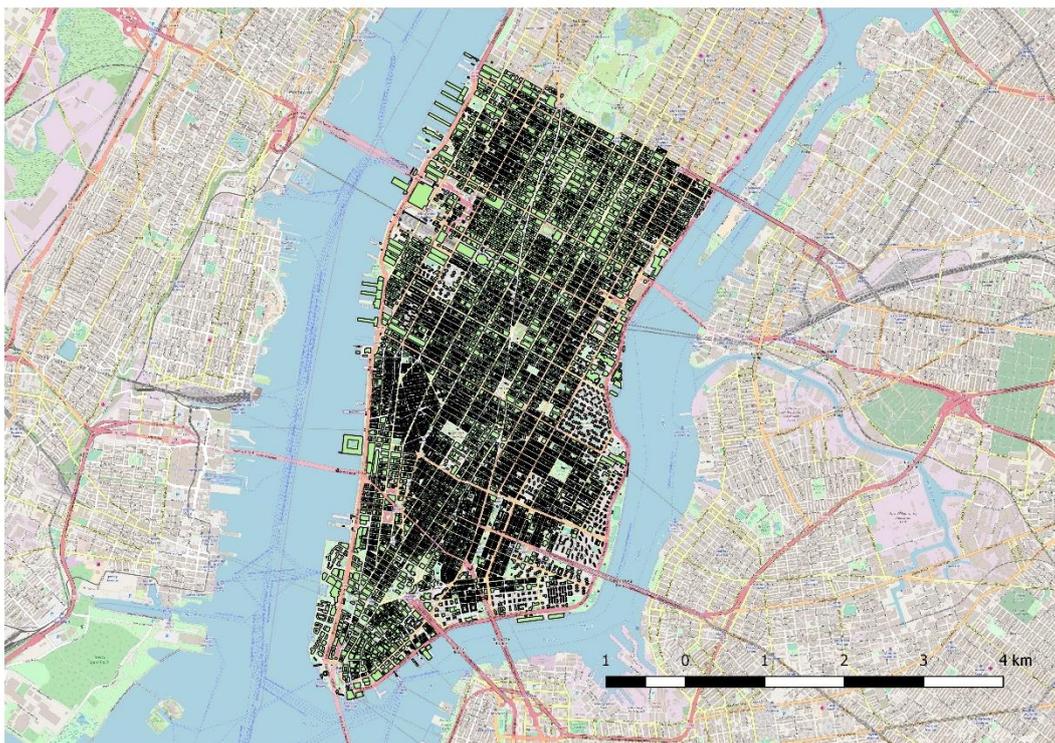


Figura 3.2.1.2 - Manhattan, shapefile di edifici

In Tabella 3.2.1.1 si può osservare il numero di elementi con campi negativi o nulli. Di questi, alcuni devono essere modificati (ad esempio, se il valore del campo è errato), dopodiché si eliminano tutti gli elementi rimanenti con almeno uno dei suddetti campi negativi o nulli (vedi 2.1.2).

Tabella 3.2.1.1 - Elementi con campi negativi o nulli

	0		<0		≤0	
	n° elem	%	n° elem	%	n° elem	%
HD	1491	24.2	-	-	1491	24.2
HG	1366	22.2	-	-	1366	22.2
WD	1468	23.8	37	0.60	1505	24.4
WG	1338	21.7	39	0.63	1377	22.4

In questo modo, lo shapefile che si ottiene dopo la modifica ha 4134 elementi, visibile in Figura 3.2.1.3.

Si nota che manca buona parte dell'autostrada che corre attorno alla città, dato che essa è affacciata a est sull'East River e a ovest sul fiume Hudson: sono dunque spazi aperti, dove l'altezza destra e/o sinistra è ovviamente pari a zero. Inoltre, mancano le vie adiacenti a piazze e giardini: ad esempio, si nota a nord che manca la strada che costeggia Central Park, assunto come limite nord del dominio preso in esame.

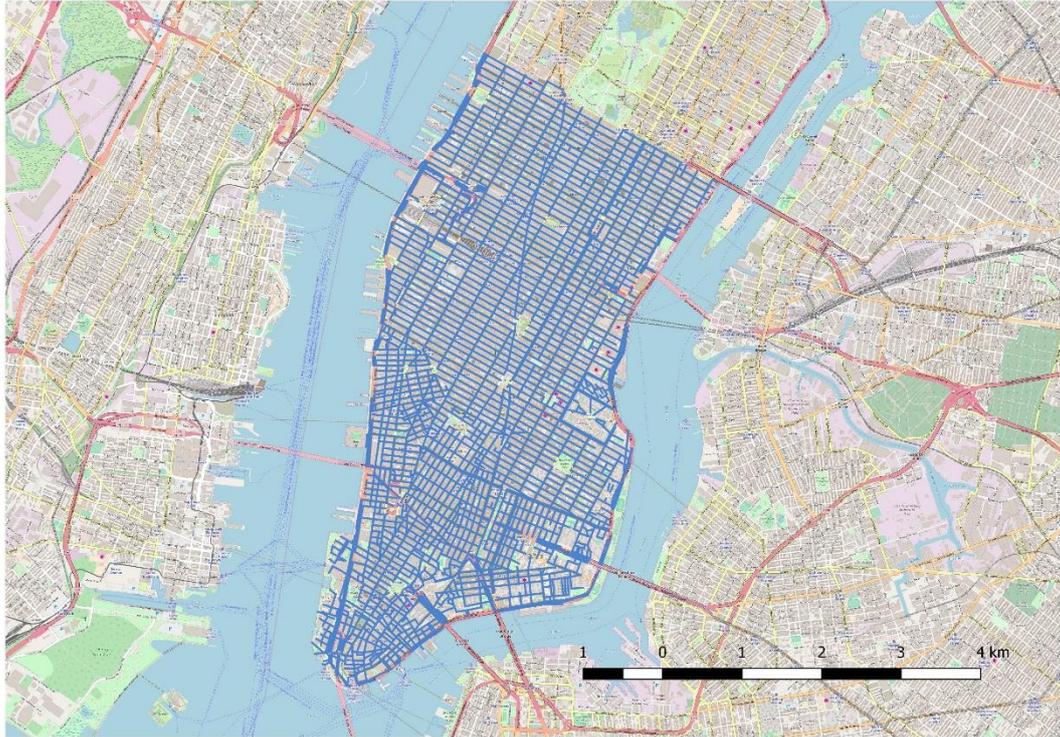
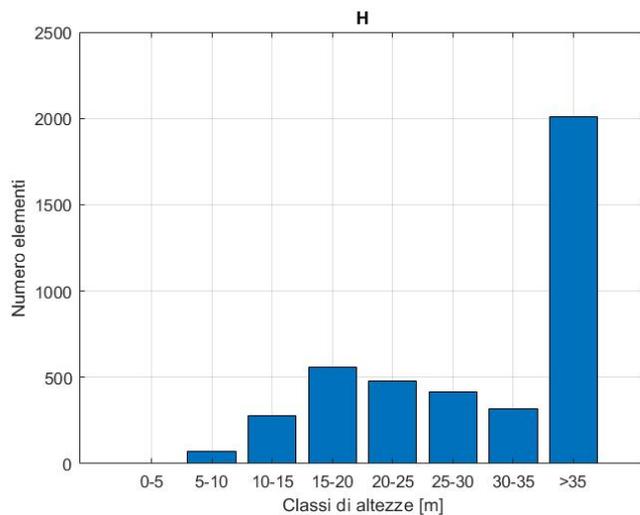


Figura 3.2.1.3 - Manhattan, shapefile modificato

Si riportano ora gli istogrammi relativi ai campi H (altezze), W (larghezze) e H/W (rapporto tra altezza e larghezza) degli elementi dello shapefile modificato.

Altezze H degli street canyon

Nell'istogramma di Figura 3.2.1.4 sono riportati in ascissa le classi di altezze in metri, in ordinata il numero di elementi appartenenti ad ogni classe; in tabella è riportato il numero esatto di elementi.



H [m]	n° elem
0-5	2
5-10	73
10-15	276
15-20	558
20-25	477
25-30	418
30-35	320
>35	2010

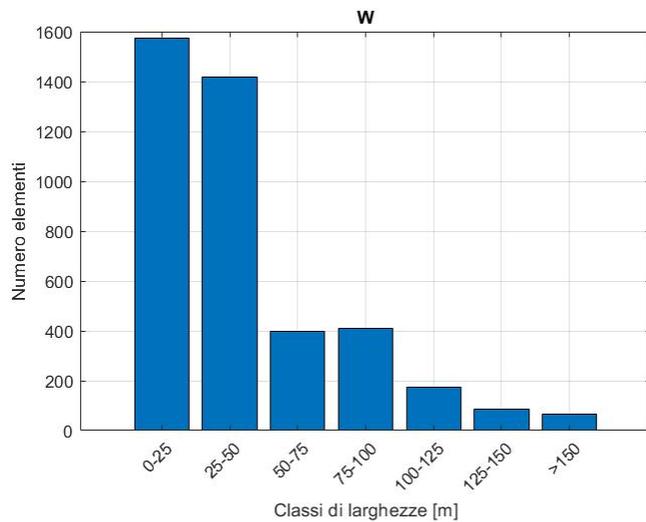
Figura 3.2.1.4 - Iistogramma e tabella delle classi di altezze H

Si nota che a Manhattan gli edifici sono molto alti: la maggior parte degli elementi (tratti di vie) ha altezze superiori a 35 metri, ben 2010 su 4134 (circa il 50%). Al contrario, gli elementi con altezze

inferiori a 10 metri sono davvero pochi, meno del 2%: solo due elementi alti meno di 5 metri e 73 alti tra 5 e 10 metri.

Larghezze W degli street canyon

Nell'istogramma di Figura 3.2.1.5 sono riportati in ascissa le classi di larghezze in metri, in ordinata il numero di elementi appartenenti ad ogni classe, in tabella è riportato il numero esatto di elementi.



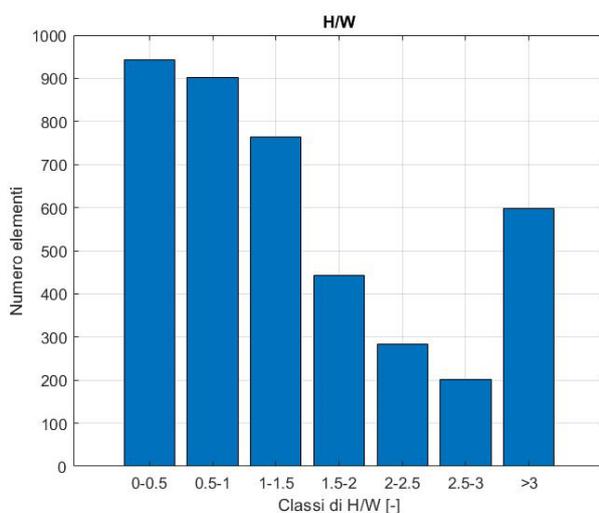
W [m]	n° elem
0-25	1575
25-50	1417
50-75	400
75-100	411
100-125	176
125-150	87
>150	68

Figura 3.2.1.5 - Iistogramma e tabella delle classi di larghezze W

Si nota che le classi di larghezze più rappresentate sono 25-50 metri (1417 elementi, ovvero circa il 34%) e 0-25 metri (1575 elementi, ovvero circa il 38%). I valori molto alti di larghezza indicano spesso piazze o piccoli parchi.

Rapporto H/W tra altezza e larghezza degli street canyon

Nell'istogramma di Figura 3.2.1.6 sono riportati in ascissa le classi di H/W [-], in ordinata il numero di elementi appartenenti ad ogni classe, in tabella è riportato il numero esatto di elementi.



H/W [-]	n° elem
0-0.5	942
0.5-1	901
1-1.5	764
1.5-2	443
2-2.5	284
2.5-3	202
>3	598

Figura 3.2.1.6 - Iistogramma e tabella delle classi di H/W

Questo rapporto è molto più significativo dei singoli valori di altezza e larghezza: se, ad esempio, la via ha un alto valore di H/W vuol dire che essa è molto più alta che larga, pertanto le sostanze tossiche ivi presenti impiegheranno più tempo ad abbandonarla, mantenendo alta la loro concentrazione. Al contrario, un basso rapporto H/W favorisce una rapida diminuzione della concentrazione.

Si nota che, nonostante la classe del rapporto H/W più rappresentata sia l'intervallo 0-0.5, è presente un numero relativamente alto di valori ricadenti nella classe più alta, ovvero $H/W > 3$, circa il 15%: ciò è dovuto al fatto che a Manhattan ci sono molti edifici alti e grattacieli.

La distribuzione delle vie con alto valore di H/W non è omogenea: i grattacieli, infatti, sono concentrati principalmente in due aree di Manhattan, ovvero la punta meridionale, dove tra l'altro sorge il grattacielo più alto della città, e la zona della Midtown immediatamente a sud di Central Park. Le altre parti della Lower Manhattan e della Midtown hanno invece vie con H/W più bassi.

Dunque, nonostante le vie della città non siano strette come, ad esempio, quelle di un centro storico medievale europeo, è l'elevata altezza degli edifici che fa aumentare notevolmente il rapporto H/W.

È possibile vedere ciò in Figura 3.2.1.7, dove gli elementi con alto H/W sono rappresentati in colore scuro, mentre quelli con basso H/W in colore chiaro.

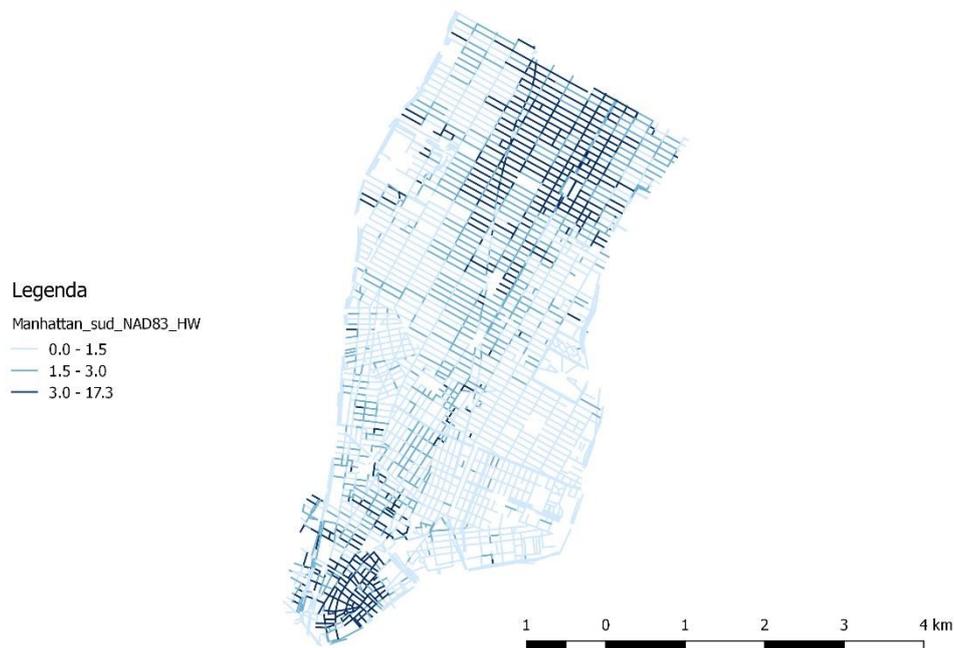


Figura 3.2.1.7 - Distribuzione spaziale delle classi di H/W

3.2.2. VELOCITÀ DEL VENTO NELLE VIE

Ai fini di questo studio, si vogliono ricavare le velocità del vento nelle vie U_{st} tramite SIRANE, a partire dai dati geometrici (contenuti nello shapefile) del reticolo viario, dai dati geografici (griglie, nel sistema di riferimento NAD83/New York Long Island, che contengono il reticolo viario al loro interno) e dai dati meteo (velocità U e direzione φ del vento atmosferico, ovvero quello che soffia sulla città, al di sopra degli edifici).

Per quanto riguarda i **dati meteo**, sono stati considerati i seguenti 8 casi:

- Velocità del vento 5 m/s, direzione 45° (nord est – sud ovest)
- Velocità del vento 5 m/s, direzione 90° (est – ovest)
- Velocità del vento 5 m/s, direzione 135° (sud est – nord ovest)
- Velocità del vento 5 m/s, direzione 180° (sud – nord)
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 45°
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 90°
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 135°
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 180°

I casi in cui la direzione del vento è di 225, 270, 315 e 360 gradi danno gli stessi risultati dei casi in cui si ha direzione del vento rispettivamente di 45, 90, 135 e 180 gradi.

ISTOGRAMMI DELLE CLASSI DI VELOCITA'

Si considerano, nel caso di velocità del vento pari a **5 m/s**, tre classi di velocità del vento nelle vie:

- 0 – 1,5 m/s
- 1,5 – 3 m/s
- >3 m/s

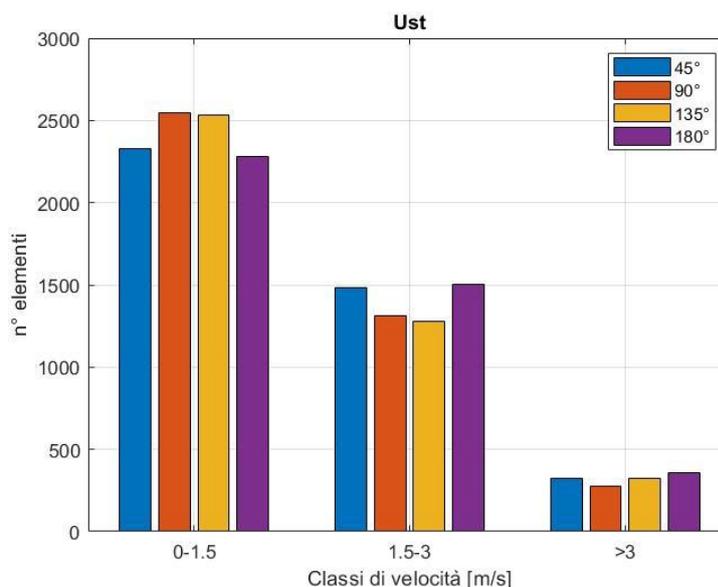


Figura 3.2.2.1 - Classi di U_{st} , per $U = 5$ m/s

In Figura 3.2.2.1 è riportato l'istogramma in cui si ha in ascissa le classi di velocità del vento nelle vie e in ordinata il numero di elementi (vie) per ogni classe e per ogni direzione del vento.

Si osserva che la classe di velocità del vento nelle vie più rappresentata è l'intervallo 0 – 1.5 m/s: dunque, nella maggior parte delle vie, la velocità del vento è molto inferiore alla velocità del vento che soffia sulla città, in questo caso 5 m/s.

In Tabella 3.2.2.1 si osservano i valori esatti del numero di elementi per ogni classe.

Tabella 3.2.2.1 - Classi di U_{st} , per $U = 5$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-1.5	2330	2549	2536	2279
1.5-3	1480	1313	1277	1502
>3	326	274	323	355

Al variare della direzione del vento, varia il numero di elementi appartenenti ad ogni classe di velocità. In particolare, si nota che la direzione nord – sud (180°) è quella per la quale ci sono più elementi con “alte” velocità del vento (classe >3 m/s) e meno elementi con velocità del vento più basse (0 – 1.5 m/s) rispetto alle altre direzioni.

Si possono osservare in Tabella 3.2.2.2 le percentuali di elementi appartenenti ad ogni classe, ricordando che in totale gli elementi (vie o tratti di esse) sono 4134.

Tabella 3.2.2.2 – Percentuali classi di U_{st} , per $U = 5$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-1.5	56.3	61.6	61.3	55.1
1.5-3	35.8	31.7	30.9	36.3
>3	7.9	6.6	7.8	8.6

Osservando gli ordini di grandezza, si nota che circa il 60% di elementi è caratterizzato da basse velocità del vento (0 – 1.5 m/s), mentre le velocità intermedie caratterizzano circa il 30 – 35% degli elementi e infine quelle “alte”, ovvero velocità di poco superiori a 3 m/s, riguardano circa il 6 - 8% degli elementi. Le differenze di percentuali tra le diverse direzioni del vento sono molto piccole.

Si riportano ora in Tabella 3.2.2.3 i massimi valori di U_{st} a seconda della direzione del vento.

Tabella 3.2.2.3 – U_{st} max, per $U = 5$ m/s

Ust max	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
	3.90	3.73	4.00	3.84

In ogni caso, la velocità del vento nelle vie è sempre inferiore a quella del vento che soffia sulla città. Inoltre, si osserva che le velocità massime riguardano solo una piccola percentuale di elementi,

come visto nelle tabelle precedenti: dunque, nelle vie, la velocità del vento è molto più bassa di quella del vento che soffia sulla città.

Si considerano, nel caso di velocità del vento pari a **10 m/s**, quattro classi di U_{st} :

- 0 – 2 m/s
- 2 – 4 m/s
- 4 – 6 m/s
- >6 m/s

In Figura 3.1.2.2 è riportato l'istogramma in cui si ha in ascissa le classi di velocità del vento nelle vie e in ordinata il numero di elementi (vie) per ogni classe e per ogni direzione del vento.

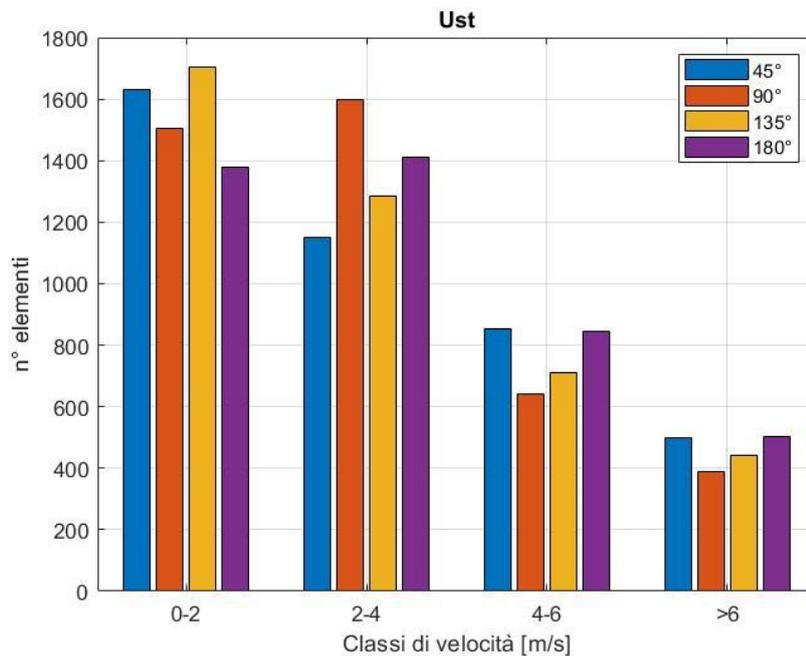


Figura 3.2.2.2 - Classi di U_{st} , per $U = 10$ m/s

Si osserva che le classi di velocità del vento nelle vie più rappresentate sono 0 – 2 m/s e 2 - 4 m/s, ovvero le classi di velocità più basse. Un numero inferiore di elementi è caratterizzato da velocità più “alte”, ovvero poco più di 6 m/s, velocità comunque più bassa rispetto a quella del vento che soffia sulla città (in questo caso, 10 m/s).

In Tabella 3.2.2.4 si osservano i valori esatti del numero di elementi per ogni classe.

Tabella 3.2.2.4 - Classi di U_{st} , per $U = 10$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-2	1633	1504	1703	1378
2-4	1152	1600	1284	1413
4-6	853	643	709	843
>6	498	389	440	502

Al variare della direzione del vento, varia il numero di elementi appartenenti ad ogni classe di velocità. In particolare, si nota che, per la direzione nord – sud (180°), ci sono più elementi nelle classi di velocità più alte e meno in quella più bassa, rispetto alle altre direzioni.

Si possono osservare in Tabella 3.2.2.5 le percentuali di elementi appartenenti ad ogni classe, ricordando che in totale gli elementi (vie o tratti di esse) sono 4134.

Tabella 3.2.2.5 - Percentuali classi di U_{st} , per $U = 10$ m/s

U _{st} [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-2	39.5	36.4	41.2	33.3
2-4	27.9	38.7	31.0	34.2
4-6	20.6	15.5	17.1	20.4
>6	12.0	9.4	10.6	12.1

Osservando gli ordini di grandezza, si nota che le prime due classi di velocità sono più rappresentate delle altre due, con percentuali tra il 30 e il 40% per la prima classe (0 – 2 m/s) e tra 25 e 40% per la seconda (2 – 4 m/s). La terza classe (velocità del vento tra 4 e 6 m/s) è meno rappresentata, con una percentuale di circa il 15 - 20%, mentre l'ultima, ovvero le velocità più alte, ha circa il 9 – 12% degli elementi. Inoltre, si nota un andamento decrescente del numero di elementi all'aumentare della velocità del vento nelle vie per le direzioni 45 e 135 gradi, mentre, per le direzioni 90 e 180 gradi, si ha il picco nella seconda classe, poi l'andamento è decrescente.

Si riportano ora in Tabella 3.2.2.6 i massimi valori di U_{st} a seconda della direzione del vento.

Tabella 3.2.2.6 - U_{st} max, per $U = 10$ m/s

	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
U _{st} max	8.34	7.97	8.56	8.21

Anche in questo caso, la velocità massima del vento nelle vie, in ogni direzione, rimane inferiore a quella del vento che soffia sulla città (10 m/s). Dunque, nelle vie della parte della città presa in esame, la velocità del vento è di molto inferiore a 10 m/s, dato che le classi di velocità più rappresentate sono quelle "basse".

DISTRIBUZIONE DELLA VELOCITA' NELLO SPAZIO

Di seguito è riportato il reticolo viario della parte di Manhattan analizzata, in cui ogni via è colorata in modo diverso a seconda della velocità del vento che la percorre. Con i colori più scuri sono rappresentate velocità maggiori, con i colori più chiari velocità minori.

Si considerano gli 8 casi visti in precedenza, ovvero due diverse velocità del vento che soffia sulla città (5 e 10 m/s) e quattro direzioni del vento (45, 90, 135, 180 gradi).

In Figura 3.2.2.3, Figura 3.2.2.4, Figura 3.2.2.5 e Figura 3.2.2.6 si osserva la distribuzione di U_{st} per $U = 5$ m/s.

Legenda
Manhattan_sud_NAD83_Ust
— 0.0 - 1.5
— 1.5 - 3.0
— > 3.0

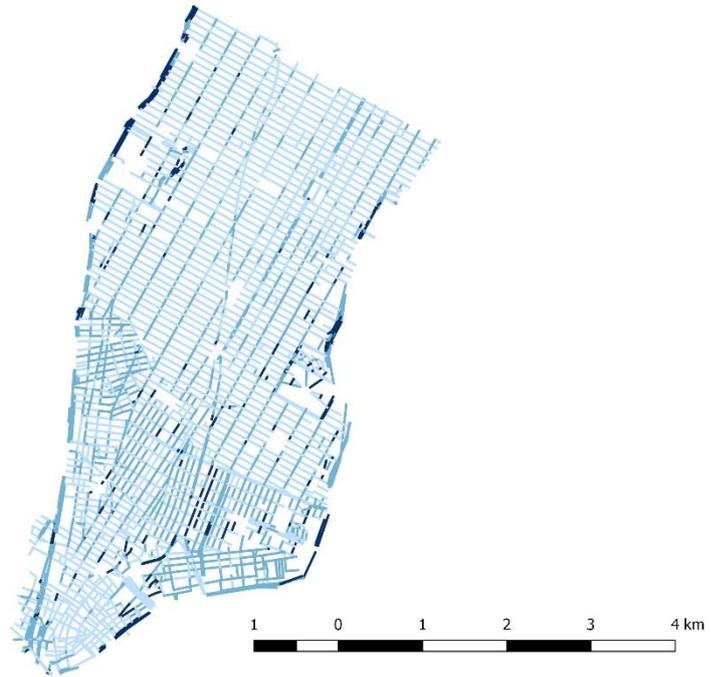


Figura 3.2.2.3 - U_{st} , per $U = 5$ m/s, $\varphi = 45^\circ$

Legenda
Manhattan_sud_NAD83_Ust
— 0.0 - 1.5
— 1.5 - 3.0
— > 3.0

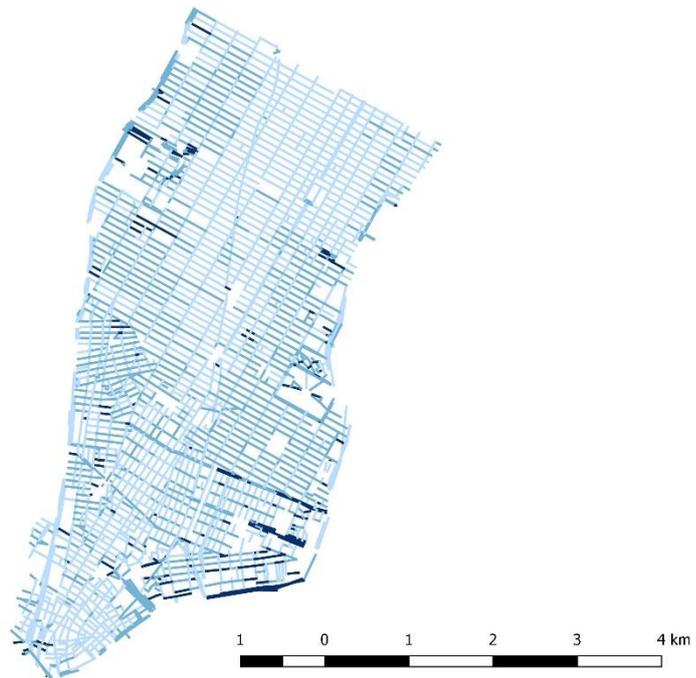


Figura 3.2.2.4 - U_{st} , per $U = 5$ m/s, $\varphi = 90^\circ$

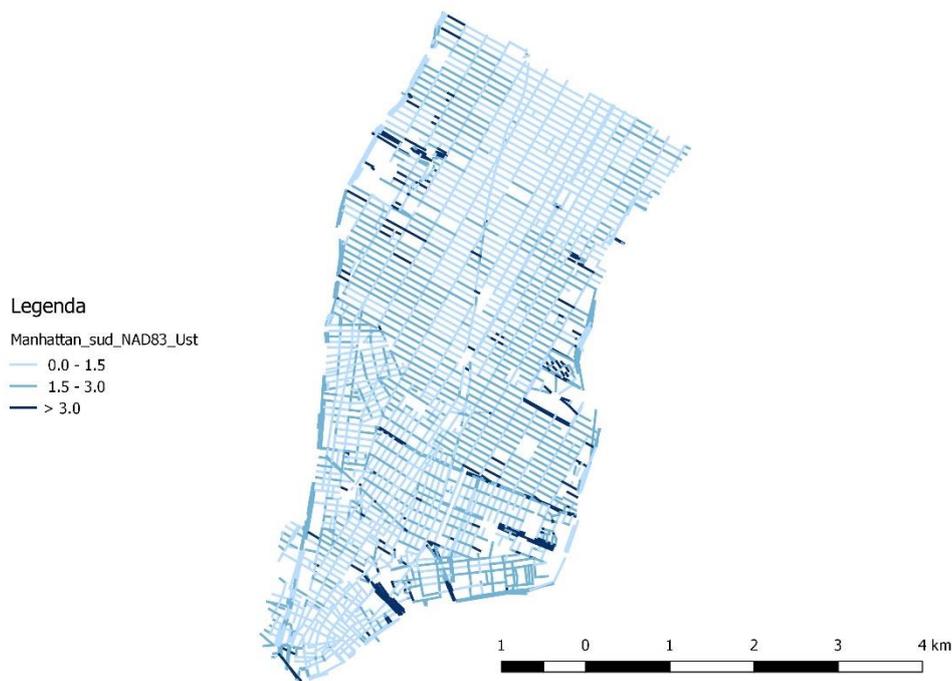


Figura 3.2.2.5 - U_{st} , per $U = 5 \text{ m/s}$, $\varphi = 135^\circ$

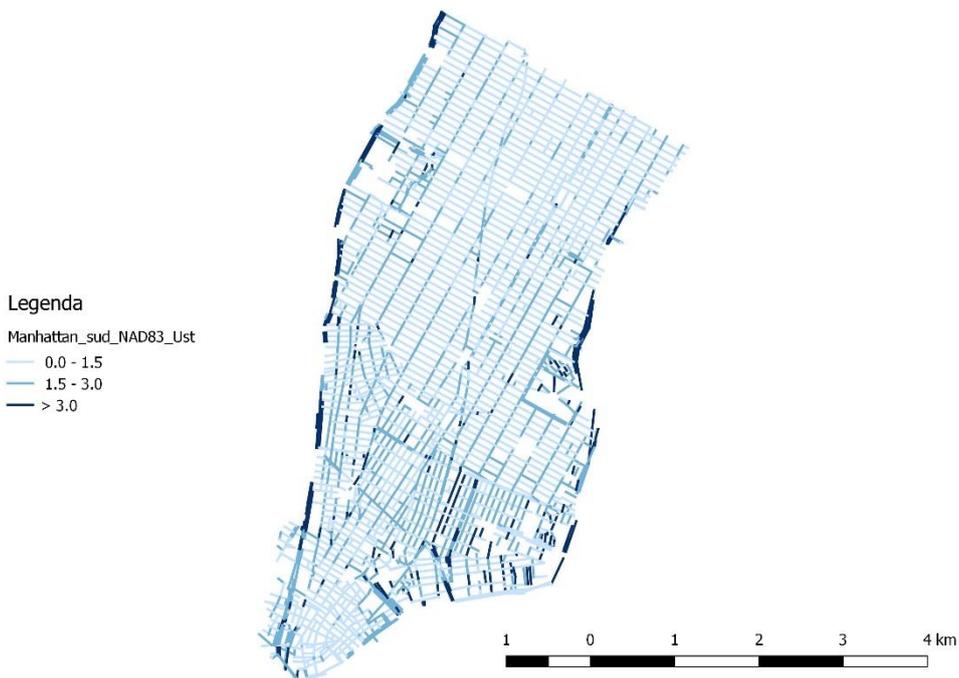


Figura 3.2.2.6 - U_{st} , per $U = 5 \text{ m/s}$, $\varphi = 180^\circ$

Si osserva che, in tutti i casi, le U_{st} maggiori riguardano principalmente le vie con basso rapporto H/W e che le U_{st} minori sono concentrate principalmente nella punta meridionale (nucleo originario della città, con vie strette e grattacieli) e nella zona nord della Midtown (grattacieli). Per le direzioni del vento di 90° e 135° , si riscontrano le maggiori U_{st} nelle “street”, ovvero le vie che vanno dall’Hudson all’East River, con direzione all’incirca ONO – ESE, mentre per 45° e 180° si hanno le

maggiori U_{st} nelle “Avenue” e nelle autostrade lungo i fiumi, ovvero vie con direzione all’incirca NNE – SSO.

In Figura 3.2.2.7, Figura 3.2.2.8, Figura 3.2.2.9 e Figura 3.2.2.10 si osserva la distribuzione di U_{st} per $U=10$ m/s.

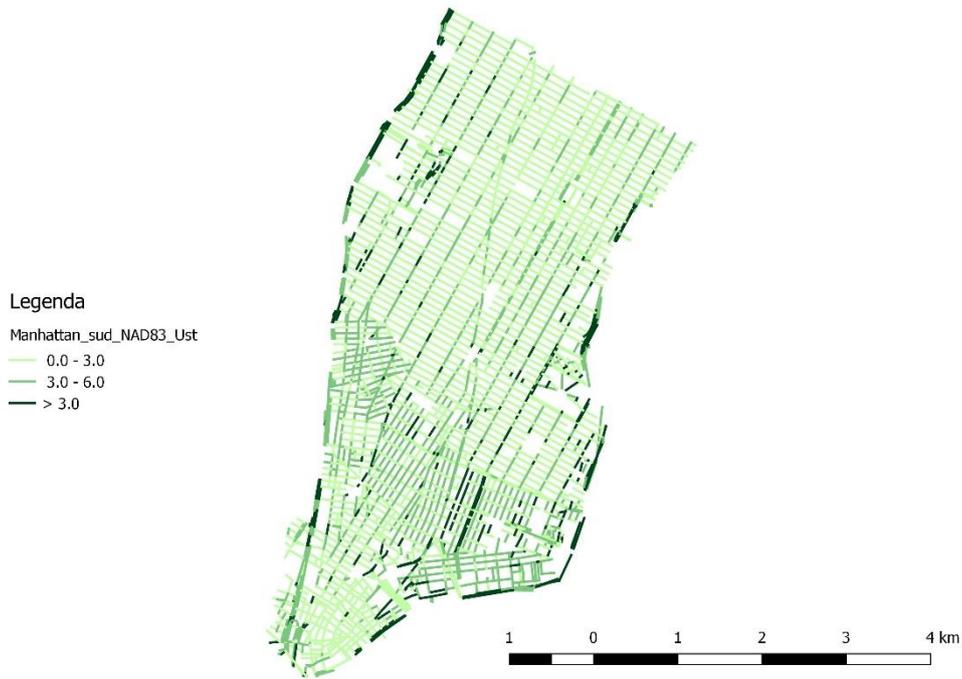


Figura 3.2.2.7 - U_{st} , per $U = 10$ m/s, $\varphi = 45^\circ$

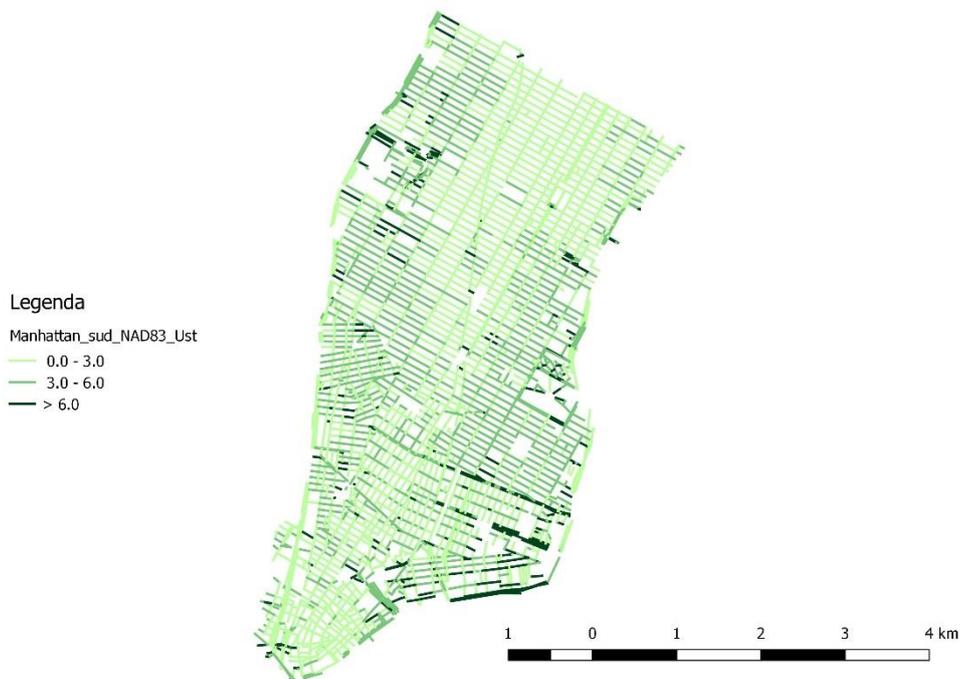


Figura 3.2.2.8 - U_{st} , per $U = 10$ m/s, $\varphi = 90^\circ$

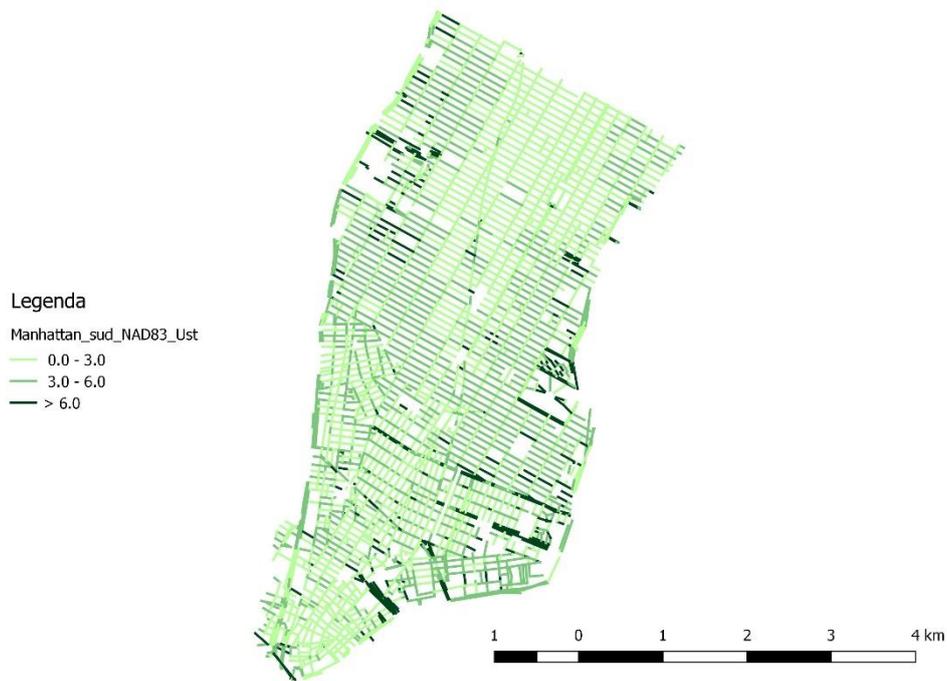


Figura 3.2.2.9 - U_{st} , per $U = 10$ m/s, $\varphi = 135^\circ$

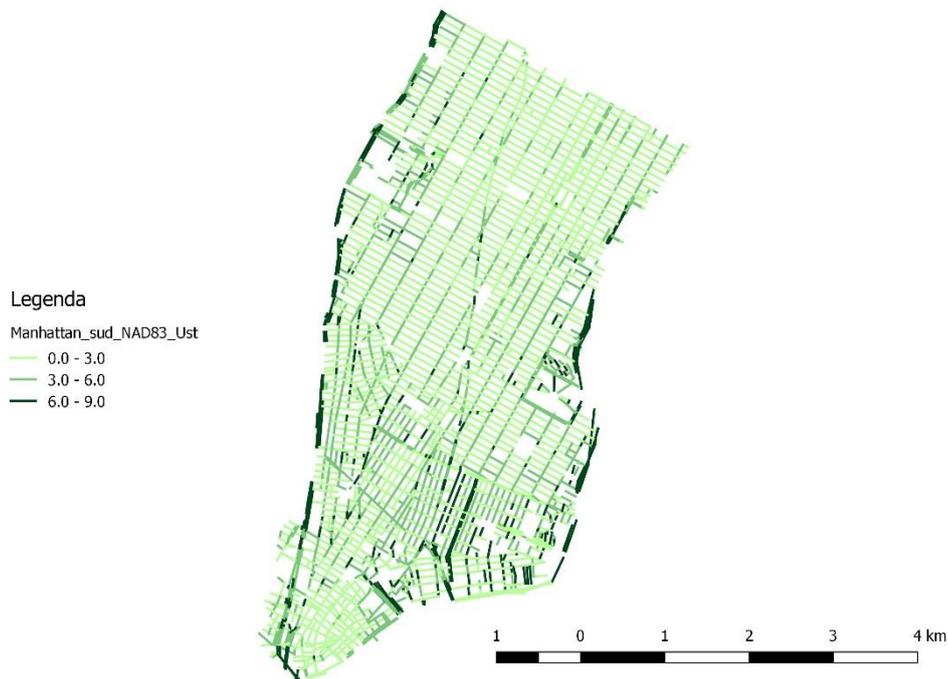


Figura 3.2.2.10 - U_{st} , per $U = 10$ m/s, $\varphi = 180^\circ$

Per $U = 10$ m/s, si osserva una situazione simile a quella per $U = 5$ m/s: si hanno U_{st} minori nella punta meridionale e nella zona nord della Midtown, mentre le U_{st} maggiori si hanno nelle Avenue per $\varphi = 45$ e 180° e nelle street per $\varphi = 90$ e 135° .

3.2.3. VULNERABILITÀ

Per il calcolo della vulnerabilità, sono stati considerati due casi:

- $C_0/C_{th} = 10$, ovvero la concentrazione iniziale della sostanza tossica nel nodo sorgente C_0 è 10 volte la concentrazione di soglia C_{th} , al di sotto della quale gli effetti della sostanza tossica sono trascurabili;
- $C_0/C_{th} = 100$.

Per ognuno di questi casi, sono state considerate 8 direzioni del vento: 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315, 360 gradi.

La vulnerabilità è legata alla densità di popolazione in ogni via (a sua volta legata al numero di piani, quindi all'altezza degli edifici che si affacciano sulla via considerata) e alla sua lunghezza contaminata, come mostrato nel paragrafo 1.3.

Il primo passo consiste nel calcolo della popolazione dell'area studiata a partire da aree di cui si conosce il numero di abitanti: in questo caso, è nota la popolazione dei due quartieri che costituiscono la zona studiata, ovvero Lower Manhattan e Midtown, come si osserva in Figura 3.2.3.1.

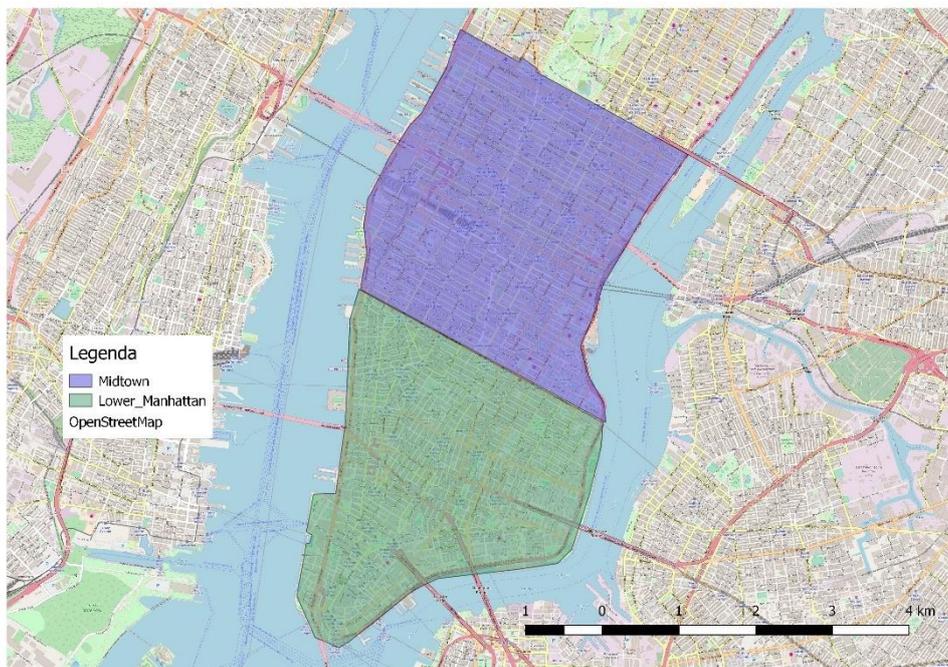


Figura 3.2.3.1 - Area di studio, costituita da Lower Manhattan a sud (in verde) e Midtown a nord (in violetto)

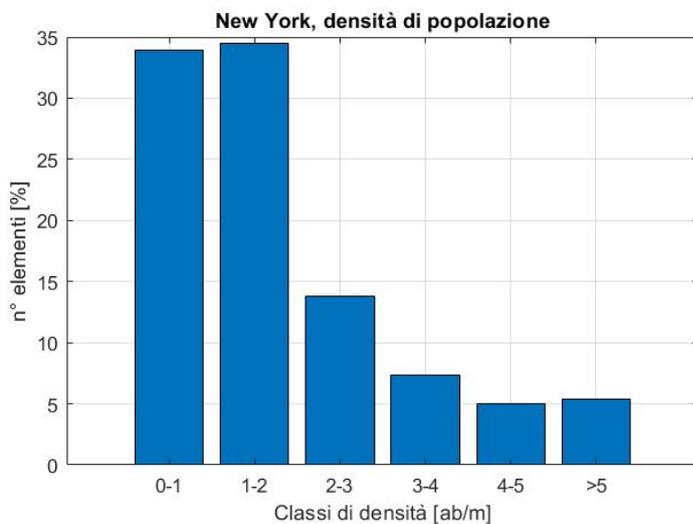
Dunque, la popolazione dell'area di studio è la somma della popolazione di Lower Manhattan e di Midtown, come si osserva in Tabella 3.2.3.1. Tuttavia, per eseguire i successivi calcoli a favore di sicurezza, il numero di abitanti dell'area di studio è stato arrotondato per eccesso a 800000 (il dato reale è 774000 abitanti).

Si calcola poi, tramite l'equazione (1.41), il valore di A_p tipico dell'area studiata, in questo caso pari a $169 \text{ m}^2/ab$. Si può così calcolare la popolazione e la densità di popolazione di ogni singola via.

Tabella 3.2.3.1 - Numero di abitanti di Lower Manhattan, di Midtown e la loro somma

	P
	[ab]
Low M	383000
Midtown	391000
Tot	774000

È utile dividere in classi i valori di densità di popolazione, per capire quali sono i valori più ricorrenti. In Figura 3.2.3.2 si osserva che le classi più rappresentate sono 0-1 e 1-2 *ab/m*, con rispettivamente il 33.9 e il 34.5% degli elementi. I valori di densità sono molto elevati: ciò accade in quanto si è assunta proporzionalità diretta tra la popolazione e l'altezza degli edifici e a Manhattan sono presenti numerosi edifici alti.



dP	n° elementi	
	[ab/m]	[-]
0-1	1403	33.9
1-2	1427	34.5
2-3	571	13.8
3-4	305	7.4
4-5	206	5.0
> 5	224	5.4

Figura 3.2.3.2 - Istogramma delle classi di densità di popolazione e relativa tabella.

Si può osservare in Figura 3.2.3.3 la distribuzione spaziale dei valori di densità di popolazione, in cui gli elementi a maggiore densità hanno colore scuro, mentre quelli a minore densità hanno colore chiaro. Si ha densità maggiore soprattutto in due zone: a sud e a nord dell'area studiata. Infatti, in queste aree sono presenti molti grattacieli, che fanno incrementare notevolmente l'altezza della via, quindi la sua densità di popolazione.

In realtà, non disponendo di dati di popolazione per ogni singola via, è stata fatta questa assunzione della proporzionalità tra popolazione e altezza degli edifici, che tuttavia potrebbe non essere del tutto aderente alla realtà. Infatti, molti grattacieli ospitano perlopiù uffici, sono dunque popolati in particolari ore del giorno, non tutta la giornata, e dunque non si tratta di residenti. La popolazione potrebbe dunque essere distribuita diversamente, ma, non disponendo di altri dati, si ritiene che la proporzionalità tra altezze e popolazione sia verosimile.

Inoltre, osservando la Figura 3.2.3.3, si può facilmente immaginare che le aree più vulnerabili siano proprio quelle a densità maggiore.

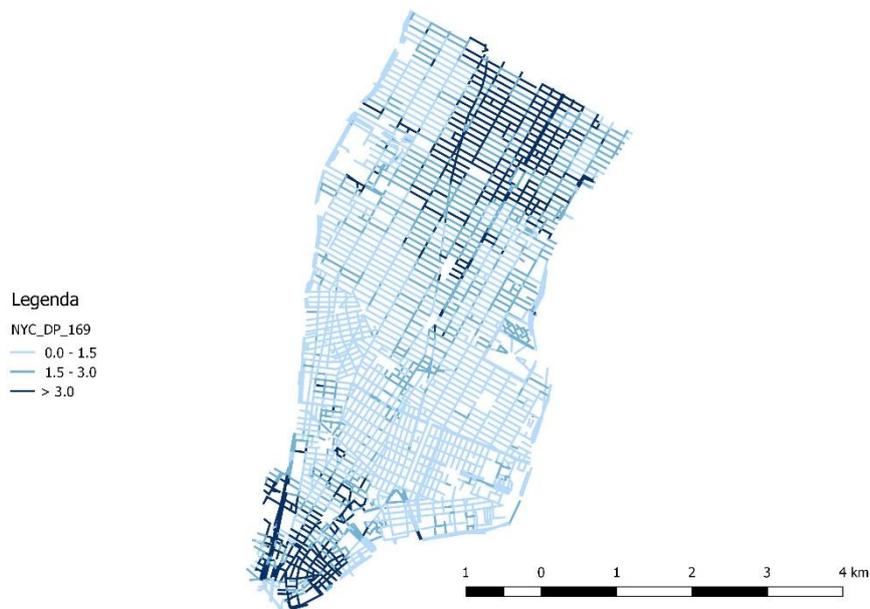


Figura 3.2.3.3 - Distribuzione spaziale dei valori di densità di popolazione

Una volta calcolata la densità di popolazione in ogni via, tramite l'equazione (1.43) si calcola, per ogni nodo del reticolo viario, la vulnerabilità. Inoltre, al variare della direzione del vento, si considera il nodo peggiore, a cui è legata la vulnerabilità massima, per quella direzione del vento. I valori di vulnerabilità massima al variare della direzione del vento sono riportati in Tabella 3.2.3.2.

Tabella 3.2.3.2 - Vulnerabilità massima al variare della direzione del vento, nelle due condizioni di rapporto tra concentrazione iniziale e di soglia pari a 10 e a 100.

dir [°]	Vulner. max [ab]	
	10	100
0	212724	294599
45	147009	215539
90	172034	227642
135	155841	205711
180	179822	260635
225	144948	235165
270	181027	243634
315	153400	224597

Si osserva che la direzione peggiore è 0° (ovvero nord) sia nel caso di rapporto tra concentrazione iniziale e concentrazione di soglia pari a 10, sia pari a 100. Nel primo caso, la sostanza tossica raggiunge circa **213000 persone**, mentre nel secondo caso essa raggiunge circa **295000 persone**.

Si può osservare visivamente la variazione di vulnerabilità massima al variare della direzione del vento in Figura 3.2.3.4.

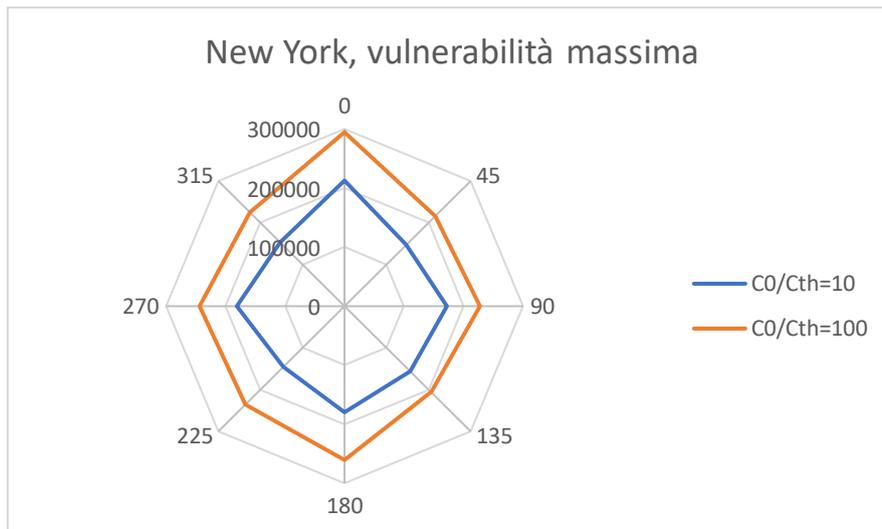


Figura 3.2.3.4 - Vulnerabilità massima al variare della direzione del vento. I valori di vulnerabilità sono riportati in numero di abitanti.

Si osserva che, in ogni condizione di vento, la vulnerabilità è sempre maggiore per concentrazioni più elevate di sostanza tossica.

A questo punto, si realizzano mappe di vulnerabilità del reticolo viario, ovvero mappe in cui si valuta la vulnerabilità legata a ogni nodo. Dunque, se si hanno N nodi, si considerano N situazioni diverse, per ognuna delle quali si ha il rilascio di sostanza tossica in un solo nodo i -esimo ($i = 1, \dots, N$) e si valuta il numero di abitanti interessati dal contagio legato proprio al nodo i -esimo. Pertanto, le mappe di vulnerabilità non mostrano la zona di influenza di ogni singolo nodo, ma soltanto la vulnerabilità legata a ognuno di essi.

In Figura 3.1.3.5 e Figura 3.1.3.6 si osservano le mappe di vulnerabilità della parte esaminata di Manhattan in tutti i casi considerati. Si nota che, in tutti i casi, le zone più vulnerabili sono quelle nord del reticolo, ovvero la parte della Midtown caratterizzata dalla presenza di un elevato numero di grattacieli, quindi da una maggiore densità di popolazione. La direzione peggiore del vento è il nord.

Inoltre, osservando la distribuzione spaziale dei nodi "rossi", ovvero quelli a partire dai quali la sostanza tossica contagia un maggior numero di persone, si può intuire quale sia la zona di influenza di ogni singolo nodo: se, ad esempio, il vento soffia da NE, la zona di influenza sarà quella immediatamente a SO del nodo sorgente.

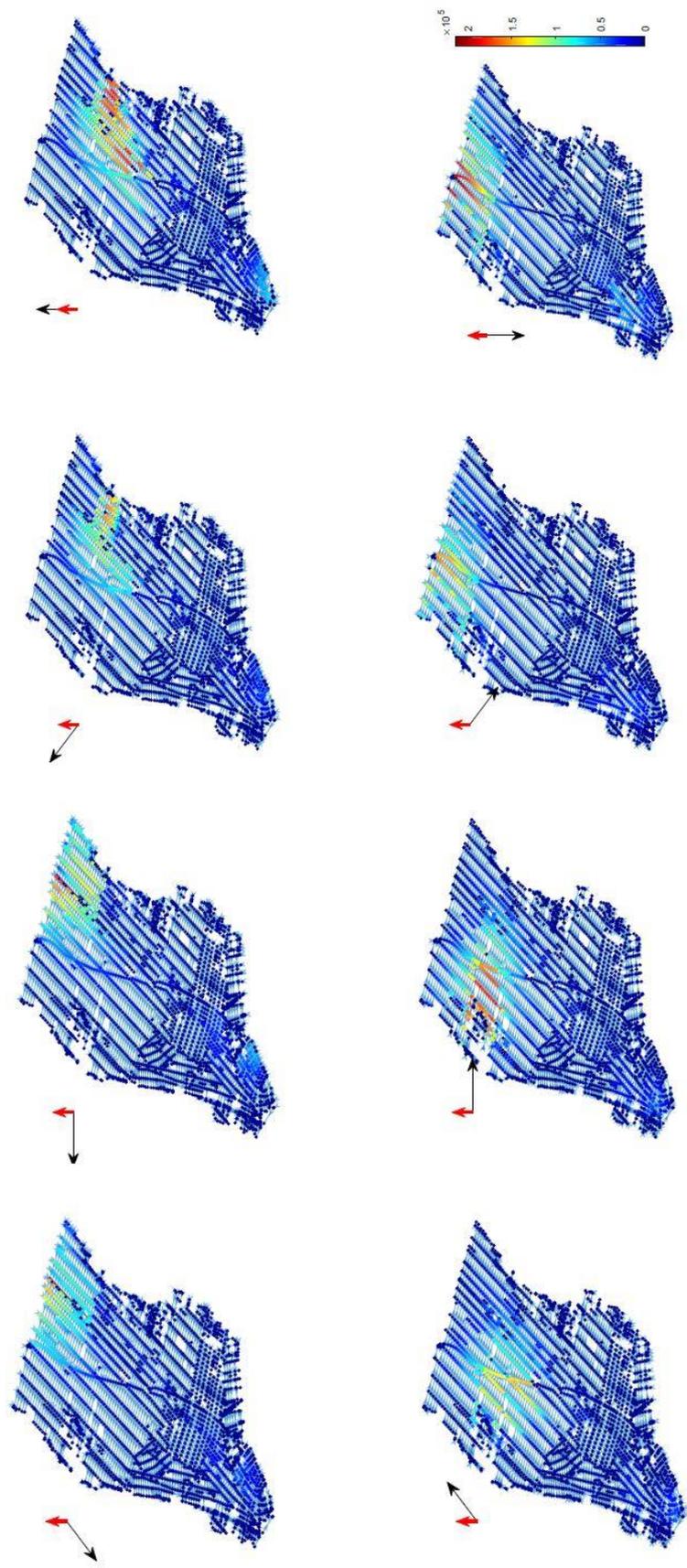


Figura 3.2.3.5 - Mappe di vulnerabilità per $C_0/C_{th} = 10$, al variare della direzione del vento, rappresentata dalla freccia nera in basso a sinistra per ogni immagine.

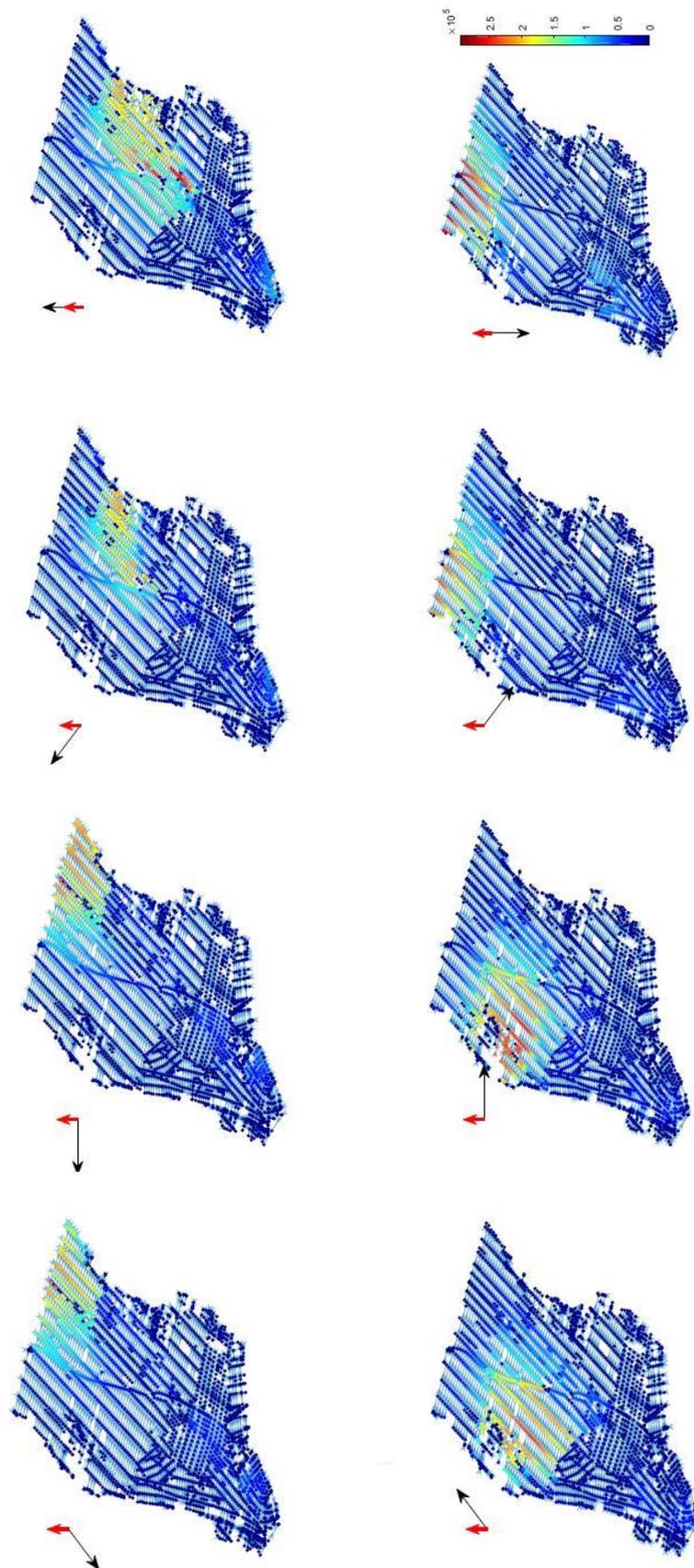


Figura 3.2.3.6 - Mappe di vulnerabilità per $C_0/C_{th} = 100$, al variare della direzione del vento, rappresentata dalla freccia nera in basso a sinistra per ogni immagine.

3.3. FIRENZE

Firenze, capoluogo e maggiore città della Toscana, è un centro artistico e culturale di importanza mondiale. Importante città commerciale nel tardo medioevo, per secoli è stata dominata dalla famiglia dei Medici, che ne hanno favorito l'attività culturale, rendendo Firenze protagonista indiscussa del Rinascimento.

Firenze è il luogo che ha fornito ispirazione ad artisti e architetti le cui opere sono presenti in ogni libro di storia dell'arte, tra cui, per citarne solo alcuni, Brunelleschi (che ha realizzato la cupola di Santa Maria del Fiore), Giotto (che ne ha realizzato il campanile), Michelangelo (celebre per il David, statua presente nella Galleria dell'Accademia) e Vasari (che ha realizzato il famoso corridoio Vasariano, che collega Palazzo Pitti a Palazzo Vecchio). I loro capolavori sono visitati ogni anno da numerosi turisti provenienti da ogni angolo del pianeta.

L'urbanistica della città è caratterizzata dalla presenza del centro storico medievale, con vie talvolta molto strette e tortuose, che si sviluppa principalmente sulla riva destra del fiume Arno. Le vie del centro storico hanno uno sviluppo principalmente N-S ed E-O. Al di fuori del centro storico, quartieri più recenti hanno vie più larghe e rettilinee con un orientamento NE-SO e NO-SE.

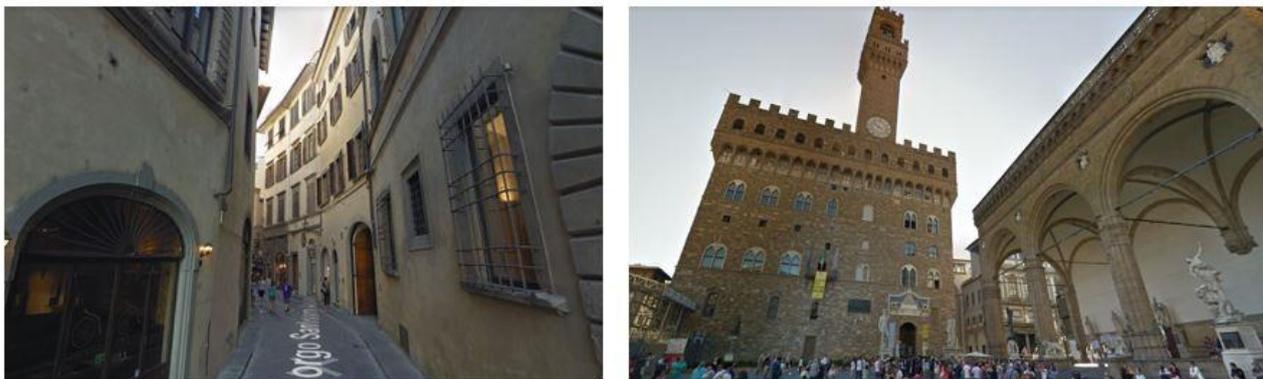


Figura 3.3.1 - Borgo Santissimi Apostoli a sinistra, Piazza della Signoria a destra

In Figura 3.3.1 a sinistra si osserva un esempio di via stretta del centro storico medievale, mentre a destra si osserva uno scorcio di Piazza della Signoria (con Palazzo Vecchio e la loggia dei Lanzi), importante punto di riferimento del centro città. Le immagini sono prese dalla funzione Street View di Google Maps.

La zona della città oggetto di studio è il centro, specificamente la parte delimitata a sud dal fiume Arno, a ovest da viali di circonvallazione, a nord dal torrente Mugnone e da una linea ferroviaria e infine a est da viali di circonvallazione. È incluso in questa zona il centro storico medievale, con le sue vie strette e con i suoi capolavori artistici e culturali.

3.3.1. GEOMETRIA DEL RETICOLO VIARIO

Le informazioni sul reticolo viario della parte studiata della città sono ricavate da due shapefile: quello delle strade (costituito da polilinee) e quello degli edifici (costituito da poligoni). Tutti gli shapefile utilizzati per Firenze hanno come sistema di riferimento EPSG: 3003, Monte Mario/Italy zone 1 e la loro rappresentazione grafica è stata effettuata tramite il software QGIS.

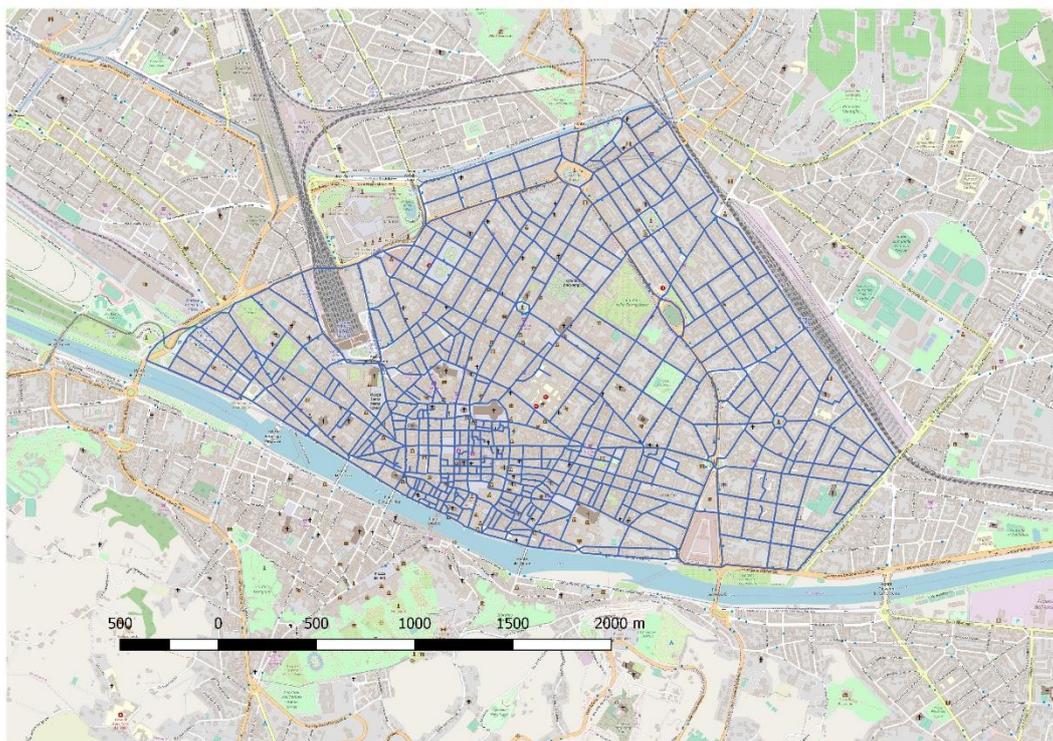


Figura 3.3.1.1 - Firenze, shape-file di polilinee

In Figura 3.2.1.1 si osserva lo shapefile di polilinee sovrapposto alla mappa. Esso contiene 1137 elementi, ognuno dei quali è riferito ad una via o ad una parte di essa. A ogni elemento è associato un ID.

In Figura 3.2.1.2 si osserva il secondo shapefile di partenza, che rappresenta gli edifici e porta con sé le informazioni geometriche sul reticolo viario. Esso è costituito da 17991 elementi, ognuno dei quali ha forma poligonale.

A partire da questi due shapefile, tramite le utilities, se ne ricava uno nuovo, costituito da segmenti, ognuno dei quali porta con sé le informazioni dei due shapefile di partenza (vedi paragrafo 2.1.2).

Lo shapefile così ottenuto ha 1199 elementi e, tra le informazioni che contiene, ci sono HD, HG, WD e WG, ovvero, nell'ordine, altezza destra e sinistra, larghezza destra e sinistra di ogni elemento. Questo shapefile viene ulteriormente modificato, poiché, per poter essere utilizzato tra gli input di SIRANE, deve avere i suddetti campi positivi.

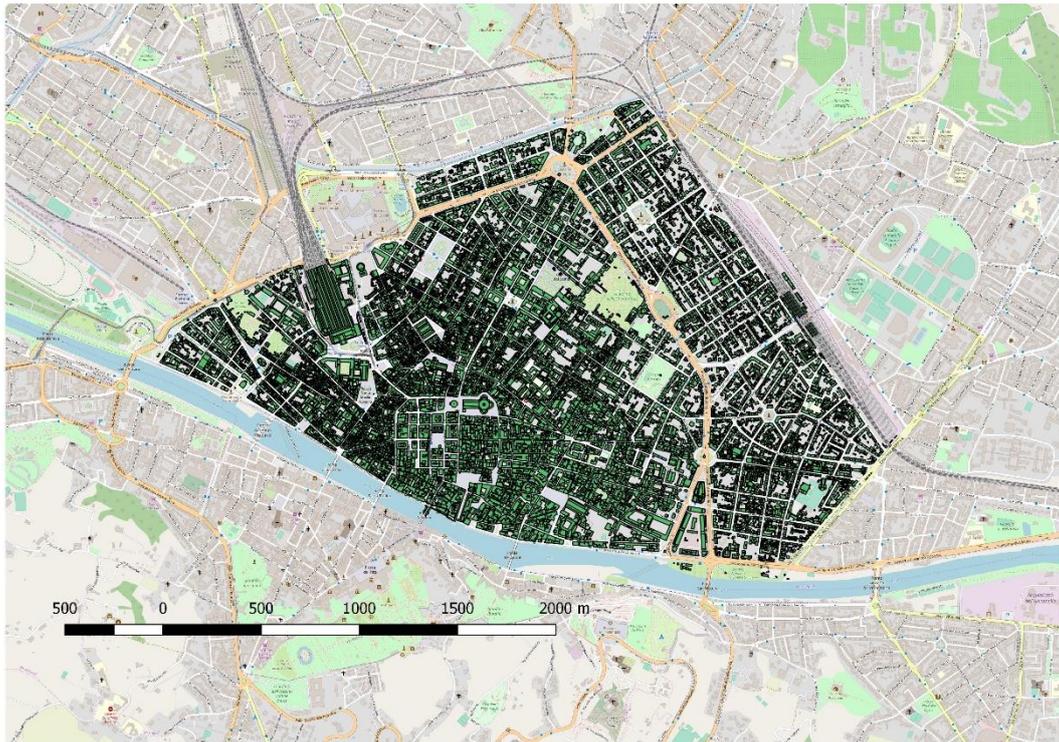


Figura 3.3.1.2 - Firenze, shapefile degli edifici

In Tabella 3.2.1.1 si può osservare il numero di elementi con campi negativi o nulli. Di questi, alcuni devono essere modificati (ad esempio, se il valore del campo è errato), dopodiché si eliminano tutti gli elementi rimanenti con almeno uno dei suddetti campi negativi o nulli (vedi 2.1.2).

Tabella 3.3.1.1 - Elementi con campi negativi o nulli

	0		<0		≤0	
	n° elem	%	n° elem	%	n° elem	%
HD	49	4.1	-	-	49	4.1
HG	44	3.7	-	-	44	3.7
WD	49	4.1	25	2.09	74	6.2
WG	46	3.8	23	1.92	69	5.8

In questo modo, lo shapefile che si ottiene dopo la modifica ha 1102 elementi, visibile in Figura 3.2.1.3.

Si nota che mancano le vie che costeggiano il fiume Arno (a sud) e il torrente Mugnone (a nord-ovest), parte dei viali di circonvallazione, alcune piazze particolarmente estese, le vie che costeggiano i giardini e alcune vie parallele alla linea ferroviaria (a nord-est).

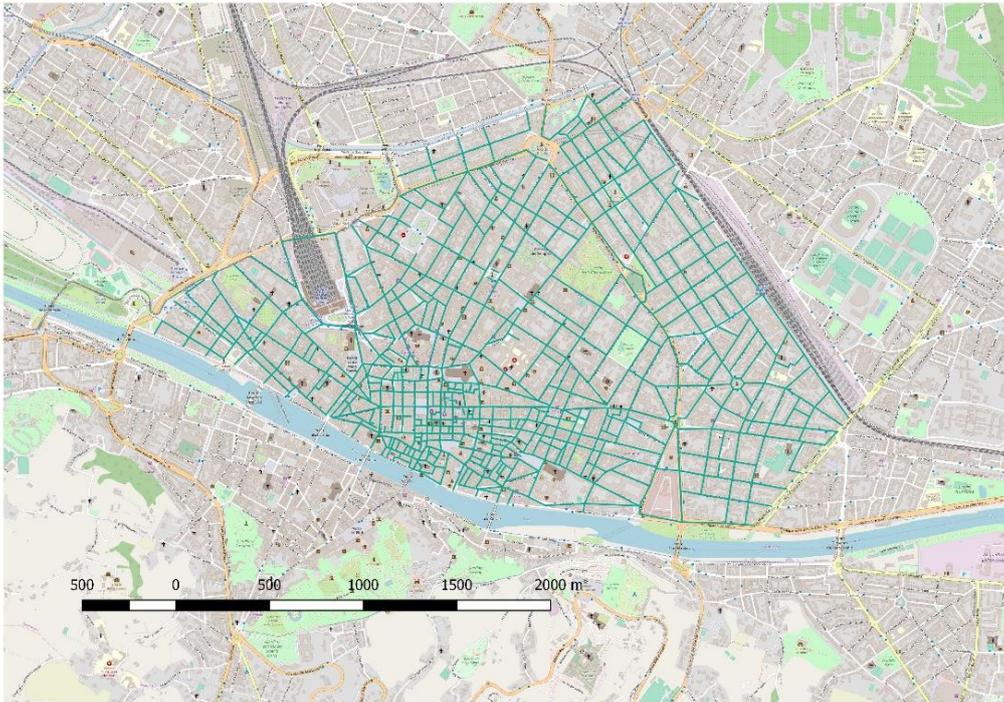


Figura 3.3.1.3 - Firenze, shapefile modificato

Si riportano ora gli istogrammi relativi ai campi H (altezze), W (larghezze) e H/W (rapporto tra altezza e larghezza) degli elementi dello shapefile modificato.

Altezze H degli street canyon

Nell'istogramma di Figura 3.2.1.4 sono riportati in ascissa le classi di altezze in metri, in ordinata il numero di elementi appartenenti ad ogni classe; in tabella è riportato il numero esatto di elementi.

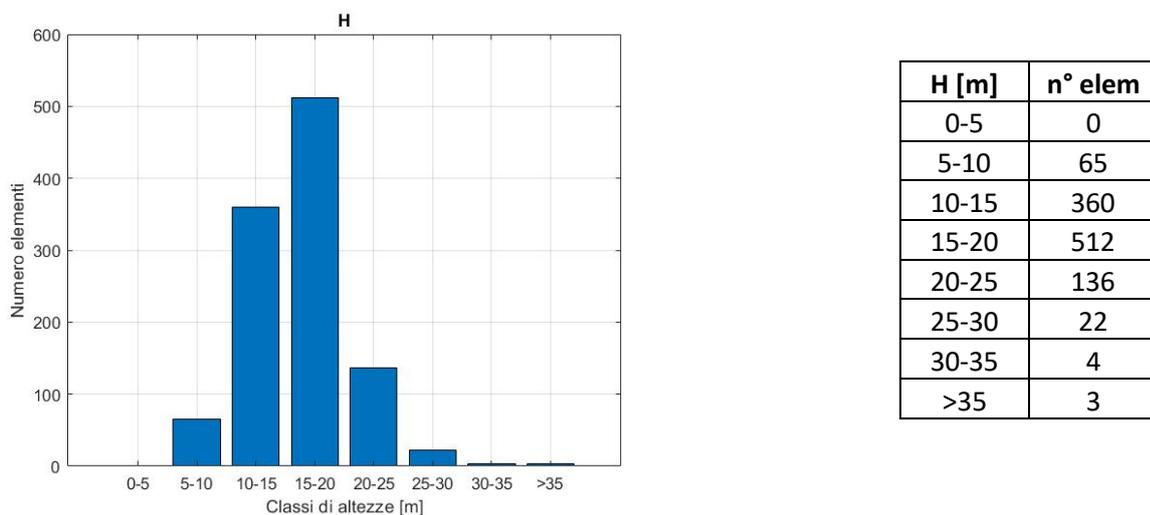
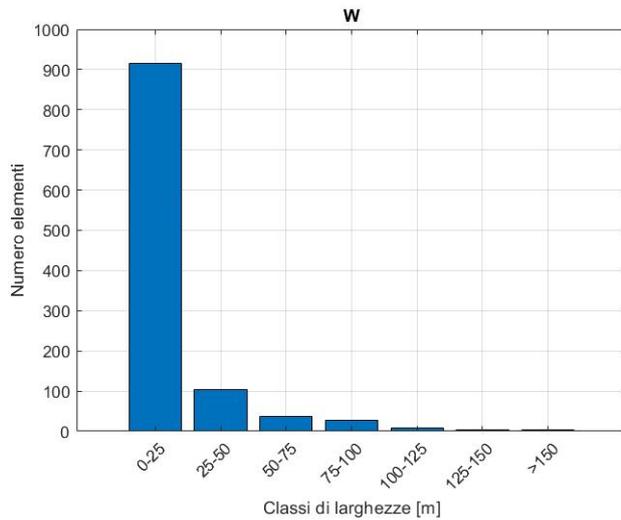


Figura 3.3.1.4 - Iistogramma e tabella delle classi di altezze H

Si nota che la classe più rappresentata delle altezze è l'intervallo 15 – 20 metri, che contiene quasi il 50% degli elementi. Sono praticamente assenti vie con altezze superiori a 30 metri (solo 7 elementi, meno dell'1%): tutto ciò è ragionevole, dato che si tratta quasi esclusivamente di un centro storico, con palazzi mai eccessivamente alti.

Larghezze W degli street canyon

Nell'istogramma di Figura 3.2.1.5 sono riportati in ascissa le classi di larghezze in metri, in ordinata il numero di elementi appartenenti ad ogni classe, in tabella è riportato il numero esatto di elementi.



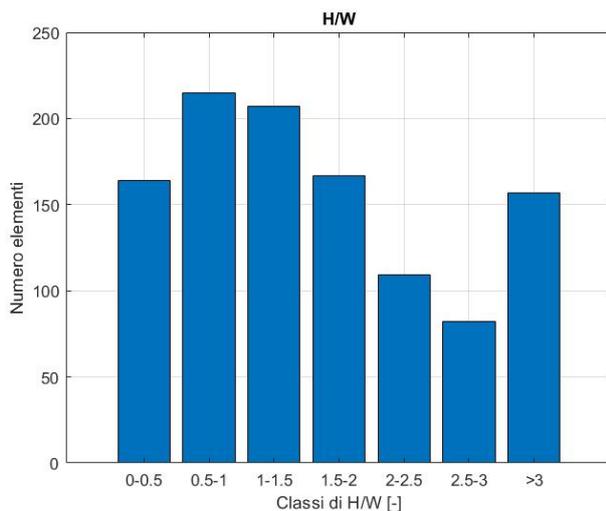
W [m]	n° elem
0-25	916
25-50	103
50-75	38
75-100	28
100-125	9
125-150	4
>150	3

Figura 3.3.1.5 – Iistogramma e tabella delle classi di larghezze W

Per quanto riguarda le larghezze, colpisce la netta predominanza di vie strette (alcune delle quali molto strette, anche addirittura pochi metri): oltre l'80 % degli elementi ha larghezza inferiore a 25 metri. Naturalmente, tutto ciò è ovvio, dato che si tratta di un centro storico, con edifici molto vicini tra loro.

Rapporto H/W tra altezza e larghezza degli street canyon

Nell'istogramma di Figura 3.2.1.6 sono riportati in ascissa le classi di H/W [-], in ordinata il numero di elementi appartenenti ad ogni classe, in tabella è riportato il numero esatto di elementi.



H/W [-]	n° elem
0-0.5	164
0.5-1	215
1-1.5	207
1.5-2	167
2-2.5	109
2.5-3	82
>3	157

Figura 3.3.1.6 - Iistogramma e tabella delle classi di H/W

Questo rapporto è molto più significativo dei singoli valori di altezza e larghezza: se, ad esempio, la via ha un alto valore di H/W vuol dire che essa è molto più alta che larga, pertanto le sostanze tossiche ivi presenti impiegheranno più tempo ad abbandonarla, mantenendo alta la loro concentrazione. Al contrario, un basso rapporto H/W favorisce una rapida diminuzione della concentrazione.

Si osserva che la classe più rappresentata è quella con rapporti H/W compresi tra 0.5 e 1, con circa il 20% del totale. Tuttavia, anche la classe più alta, quella con H/W superiore a 3, comprende molti elementi (circa il 15% del totale): ciò è dovuto al fatto che, trattandosi di un centro storico, le vie sono molto strette, per cui, nonostante gli edifici non siano molto alti, si hanno valori piuttosto elevati di H/W.

Inoltre, in Figura 3.3.1.7, si osserva la distribuzione spaziale dei valori di H/W. Si nota che i valori più elevati sono concentrati quasi esclusivamente nel centro storico, facilmente individuabile sulla mappa in quanto caratterizzato da un reticolo viario molto fitto, con isolati piccoli. Al contrario, la zona esterna ad esso (sempre parte del centro) ha isolati più grandi e vie più larghe, pertanto il rapporto H/W si abbassa.

In Figura 3.3.1.7, gli elementi con alto H/W sono rappresentati in colore scuro, mentre quelli con basso H/W in colore chiaro.

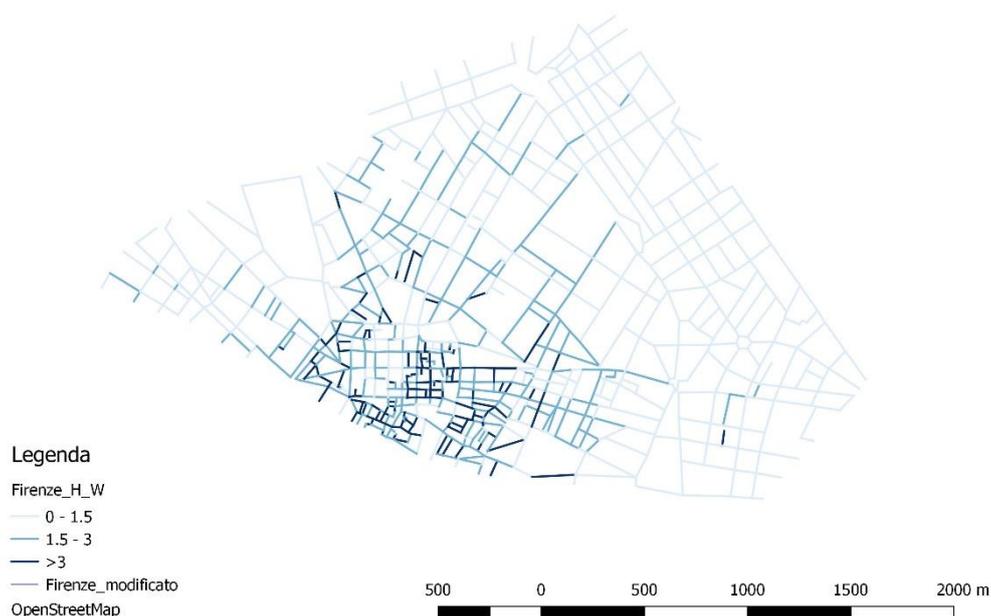


Figura 3.3.1.7 - Distribuzione spaziale delle classi di H/W

3.3.2. VELOCITÀ DEL VENTO NELLE VIE

Ai fini di questo studio, si vogliono ricavare le velocità del vento nelle vie U_{st} tramite SIRANE, a partire dai dati geometrici (contenuti nello shapefile) del reticolo viario, dai dati geografici (griglie, nel sistema di riferimento Monte Mario/Italy zone 1, che contengono il reticolo viario al loro interno) e dai dati meteo (velocità U e direzione ϕ del vento atmosferico, ovvero quello che soffia sulla città, al di sopra degli edifici).

Per quanto riguarda i **dati meteo**, sono stati considerati i seguenti 8 casi:

- Velocità del vento 5 m/s, direzione 45° (nord est – sud ovest)
- Velocità del vento 5 m/s, direzione 90° (est – ovest)
- Velocità del vento 5 m/s, direzione 135° (sud est – nord ovest)
- Velocità del vento 5 m/s, direzione 180° (sud – nord)
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 45°
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 90°
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 135°
- Velocità del vento 10 m/s, direzione 180°

I casi in cui la direzione del vento è di 225, 270, 315 e 360 gradi danno gli stessi risultati dei casi in cui si ha direzione del vento rispettivamente di 45, 90, 135 e 180 gradi.

ISTOGRAMMI DELLE CLASSI DI VELOCITA'

Si considerano, nel caso di velocità del vento pari a **5 m/s**, tre classi di velocità del vento nelle vie:

- 0 – 1,5 m/s
- 1,5 – 3 m/s
- >3 m/s

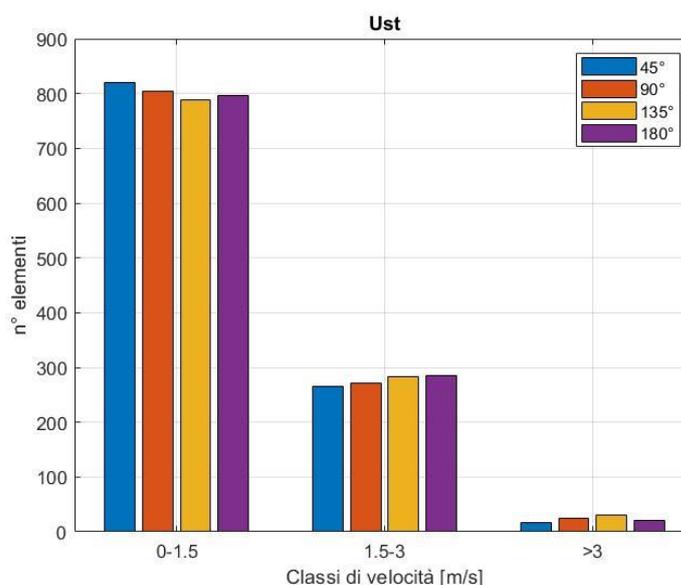


Figura 3.3.2.1 - Classi di U_{st} , per $U = 5$ m/s

In Figura 3.2.2.1 è riportato l'istogramma in cui si ha in ascissa le classi di velocità del vento nelle vie e in ordinata il numero di elementi (vie) per ogni classe e per ogni direzione del vento.

Si osserva che la classe di velocità del vento nelle vie più rappresentata è l'intervallo 0 – 1.5 m/s: dunque, nella maggior parte delle vie, la velocità del vento è molto inferiore alla velocità del vento che soffia sulla città, in questo caso 5 m/s.

In Tabella 3.3.2.1 si osservano i valori esatti del numero di elementi per ogni classe.

Tabella 3.3.2.1 - Classi di U_{st} , per $U = 5$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-1.5	820	805	788	796
1.5-3	266	272	284	285
>3	16	25	30	21

Al variare della direzione del vento, varia, anche se di poco, il numero di elementi appartenenti ad ogni classe di velocità. In particolare, si nota che la direzione nord ovest – sud est (135°) è quella per la quale ci sono più elementi con “alte” velocità del vento (classe >3 m/s) e meno elementi con velocità del vento più basse (0 – 1.5 m/s) rispetto alle altre direzioni.

Si possono osservare in Tabella 3.3.2.2 le percentuali di elementi appartenenti ad ogni classe, ricordando che in totale gli elementi (vie o tratti di esse) sono 1102.

Tabella 3.3.2.2 - Percentuali classi di U_{st} , per $U = 5$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-1.5	74.4	73.0	71.5	72.2
1.5-3	24.1	24.7	25.8	25.9
>3	1.5	2.3	2.7	1.9

Osservando gli ordini di grandezza, si nota che oltre il 70% di elementi è caratterizzato da basse velocità del vento (0 – 1.5 m/s), mentre le velocità intermedie caratterizzano circa il 25% degli elementi e infine quelle “alte”, ovvero velocità di poco superiori a 3 m/s, riguardano pochissimi elementi, tra l'1 e il 3%. Le differenze di percentuali tra le diverse direzioni del vento sono molto piccole.

Si riportano in Tabella 3.3.2.3 le velocità massime del vento nelle vie a seconda della direzione del vento.

Tabella 3.3.2.3 - U_{st} max, per $U = 5$ m/s

	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
Ust max	3.31	3.40	3.43	3.61

In ogni caso, la velocità del vento nelle vie è sempre inferiore a quella del vento che soffia sulla città. Inoltre, si osserva che le velocità massime riguardano solo una piccola percentuale di elementi, come visto nelle tabelle precedenti: dunque, nelle vie, la velocità del vento è molto più bassa di quella del vento che soffia sulla città.

Si considerano, nel caso di velocità del vento pari a **10 m/s**, quattro classi di U_{st} :

- 0 – 2 m/s
- 2 – 4 m/s
- 4 – 6 m/s
- >6 m/s

In Figura 3.1.2.2 è riportato l'istogramma in cui si ha in ascissa le classi di velocità del vento nelle vie e in ordinata il numero di elementi (vie) per ogni classe e per ogni direzione del vento.

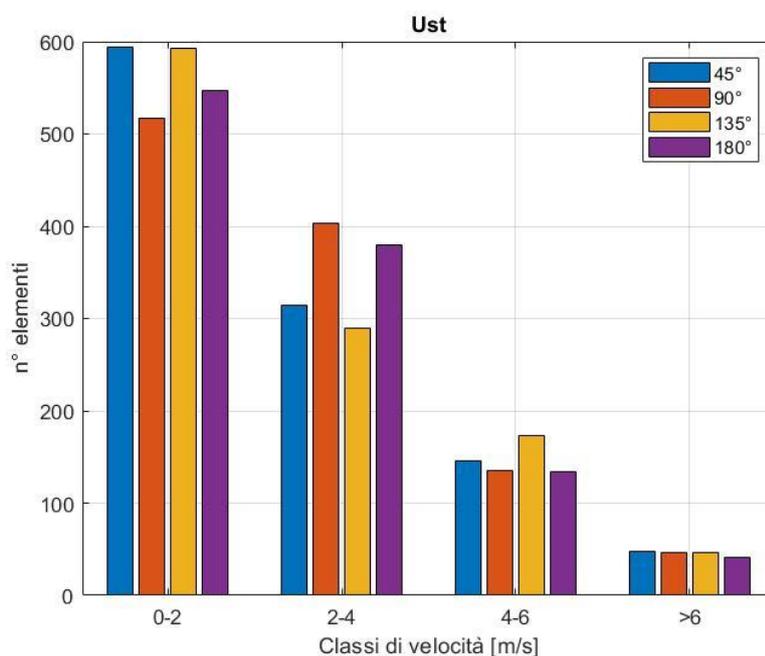


Figura 3.3.2.2 - Classi di U_{st} , per $U = 5$ m/s

Si osserva che le classi di velocità del vento nelle vie più rappresentate sono 0 – 2 m/s e 2 - 4 m/s, ovvero le classi di velocità più basse. Un numero inferiore di elementi è caratterizzato da velocità più “alte”, ovvero poco più di 6 m/s, velocità comunque più bassa rispetto a quella del vento che soffia sulla città (in questo caso, 10 m/s).

In Tabella 3.3.2.4 si osservano i valori esatti del numero di elementi per ogni classe.

Tabella 3.3.2.4 - Classi di U_{st} , per $U = 10$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-2	594	517	593	547
2-4	314	403	290	380
4-6	146	135	173	134
>6	48	47	46	41

Al variare della direzione del vento, varia il numero di elementi appartenenti ad ogni classe di velocità. In particolare, si nota che, per le direzioni 45 e 135 gradi, rispetto alle altre direzioni, ci sono più elementi nella classe di velocità più bassa, mentre, per quanto riguarda la classe più alta, la direzione 180 gradi è quella con meno elementi.

Si possono osservare in Tabella 3.3.2.5 le percentuali di elementi appartenenti ad ogni classe, ricordando che in totale gli elementi (vie o tratti di esse) sono 1102.

Tabella 3.3.2.5 - Percentuali di classi di U_{st} , per $U = 10$ m/s

Ust [m/s]	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
0-2	53.9	46.9	53.8	49.6
2-4	28.5	36.6	26.3	34.5
4-6	13.2	12.3	15.7	12.2
>6	4.4	4.3	4.2	3.7

Osservando gli ordini di grandezza, si nota che le prime due classi di velocità sono più rappresentate delle altre due, con percentuali tra il 45 e il 55% per la prima classe (0 – 2 m/s) e tra 26 e 36% per la seconda (2 – 4 m/s). La terza classe (velocità del vento tra 4 e 6 m/s) è meno rappresentata, con una percentuale di circa il 12 - 15%, mentre l'ultima, ovvero le velocità più alte, ha pochissimi elementi, circa il 4%.

Inoltre, si nota un andamento decrescente del numero di elementi all'aumentare della velocità del vento nelle vie per tutte le direzioni.

Si riportano in Tabella 3.3.2.6 le velocità U_{st} massime a seconda della direzione del vento.

Tabella 3.3.2.6 - U_{st} max, per $U = 10$ m/s

	Direzione vento			
	45°	90°	135°	180°
Ust max	7.08	7.27	7.33	7.71

Anche in questo caso, la velocità massima del vento nelle vie, in ogni direzione, rimane inferiore a quella del vento che soffia sulla città (10 m/s). Dunque, nelle vie della parte della città presa in esame, la velocità del vento è di molto inferiore a 10 m/s, dato che le classi di velocità più rappresentate sono quelle "basse".

DISTRIBUZIONE DELLA VELOCITA' NELLO SPAZIO

Di seguito è riportato il reticolo viario della parte di Firenze analizzata, in cui ogni via è colorata in modo diverso a seconda della velocità del vento che la percorre. Con i colori più scuri sono rappresentate velocità maggiori, con i colori più chiari velocità minori.

Si considerano gli 8 casi visti in precedenza, ovvero due diverse velocità del vento che soffia sulla città (5 e 10 m/s) e quattro direzioni del vento (45, 90, 135, 180 gradi).

In Figura 3.2.2.3, Figura 3.2.2.4, Figura 3.2.2.5 e Figura 3.2.2.6 si osserva la distribuzione di U_{st} per $U = 5$ m/s.

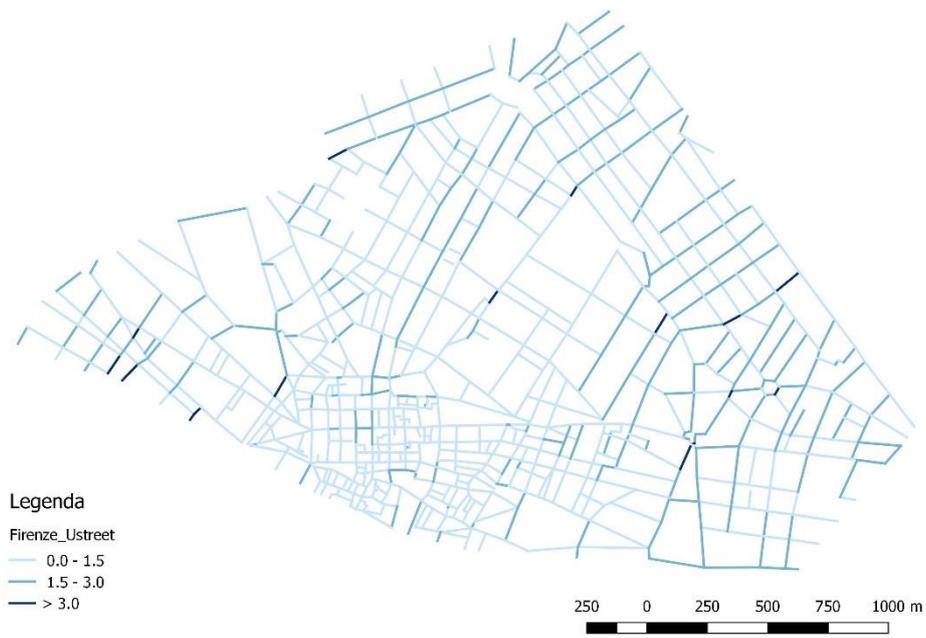


Figura 3.3.2.3 - U_{st} , per $U = 5 \text{ m/s}$, $\varphi = 45^\circ$

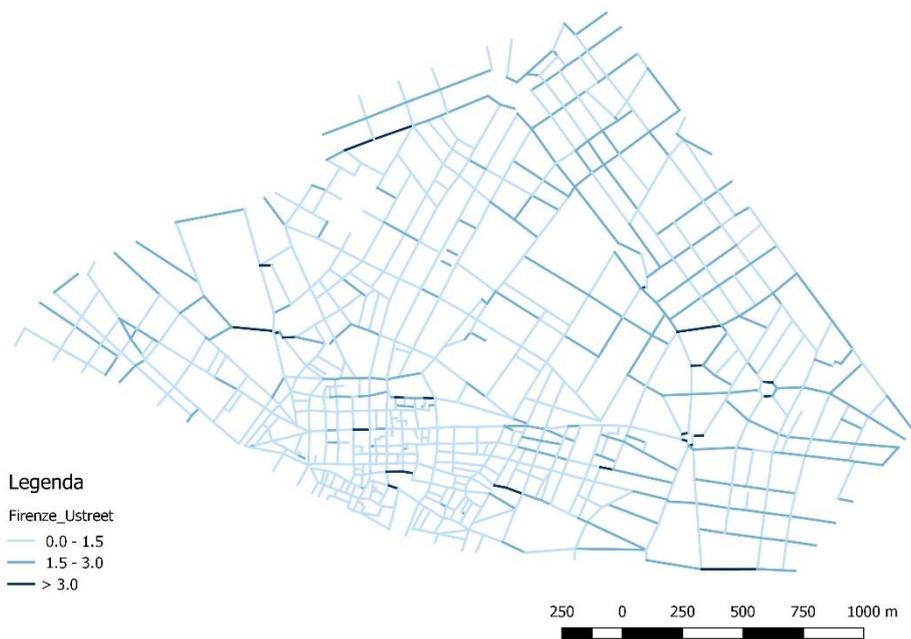


Figura 3.3.2.4 - U_{st} , per $U = 5 \text{ m/s}$, $\varphi = 90^\circ$



Figura 3.3.2.5 - U_{st} , per $U = 5 \text{ m/s}$, $\varphi = 135^\circ$



Figura 3.3.2.6 - U_{st} , per $U = 5 \text{ m/s}$, $\varphi = 180^\circ$

Si osserva che il centro storico è caratterizzato da valori più bassi di U_{st} , essendo costituito da vie con alto valore di H/W . Le vie con maggiore U_{st} hanno direzione vicina a quella del vento e si trovano quasi esclusivamente al di fuori del centro storico. Da notare, inoltre, che nel centro storico le vie hanno orientamento N-S ed E-O, mentre al di fuori si ha orientamento NO-SE e NE-SO.

In Figura 3.3.2.7, Figura 3.3.2.8, Figura 3.3.2.9 e Figura 3.3.2.10 si osserva la distribuzione di U_{st} per $U=10$ m/s.



Figura 3.3.2.7 - U_{st} , per $U = 10$ m/s, $\varphi = 45^\circ$

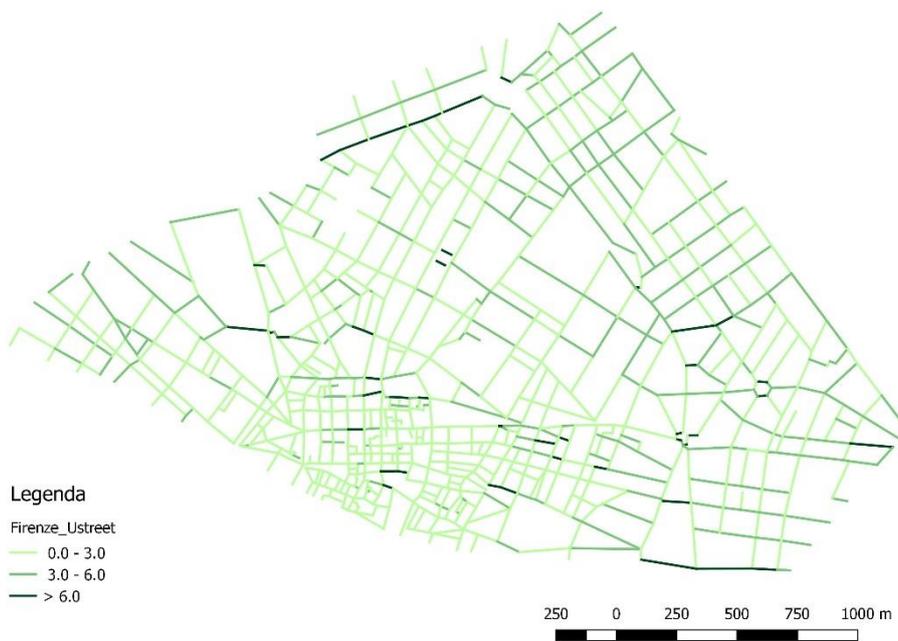


Figura 3.3.2.8 - U_{st} , per $U = 10$ m/s, $\varphi = 90^\circ$

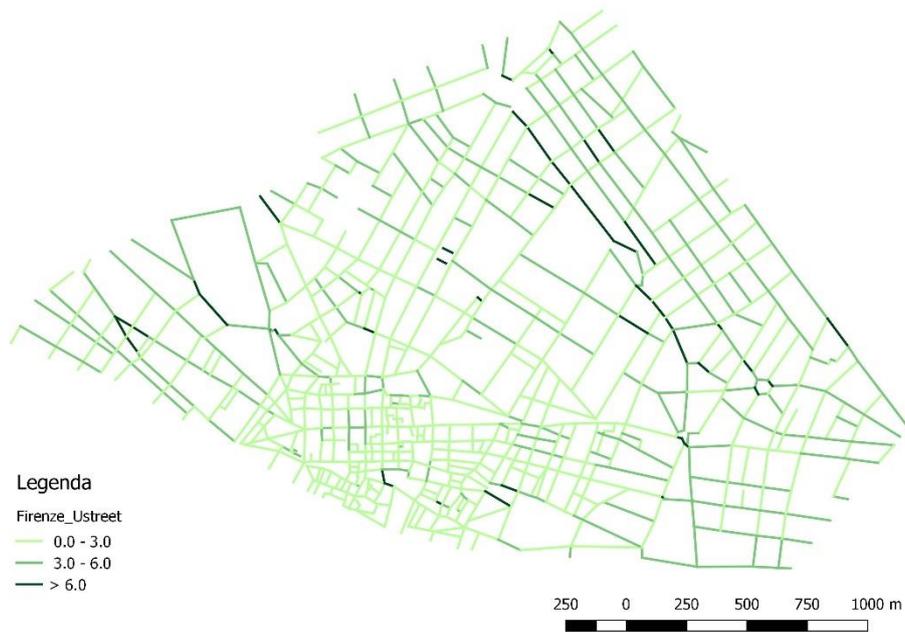


Figura 3.3.2.9 - U_{st} , per $U = 10 \text{ m/s}$, $\varphi = 135^\circ$



Figura 3.3.2.10 - U_{st} , per $U = 10 \text{ m/s}$, $\varphi = 180^\circ$

Per $U = 10 \text{ m/s}$, si osserva una situazione qualitativamente simile a quella per $U = 5 \text{ m/s}$: U_{st} minori nel centro storico e, a seconda della direzione del vento, U_{st} maggiori per le vie al di fuori di esso.

3.3.3. VULNERABILITÀ

Per il calcolo della vulnerabilità, sono stati considerati due casi:

- $C_0/C_{th} = 10$, ovvero la concentrazione iniziale della sostanza tossica nel nodo sorgente C_0 è 10 volte la concentrazione di soglia C_{th} , al di sotto della quale gli effetti della sostanza tossica sono trascurabili;
- $C_0/C_{th} = 100$.

Per ognuno di questi casi, sono state considerate 8 direzioni del vento: 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315, 360 gradi.

La vulnerabilità è legata alla densità di popolazione in ogni via (a sua volta legata al numero di piani, quindi all'altezza degli edifici che si affacciano sulla via considerata) e alla sua lunghezza contaminata, come mostrato nel paragrafo 1.3.

Il primo passo consiste nel calcolare la popolazione dell'area di studio, a partire dai dati disponibili sul quartiere 1 della città. Infatti, nota area e popolazione del quartiere 1 di Firenze e nota l'area di studio, tramite proporzione si ottiene la popolazione dell'area di studio.

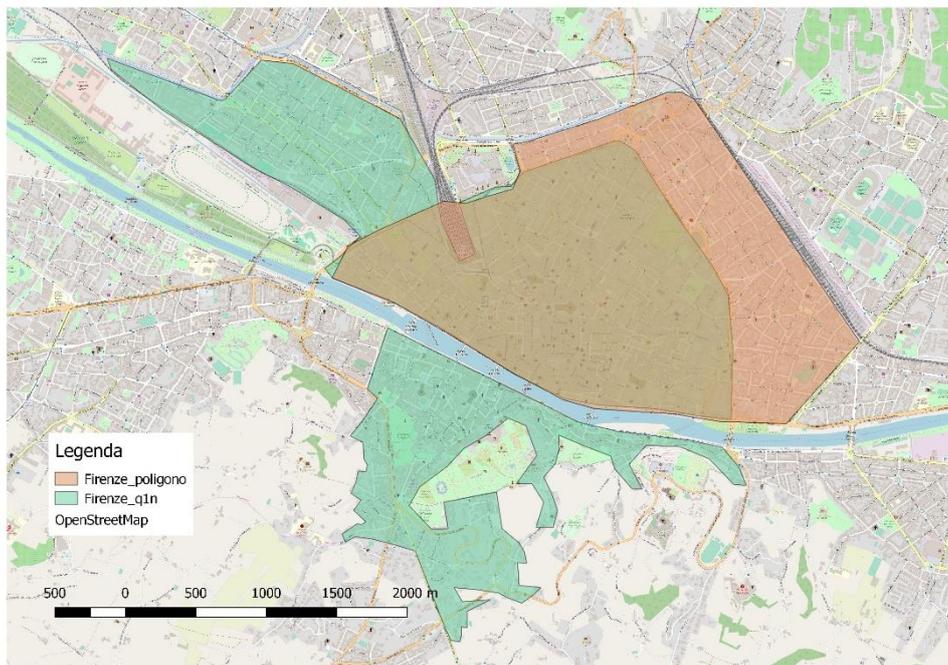


Figura 3.3.3.1 - Area di studio (in arancio) e quartiere 1 di Firenze (in verde). Si osserva che essi si sovrappongono nel centro cittadino.

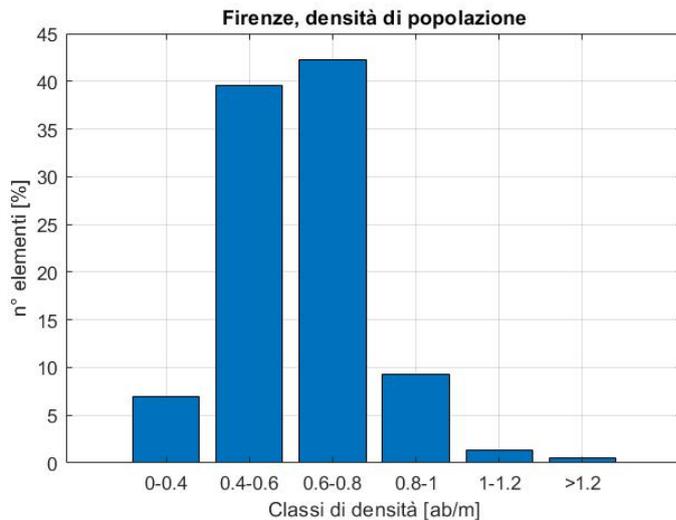
In Figura 3.3.3.1 si osserva l'area presa in esame, che è parzialmente sovrapposta al quartiere 1. Si osserva che quest'ultimo comprende parti della città situate in collina, a sud del fiume Arno, aree che, verosimilmente, sono caratterizzate da una minore densità di popolazione. Tuttavia, per il calcolo della popolazione dell'area di studio, non si è tenuto conto di ciò, poiché dati più dettagliati non sono disponibili.

Una volta calcolata la popolazione dell'area di studio (vedi Tabella 3.3.3.1), tramite l'equazione (1.41) si calcola il valore di A_p , che in questo caso vale $173.3 \text{ m}^2/ab$.

Tabella 3.3.3.1 - Area e popolazione del quartiere 1 di Firenze e della zona di studio

	A	P
	[m ²]	[ab]
Aq1	8.92E+06	67170
Atot	7.09E+06	53439

Tramite le equazioni (1.38) e (1.42) si calcolano popolazione e densità di ogni singola via. Si possono dividere in classi i valori di densità di popolazione, per capire quali sono più ricorrenti.



dP	n° elementi		
	[ab/m]	[-]	[%]
0-0.4	77	7.0	
0.4-0.6	436	39.6	
0.6-0.8	466	42.3	
0.8-1	102	9.3	
1-1.2	15	1.4	
> 1.2	6	0.5	

Figura 3.3.3.2 - Istogramma delle classi di densità di popolazione e relativa tabella

In Figura 3.3.3.2 si osserva che le classi di densità di popolazione più ricorrenti nell'area di studio sono 0.4-0.6 e 0.6-0.8 ab/m, con rispettivamente il 39.6 e il 42.3% degli elementi. Si tratta di valori relativamente bassi: infatti, nell'area di studio è presente il centro città, che non ha edifici molto alti, malgrado la ridotta larghezza delle vie le renda effettivamente degli street canyon.

Si può rappresentare tramite mappa la distribuzione della densità di popolazione nell'area studiata. In Figura 3.3.3.3 sono riportati in colore scuro gli elementi caratterizzati da elevata densità, in colore chiaro quelli con densità minore. Si osserva che la maggiore densità si ha nel centro storico, dove gli edifici sono leggermente più alti di quelli al di fuori di esso, nonostante i valori assoluti non siano comunque alti. Dunque, con questa distribuzione, si può immaginare che la zona della città più vulnerabile sia proprio il centro storico.

Mediante le assunzioni fatte, ovvero ipotizzando la densità di popolazione direttamente legata all'altezza degli edifici, si ha la distribuzione di popolazione vista in figura, ma, non avendo a disposizione dati più dettagliati sulle vie esaminate, non è possibile sapere se essa corrisponda alla realtà. Infatti, il centro storico di Firenze è pieno di musei e di uffici, luoghi che in alcune ore del giorno sono sicuramente molto affollati, ma non si tratta di residenti. In ogni caso, non avendo dati a riguardo, si assume valida l'ipotesi di proporzionalità tra densità e altezza degli edifici.



Figura 3.3.3.3 - Distribuzione spaziale della densità di popolazione

Una volta calcolata la densità di popolazione in ogni via, tramite l'equazione (1.43) si calcola, per ogni nodo del reticolo viario, la vulnerabilità. Inoltre, al variare della direzione del vento, si considera il nodo peggiore, a cui è legata la vulnerabilità massima, per quella direzione del vento. I valori di vulnerabilità massima al variare della direzione del vento sono riportati in Tabella 3.3.3.2.

Tabella 3.3.3.2 - Vulnerabilità massima al variare della direzione del vento, nelle due condizioni di rapporto tra concentrazione iniziale e di soglia pari a 10 e a 100.

dir [°]	Vulner. max [ab]	
	10	100
0	2231	7039
45	6147	10805
90	2593	6152
135	5256	9751
180	2329	5480
225	4953	10280
270	2725	5686
315	4941	10184

Si osserva che la direzione peggiore è 45° (ovvero nord-est) sia nel caso di rapporto tra concentrazione iniziale e concentrazione di soglia pari a 10, sia pari a 100. Nel primo caso, la sostanza tossica raggiunge circa **6000 persone**, mentre nel secondo caso essa raggiunge circa **11000 persone**.

Si può osservare visivamente la variazione di vulnerabilità massima al variare della direzione del vento in Figura 3.3.3.4.

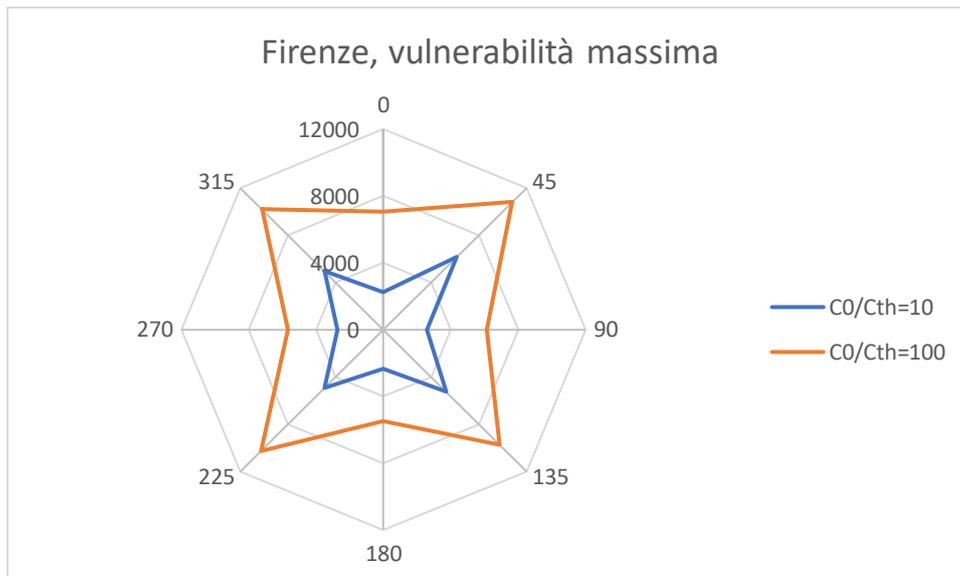


Figura 3.3.3.4 - Vulnerabilità massima al variare della direzione del vento. I valori di vulnerabilità sono riportati in numero di abitanti.

Si osserva che, in ogni condizione di vento, la vulnerabilità è sempre maggiore per concentrazioni più elevate di sostanza tossica.

A questo punto, si realizzano mappe di vulnerabilità del reticolo viario, ovvero mappe in cui si valuta la vulnerabilità legata a ogni nodo. Dunque, se si hanno N nodi, si considerano N situazioni diverse, per ognuna delle quali si ha il rilascio di sostanza tossica in un solo nodo i -esimo ($i = 1, \dots, N$) e si valuta il numero di abitanti interessati dal contagio legato proprio al nodo i -esimo. Pertanto, le mappe di vulnerabilità non mostrano la zona di influenza di ogni singolo nodo, ma soltanto la vulnerabilità legata a ognuno di essi.

In Figura 3.1.3.5 e Figura 3.1.3.6 si osservano le mappe di vulnerabilità della parte esaminata di Firenze in tutti i casi considerati. Si nota che, in tutti i casi, la zona più vulnerabile è il centro storico e la parte immediatamente a nord di esso. La direzione peggiore del vento è nord-est.

Inoltre, osservando la distribuzione spaziale dei nodi "rossi", ovvero quelli a partire dai quali la sostanza tossica contagia un maggior numero di persone, si può intuire quale sia la zona di influenza di ogni singolo nodo: se, ad esempio, il vento soffia da NE, la zona di influenza sarà quella immediatamente a SO del nodo sorgente.

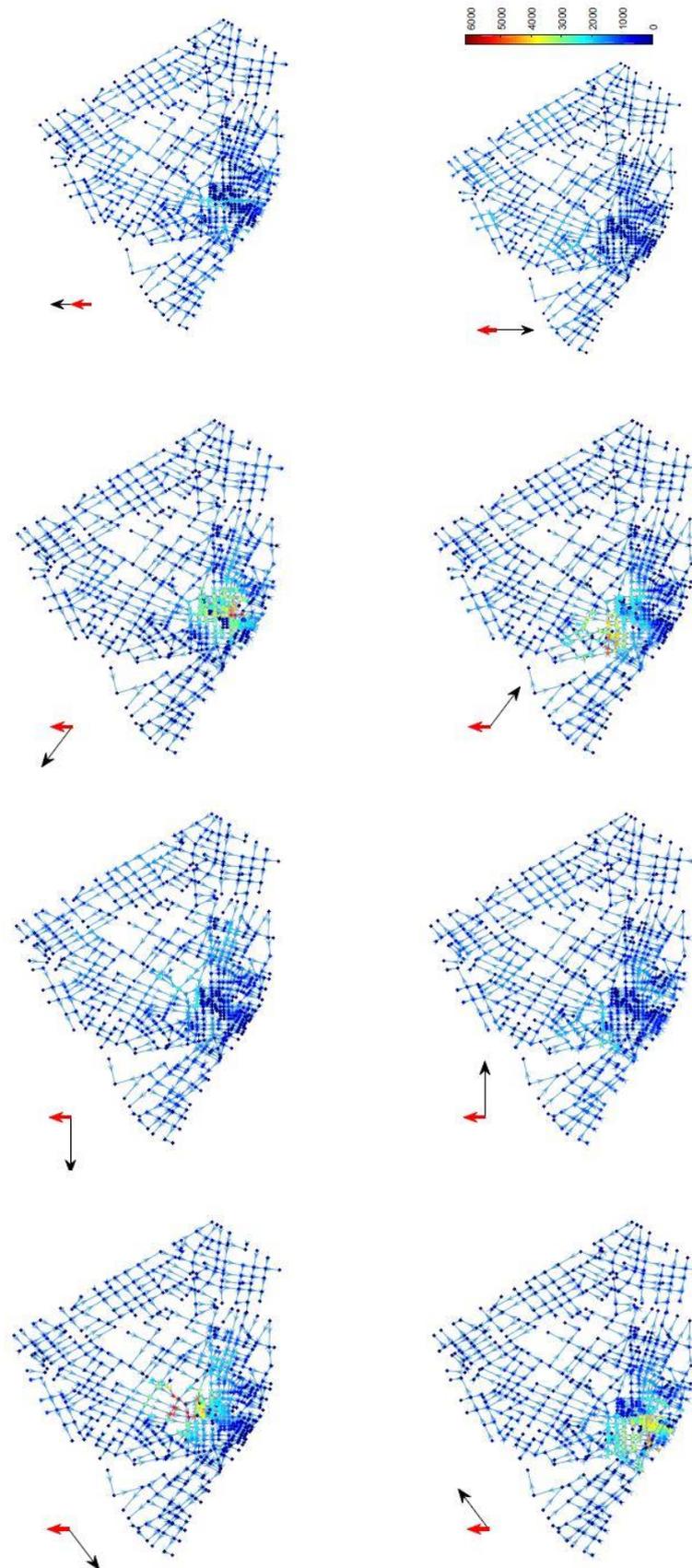


Figura 3.3.3.5 - Mappe di vulnerabilità per $C_0/C_{th} = 10$, al variare della direzione del vento, rappresentata dalla freccia nera in basso a sinistra per ogni immagine.

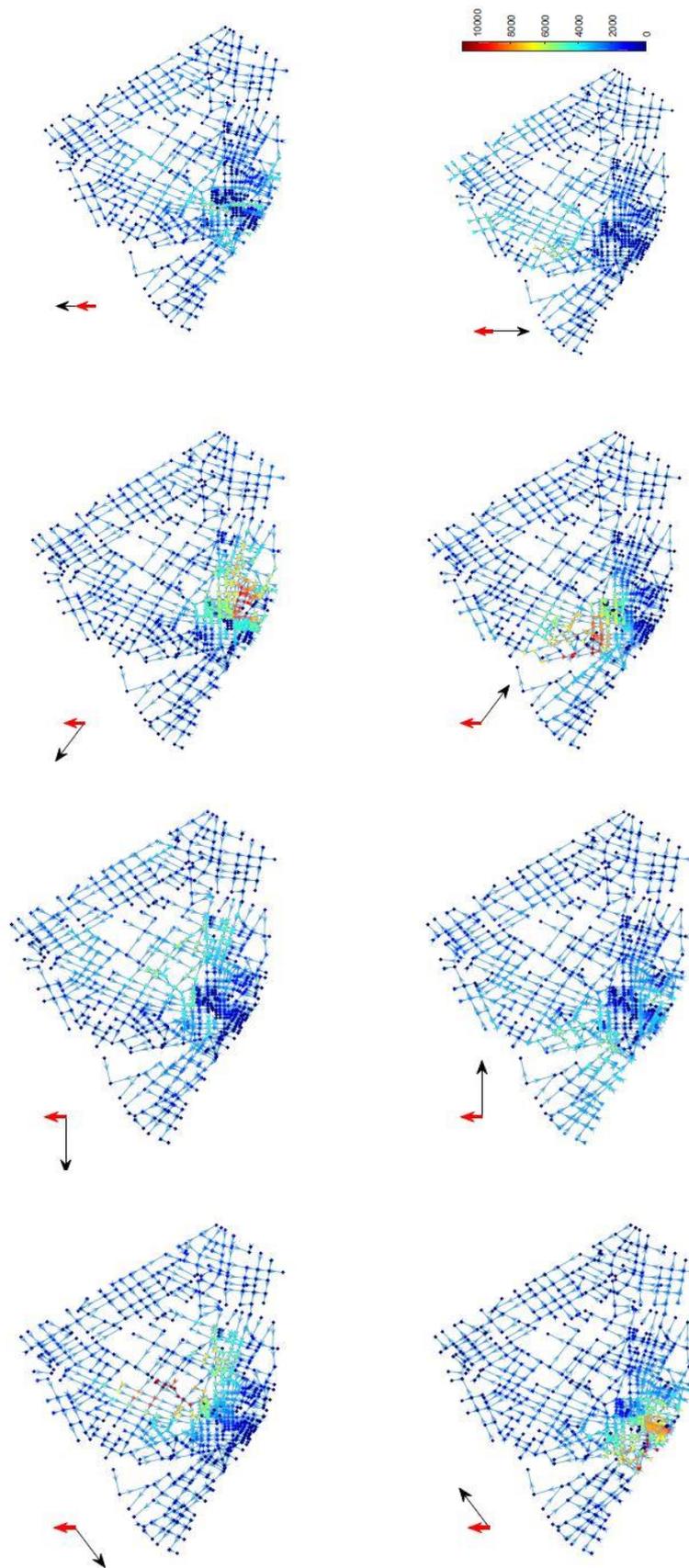
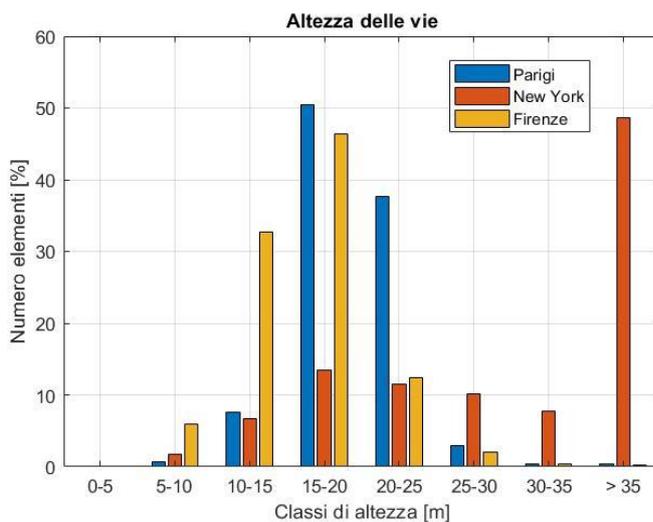


Figura 3.3.3.6 - Mappe di vulnerabilità per $C_0/C_{th} = 100$, al variare della direzione del vento, rappresentata dalla freccia nera in basso a sinistra per ogni immagine.

CONCLUSIONI

Dopo aver analizzato nel dettaglio il centro di tre città, di cui due europee e una nordamericana, emergono importanti differenze tra di esse nell'urbanistica e nella geometria delle vie, aspetti che influenzano notevolmente la loro vulnerabilità nei confronti di una sostanza tossica che si diffonde al loro interno.

Il primo aspetto importante che emerge da questo studio è la differenza tra le città prese in esame nell'**altezza degli edifici**: il centro di New York è infatti caratterizzato da un elevato numero di edifici alti e grattacieli, mentre il centro di Parigi e di Firenze hanno edifici più bassi. Si tratta di una importante differenza tra le grandi città del nord America e dell'Europa: le prime, essendo più recenti, non hanno un centro storico, bensì nel loro centro sono presenti molti edifici alti. Oltre a New York, altri esempi di questo tipo di urbanistica sono Chicago, Los Angeles e Toronto. In Europa, invece, ci sono i centri storici, più o meno recenti, con edifici principalmente bassi. Anche in città in cui sono presenti grattacieli, come ad esempio il centro di Londra, essi sono in numero inferiore e sono più bassi di quelli del nord America.



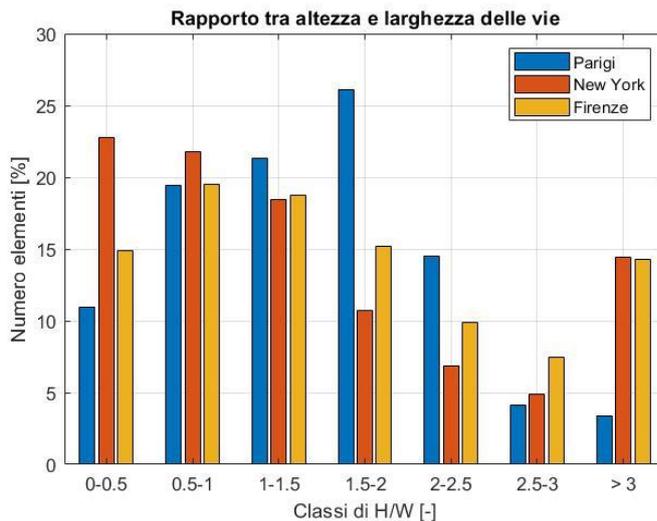
Altezza [m]	Numero elementi [%]		
	Parigi	NYC	Firenze
0-5	0.0	0.05	0.0
5-10	0.7	1.8	5.9
10-15	7.6	6.7	32.7
15-20	50.4	13.5	46.5
20-25	37.6	11.5	12.3
25-30	2.9	10.1	2.0
30-35	0.4	7.7	0.4
> 35	0.3	48.6	0.3

Figura C.1 - Istogramma rappresentante l'altezza delle vie e relativa tabella

In Figura C.1 si osserva la differenza di altezza delle vie tra le città studiate. Emerge un'enorme differenza tra New York, dove quasi il 50% degli elementi viari ha altezze superiori a 35 metri, e Parigi e Firenze, in cui gli elementi con altezze superiori a 35 metri sono molto meno dell'1%. Si nota inoltre che a Parigi ci sono in media edifici leggermente più alti rispetto a Firenze.

Questo confronto sulle altezze è molto importante, in quanto si è assunto che la densità di popolazione sia direttamente proporzionale all'altezza delle vie e la vulnerabilità dipende proprio dalla densità. Si può facilmente intuire che a New York la densità di popolazione (quindi anche la vulnerabilità) sia molto maggiore rispetto alle due città europee e che la densità di Parigi (quindi anche la sua vulnerabilità) sia leggermente superiore a quella di Firenze.

Un altro aspetto geometrico in cui emergono differenze tra le città studiate è il **rapporto tra l'altezza delle vie e la loro larghezza**. Si nota che i valori alti sono molto frequenti a Firenze e a New York, mentre essi sono poco frequenti a Parigi. Ciò accade poiché a Firenze è presente il centro storico medievale, caratterizzato da vie molto strette: nonostante gli edifici non siano molto alti, le vie strette fanno sì che il rapporto tra altezza e larghezza sia alto. A New York questo accade in quanto sono presenti grattacieli. A Parigi, invece, in seguito alla costruzione ottocentesca di larghi viali, non è presente il centro storico medievale, pertanto ci sono vie larghe e palazzi non molto alti, così il rapporto tra altezza e larghezza delle vie è generalmente basso.



H/W	Numero elementi [%]		
	Parigi	NYC	Firenze
[-]			
0-0.5	11.0	22.8	14.9
0.5-1	19.4	21.8	19.5
1-1.5	21.3	18.5	18.8
1.5-2	26.1	10.7	15.2
2-2.5	14.5	6.9	9.9
2.5-3	4.2	4.9	7.4
>3	3.4	14.5	14.2

Figura C.2 - Istogramma rappresentante il rapporto tra altezza e larghezza delle vie e relativa tabella

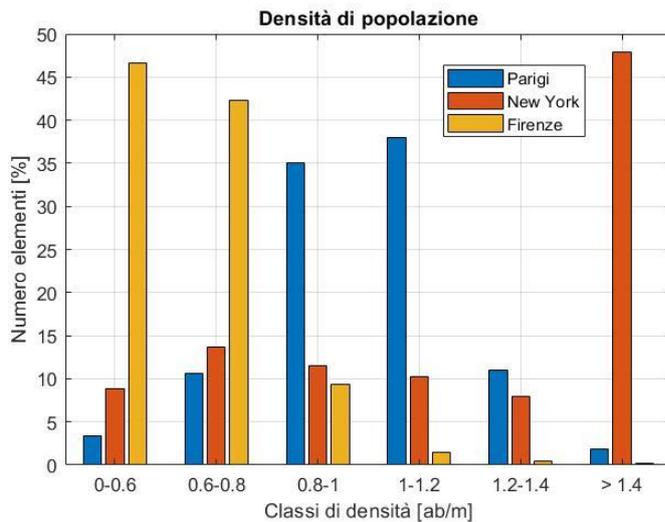
In Figura C.2 si osserva che un alto rapporto è frequente a Firenze e a New York, dove quasi il 15% degli elementi viari ha un rapporto superiore a 3. A Parigi, esso riguarda poco più del 3% di elementi.

Questa caratteristica geometrica è molto rilevante nel calcolo della velocità del vento nelle vie, in cui si ha velocità maggiore quando il rapporto tra altezza e larghezza delle vie è minore. Essa influisce inoltre sulla velocità di scambio verticale: un alto rapporto implica una minor dispersione della sostanza tossica verso l'atmosfera, pertanto essa rimane nella via e la concentrazione di sostanza tossica decresce meno rapidamente.

Tuttavia, poiché nel calcolo della concentrazione si esegue il rapporto tra velocità del vento nella via e velocità di scambio verticale, questo rapporto influisce poco sul calcolo della vulnerabilità, in cui conta molto di più il valore dell'altezza delle vie, il quale, come detto pocanzi, influenza la densità di popolazione, quindi, appunto, la vulnerabilità.

Dunque, nel calcolo della vulnerabilità, poiché conta molto di più l'altezza rispetto al rapporto tra altezza e larghezza, si osserva che le città nordamericane sarebbero tendenzialmente molto più vulnerabili di quelle europee. Ciò se si ipotizza la densità di popolazione, da cui la vulnerabilità dipende, proporzionale all'altezza degli edifici.

La **densità di popolazione**, qui calcolata come numero di abitanti a metro di lunghezza della via, rispecchia fedelmente i valori di altezza nelle vie, come si può osservare confrontando Figura C.1 e Figura C.3. Infatti, a New York si hanno valori molto elevati di densità, in cui quasi il 50% di elementi viari ha densità superiore a 1.4 ab/m. A Firenze e Parigi, questo valore di densità caratterizza molto meno del 5% di elementi.



Densità	Numero elementi [%]		
[ab/m]	Parigi	NYC	Firenze
0-0.6	3.4	8.8	46.6
0.6-0.8	10.6	13.7	42.3
0.8-1	35.0	11.5	9.3
1-1.2	38.0	10.3	1.4
1.2-1.4	11.0	8.0	0.4
> 1.4	1.9	47.9	0.2

Figura C.3 - Istogramma rappresentante la densità di popolazione viaria e rispettiva tabella

Inoltre, si osserva che la densità di Parigi è leggermente più alta di quella di Firenze. È facile, tramite Figura C.3, comprendere che la vulnerabilità di New York è molto maggiore delle altre due città e che la vulnerabilità di Parigi è leggermente maggiore di quella di Firenze.

A questo punto, si introducono i diagrammi di **vulnerabilità**, in cui essa è rappresentata al variare della direzione del vento. Si considera che 0° rappresenta il nord e 90° rappresenta l'est. Come visto nei capitoli precedenti, sono state considerate due diverse condizioni iniziali per quanto riguarda la concentrazione iniziale: nel primo caso, essa è 10 volte maggiore del valore di soglia, mentre nel secondo caso è 100 volte maggiore.

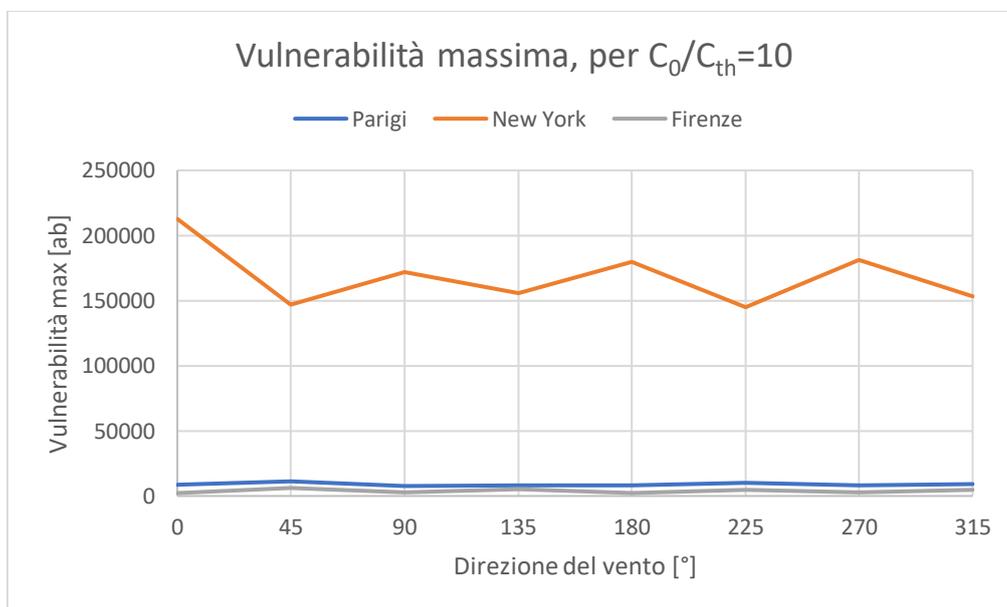


Figura C.4 - Vulnerabilità massima al variare della direzione del vento, per $C_0/C_{th}=10$

In Figura C.4 è rappresentata, per ogni città e per ogni direzione del vento, con rapporto tra concentrazione iniziale e concentrazione di soglia pari a 10, la vulnerabilità massima. Essa è il numero di abitanti raggiunti dalla sostanza tossica con concentrazione sopra soglia se essa è rilasciata dal nodo peggiore, cioè quello a partire dal quale la sostanza tossica raggiunge quante più persone possibile.

Come si poteva immaginare, la vulnerabilità di New York è molto maggiore di quella delle due città europee esaminate e la vulnerabilità di Parigi è leggermente maggiore di quella di Firenze. Accade ciò in ogni condizione di vento.

Tabella C.1 - Vulnerabilità massima nelle diverse condizioni di vento, per $C_0/C_{th}=10$

dir [°]	Vulnerabilità max [ab]		
	Parigi	NYC	Firenze
0	8890	212724	2231
45	11264	147009	6147
90	7648	172034	2593
135	8334	155841	5256
180	8302	179822	2329
225	9995	144948	4953
270	8045	181027	2725
315	9209	153400	4941

In Tabella C.1 si osservano i valori di vulnerabilità nel dettaglio. A New York essi sono di un ordine di grandezza superiori rispetto alle due città europee. Sono inoltre evidenziati i valori massimi in base alla direzione del vento: la direzione peggiore è 45°, ovvero nord-est, per Parigi e Firenze, mentre essa è 0°, ovvero il nord, per New York.

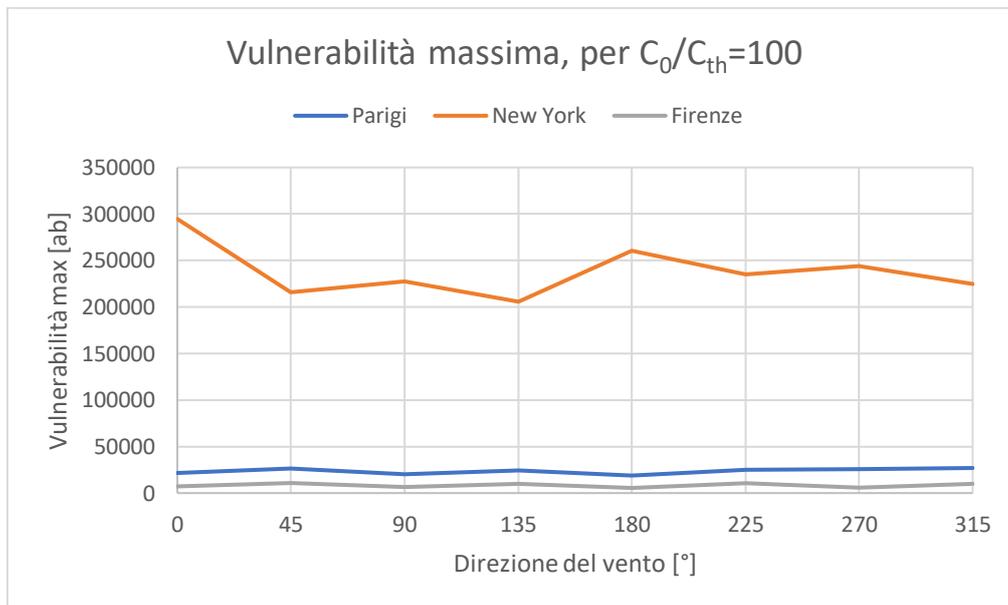


Figura C.5 - Vulnerabilità massima al variare della direzione del vento, per $C_0/C_{th}=100$

In Figura C.5 è rappresentata la vulnerabilità massima nel caso in cui il rapporto tra concentrazione iniziale e concentrazione di soglia è pari a 100. Essa ha valori qualitativamente simili a quelli del caso precedente: infatti, anche in questo caso, New York è molto più vulnerabile delle altre due città e Parigi è leggermente più vulnerabile di Firenze. Ciò accade in ogni condizione di vento.

Tabella C.2 - Vulnerabilità massima nelle diverse condizioni di vento, per $C_0/C_{th}=100$

dir [°]	Vulnerabilità max [ab]		
	Parigi	NYC	Firenze
0	21716	294599	7039
45	26281	215539	10805
90	20405	227642	6152
135	24282	205711	9751
180	18800	260635	5480
225	25055	235165	10280
270	25479	243634	5686
315	26940	224597	10184

In Tabella C.2 si osservano i valori di vulnerabilità nel dettaglio. Si nota che qualitativamente si hanno le stesse condizioni del caso precedente: la vulnerabilità di New York è circa un ordine di grandezza superiore a quella delle altre due città e le direzioni peggiori sono le stesse del caso precedente (tranne per Parigi, dove diventa 315°, ovvero nord-ovest).

Tabella C.3 - Confronto valori di vulnerabilità

		$C_0/C_{th}=10$			$C_0/C_{th}=100$		
		Parigi	NYC	Firenze	Parigi	NYC	Firenze
min	[ab]	7648	144948	2231	18800	205711	5480
max	[ab]	11264	212724	6147	26940	294599	10805
max-min	[ab]	3616	67776	3916	8140	88888	5325
max/min	[-]	1.473	1.468	2.76	1.433	1.432	1.97

Analizzando i dati più nel dettaglio, si osserva la Tabella C.3. Essa rappresenta, per ogni città, il valore minimo e massimo di vulnerabilità massima al variare della direzione del vento: ci sono infatti delle direzioni più sfavorevoli e altre favorevoli. È interessante notare il rapporto tra questi due valori, ossia il rapporto tra la vulnerabilità massima nella direzione del vento sfavorevole (ovvero quella che permette alla sostanza tossica di raggiungere più persone) e la vulnerabilità massima nella direzione del vento più favorevole. Questo rapporto è molto simile per Parigi e New York, mentre per Firenze esso è più alto: un rapporto alto indica maggiore variabilità al variare della direzione del vento, mentre un valore più basso vuol dire che, al variare della direzione del vento, la vulnerabilità varia poco.

Dunque, in base a queste considerazioni, si evince che città con una urbanistica simile a quella di New York sono più vulnerabili di città simili a Parigi o Firenze. Nel calcolo della vulnerabilità gioca infatti un ruolo fondamentale l'**altezza degli edifici**: stando a quanto assunto, altezza maggiore vuol dire maggior densità abitativa, quindi un maggior numero di persone raggiunte dalla sostanza tossica. È dunque importante, per questo tipo di analisi, analizzare proprio quelle zone delle città caratterizzate da edifici alti. Ad esempio, immaginando di proseguire l'analisi per altre città europee, si potrebbero studiare la City di Londra oppure il centro di Francoforte, mentre in altre parti dell'Occidente si potrebbero studiare Los Angeles, Chicago, Toronto o Sydney.

Tuttavia, è bene precisare ancora che questi calcoli sono stati effettuati in assenza di dati di popolazione su ogni singola via, attraverso i quali l'analisi sarebbe stata estremamente dettagliata. Pertanto, è stata effettuata l'ipotesi di legame tra densità di popolazione e altezza degli edifici, che tuttavia potrebbe non essere realistica. Si pensi infatti a molti grattacieli di New York che ospitano uffici, mentre il centro di Firenze, ad esempio, ospita molti musei: si tratta di luoghi affollati solo in alcune ore del giorno. Si tratta comunque di una assunzione ragionevole, in quanto, pur non trattandosi di residenti, queste persone affollano comunque gli edifici del centro cittadino, quindi è bene tenerne conto.

APPENDICE

A.1. DETTAGLI SUI PROGRAMMI UTILIZZATI

Di seguito si riportano i passaggi svolti per far funzionare le utilities (Simplifie_Graphe e Prog-HW) e SIRANE. Sono riportate le cartelle contenenti i dati di input e i comandi per lanciare i file eseguibili. Nel caso di SIRANE, considerando che i dati di input sono molto numerosi, si riportano solo le cartelle di input utili ai fini di questo studio.

UTILITIES

La prima utility è **Simplifie_Graphe**, la quale serve per semplificare la geometria degli elementi contenuti nello shape-file del reticolo viario. Per fare ciò, si crea una cartella, all'interno della quale compaiono una sottocartella contenente i dati di input (in questo caso lo shapefile di polilinee), l'eseguibile "Simplifie_Graphe.exe" e un file, "donnees.dat", contenente le informazioni da fornire all'eseguibile.

Si riporta il contenuto del file "donnees.dat" utilizzato per la città di Parigi:

```
/*  
** Donnees pour l'utilisation de Simplifie_Graphe **  
*/  
  
Fichier de reseau = INPUT\Taglio  
Nom du champ identifiant de rue = ID  
Dossier de resultat = OUTPUT  
Nombre max de point par polyligne = 2  
Fleche max = 20.0  
Rapport fleche sur corde max = 0.2
```

Si nota che è riportata la cartella di input (chiamata "INPUT"), nella quale è presente lo shapefile di polilinee (in questo caso chiamato "Taglio"). Si va a specificare il nome della cartella di output (chiamata "OUTPUT"), che appare dopo aver lanciato l'eseguibile.

In Figura A.1 si osserva come lanciare l'eseguibile tramite il "comand":



Figura A.1 - Lancio dell'eseguibile Simplifie_Graphe.exe

Dopo aver lanciato l'eseguibile, appare una nuova cartella, "OUTPUT", nella quale è presente lo shapefile di segmenti, dunque semplificato rispetto a quello di partenza.

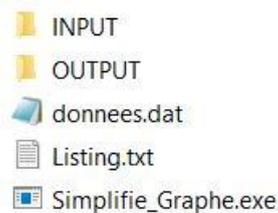


Figura A.2 - Contenuto cartella Simplifie_Graphe dopo il lancio dell'eseguibile

In Figura A.2 si osserva inoltre che appare un file di testo: esso contiene informazioni sui calcoli svolti dall'eseguibile.

La seconda utility è **Prog-HW**, la quale crea un nuovo shapefile di segmenti contenente informazioni geometriche. Per fare ciò, si crea una cartella, all'interno della quale compaiono una sottocartella contenente i dati di input (in questo caso lo shapefile di segmenti, ottenuto dalla utility precedente, che rappresenta le strade, e quello di poligoni, che rappresenta gli edifici), l'eseguibile "Prog-HW.exe" e un file, "donnees.dat", contenente le informazioni da fornire all'eseguibile.

Si riporta il contenuto del file "donnees.dat" utilizzato per la città di Parigi:

```

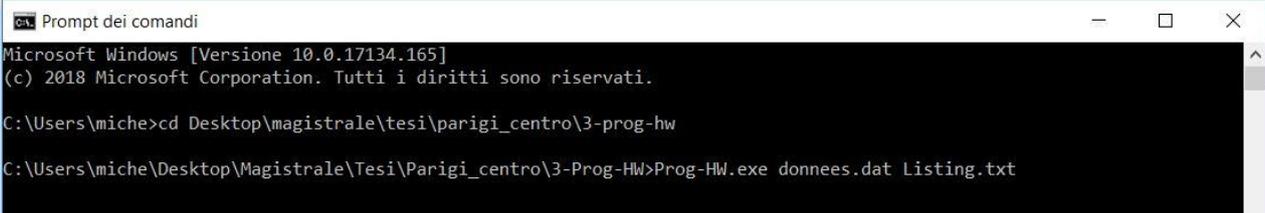
/*****
/** Donnees pour l'utilisation de PROG-HW **
/*****

Fichier de reseau = INPUT\Reseau_Filaire
Fichier de bati = INPUT\Edifici_taglio
Nom du champ hauteur de bati = HAUTEUR
Dossier de resultat = OUTPUT
Largeur de la zone tampon [m] = 100.0
Angle limite des facettes [deg] = 30.0
Coefficient de filtrage = 1.1
Calcul sur polyligne [0/1] = 1
Longueur minimale pour le calcul polyligne [m] = 20.0

```

Si nota che la cartella di input (chiamata "INPUT") appare due volte: in essa, infatti, ci sono due shapefile, ovvero quello dei segmenti ("Reseau_Filaire") e quello dei poligoni ("Edifici_taglio"). Si va a specificare il nome della cartella di output (chiamata "OUTPUT"), che appare dopo aver lanciato l'eseguibile.

In Figura A.3 si osserva come lanciare l'eseguibile tramite il "comand":



```
Prompt dei comandi
Microsoft Windows [Versione 10.0.17134.165]
(c) 2018 Microsoft Corporation. Tutti i diritti sono riservati.

C:\Users\miche>cd Desktop\magistrale\tesi\parigi_centro\3-prog-hw
C:\Users\miche\Desktop\Magistrale\Tesi\Parigi_centro\3-Prog-HW>Prog-HW.exe donnees.dat Listing.txt
```

Figura A.3 - Lancio dell'eseguibile Prog-HW.exe

Dopo aver lanciato l'eseguibile, appare una nuova cartella, "OUTPUT", nella quale è presente un nuovo shapefile di segmenti, contenente informazioni geometriche.



Figura A.4 - Contenuto cartella Prog-HW dopo il lancio dell'eseguibile

In Figura A.4 si osserva inoltre che appare un file di testo: esso contiene informazioni sui calcoli svolti dall'eseguibile.

SIRANE

Ai fini di questo studio, SIRANE serve solo per ricavare la velocità del vento nelle vie U_{st} , pertanto di seguito si riportano solo le cartelle e i file utili per questo scopo. Tutto ciò che riguarda le concentrazioni di inquinanti non è stato riportato.

La cartella di input "**EMISSIONS**" contiene tre sottocartelle e due file *.dat. Tra le sottocartelle, è importante "EMIS_SURF", all'interno della quale ci sono dei file che devono contenere coordinate geografiche coerenti con il reticolo viario della città presa in esame. Questi file di testo si chiamano "EmisSurf_Heure_XXXX", dove XXXX è una certa ora di un certo giorno. In questo caso, interessano le ore 0145, 0146, 0147 e 0148, ovvero da mezzanotte alle tre del giorno 7 gennaio 2014. In realtà, la data è puramente casuale, dato che le concentrazioni sono state imposte (nulle in questo caso), quindi non sono quelle verificatesi quel giorno.

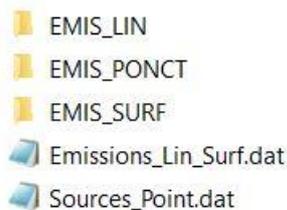


Figura A.5 - Contenuto della cartella "EMISSIONS"

Si osserva in Figura A.6 che le concentrazioni sono nulle e che compaiono le coordinate X e Y che racchiudono il reticolo viario. Il sistema di riferimento usato per Parigi è Lambert-93.

X	Y	NO	NO2	O3	PM	PM25
640000	6850000	0	0	0	0	0
660000	6850000	0	0	0	0	0
640000	6870000	0	0	0	0	0
660000	6870000	0	0	0	0	0

Figura A.6 - EmisSurf_Heure_0145

La cartella di input "GRILLES" contiene tre file di testo, corrispondenti a tre griglie.

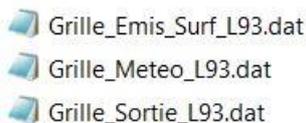


Figura A.7 - Contenuto della cartella "GRILLES"

Le griglie, nel caso di Parigi, sono tutte rappresentate nel sistema di riferimento Lambert-93.

Il file "Grille_Emis_Surf_L93" contiene la griglia atta a rappresentare le emissioni superficiali.

Nx	Ny	xmin	xmax	ymin	ymax
3	3	630000.0	670000.0	6840000.0	6880000.0

Figura A.8 - Grille_Emis_Surf_L93

Essa è esattamente il doppio della griglia contenuta in "EmisSurf_Heure_XXXX".

Il file "Grille_Meteo_L93" contiene la griglia atta a rappresentare i dati meteo.

Nx	Ny	xmin	xmax	ymin	ymax
10	10	625000.0	675000.0	6835000.0	6885000.0

Figura A.9 - Grille_Meteo_L93

Essa è la griglia più grande, come si osserva dalle coordinate in Figura A.9.

Il file "Grille_Sortie_L93" contiene la griglia atta a rappresentare i dati di output.

Nx	Ny	xmin	xmax	ymin	ymax
201	201	630000.0	670000.0	6840000.0	6880000.0

Figura A.10 - Grille_Sortie_L93

Essa ha le stesse dimensioni della griglia delle emissioni superficiali.

La cartella di input “**METEO**” contiene due file di testo, come mostrato in Figura A.11.



Figura A.11 - Contenuto della cartella “METEO”

Il file “Meteo” contiene, istante per istante, vari dati meteo; ai fini di questa analisi, in cui ciò che si vuole ottenere è la velocità del vento nelle vie, i dati meteo importanti sono due: la velocità U del vento atmosferico (ovvero sopra i palazzi) e la direzione φ del vento.

Date	U	Dir	Temp	Precip	Cld	Fichier		
01/01/2014 00:00			4.3	173	3.25	0	8	NULL
01/01/2014 01:00			2.1	134	3.76	0.1	8	NULL
01/01/2014 02:00			1.2	130	4.02	0.5	8	NULL

Figura A.12 - Parte del file “Meteo”

Ai fini di questa analisi, come già detto, interessa ciò che accade il 7 gennaio 2014 da mezzanotte alle 3. Per quanto riguarda i valori di input, si considerano otto casi: due valori di U (5 e 10 m/s) e quattro valori di φ (45, 90, 135 e 180°).

La cartella di input “**RESEAU**” contiene gli shapefile del reticolo viario oggetto di indagine e un file di testo, “Site_Dis”, che contiene informazioni geografiche come, ad esempio, la latitudine della città studiata.

Nella tabella degli attributi dello shapefile devono essere obbligatoriamente presenti determinati campi, come si può osservare in Figura A.13.

ID	H	HD	HG	W	WD	WG	MODUL_EMIS	TYPE	NDDEB	NDFIN
TRONROUT00	17.000000	17.000000	17.000000	15.740000	9.730000	6.010000	0	0 2		54
TRONROUT00	18.140000	18.000000	18.280000	7.290000	5.270000	2.020000	0	0 4		1249
TRONROUT00	20.000000	23.000000	17.000000	9.700000	5.480000	4.220000	0	0 6		75

Figura A.13 - Parte della tabella attributi dello shapefile

I campi necessari sono i seguenti:

- ID, il nome dell’elemento, esso è una stringa;
- HD, altezza media destra dell’elemento;
- HG, altezza media sinistra dell’elemento;
- WD, larghezza media destra dell’elemento;
- WG, larghezza media sinistra dell’elemento;
- MODUL_EMIS, modulazione delle emissioni, posto pari a zero (le emissioni non interessano);
- TYPE, indica se si tratta di street-canyon (1) o no (0); sono valori posti inizialmente tutti pari a zero, saranno modificati a posteriori;
- NDDEB, numerazione del nodo iniziale dell’elemento;
- NDFIN, numerazione del nodo finale dell’elemento.

Il file “Donnees.dat” richiama tutte le cartelle di input e serve per far partire SIRANE.

Si riporta di seguito, come esempio, il file “Donnees_Paris” relativo alla città di Parigi.

```
/*
*****
** Donnees pour l'utilisation de SIRANE **
*****
Repertoire des donnees d'entree = INPUT_PARIS
/-----
/ Periode :
/-----
Date de debut = 07/01/2014 00:00:00
Date de fin = 07/01/2014 03:00:00
/-----
/ Polluants :
/-----
Fichier des especes = ESPECES/Especes.dat
Fichier de groupes de sources = ESPECES/SrceGroup.dat
Activation du modele chimique de Chapman [0/1] = 0
Emissions de NO en equivalent NO2 [0/1] = 0
/-----
/ Emissions :
/-----
Fichier de sources ponctuelles = EMISSIONS/Sources_Point.dat
Fichier d'evolution des emissions lineiques et surfaciques = EMISSIONS/Emissions_Lin_Surf.dat
Nombre de modulations lineiques = 7
Fichier de pollution de fond = FOND/Concentration_Fond.dat
/-----
/ Caracteristiques du milieu urbain :
/-----
Type de fichier de reseau [0/1/2] = 2
Fichier de reseau = RESEAU/Parigi_centro_modif_senza0
Fichier de site de dispersion = RESEAU/Site_Disp.dat
Rugosite aerodynamique des batiments [m] = 0.05

```

Hauteur de reflexion des bouffees [m] = 20.0

/-----

/ Conditions meteorologiques :

/-----

Conditions meteorologiques [0/1/2/3] = 0

Fichier meteo = METEO/Meteo.dat

Fichier de site de mesures meteorologiques = METEO/Site_Meteo.dat

Vitesse du vent minimale [m/s] = 1.0

Ecart-type de vitesse sigmav minimal [m/s] = 0.5

Ecart-type de vitesse sigmaw minimal [m/s] = 0.3

/-----

/ Grilles :

/-----

Fichier de description de la grille meteo = GRILLES/Grille_Meteo_L93.dat

Fichier de description de la grille de sortie = GRILLES/Grille_Sortie_L93.dat

Fichier de description de la grille d'emissions surfaciques = GRILLES/Grille_Emis_Surf_L93.dat

/-----

/ Sortie des resultats :

/-----

Niveau d'affichage [0/1/2] = 0

Fichier de position des recepteurs ponctuels = RECEPTEURS/Recepteurs.dat

Calcul des concentrations journalieres [0/1] = 0

Calcul sur la grille [0/1/2] = 0

Ecriture du depot [0/1] = 0

Ecriture des resultats sur les rues [0/1] = 1

Format du fichier de rues [0/1] = 0

Format du fichier de champ de concentration [0/1/2/3/4] = 4

Ecriture du champ de concentration au format image [0/1/2] = 0

Fichier de colormap des especes = COLORMAPS/Colormaps_especes.dat

Fichier de colormap des depassements = COLORMAPS/Colormap_NB.dat

Repertoire d'écriture des resultats = RESULT_PARIS

/-----

/ Parametres statistiques ;

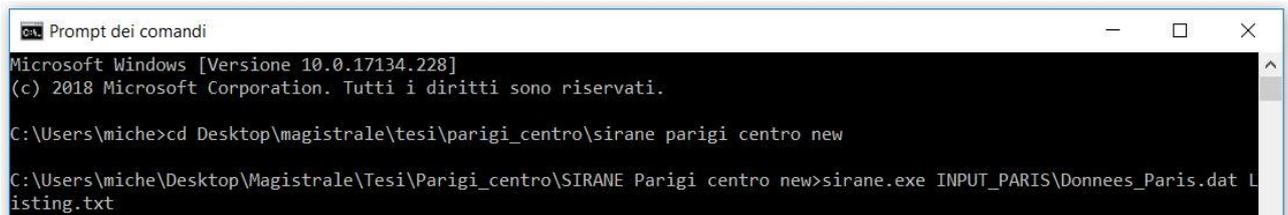
/-----

Calcul des statistiques [0/1] = 0

Fichier de percentiles = STATISTIQUES/Percentiles.dat

Fichier de seuils de depassement = STATISTIQUES/Seuils.dat

Una volta definiti tutti gli input nelle rispettive cartelle e definita anche la cartella “Donnees”, si può far partire l’eseguibile “**Sirane.exe**”.



```
ca Prompt dei comandi
Microsoft Windows [Versione 10.0.17134.228]
(c) 2018 Microsoft Corporation. Tutti i diritti sono riservati.

C:\Users\miche>cd Desktop\magistrale\tesi\parigi_centro\sirane parigi centro new

C:\Users\miche\Desktop\Magistrale\Tesi\Parigi_centro\SIRANE Parigi centro new>sirane.exe INPUT_PARIS\Donnees_Paris.dat Listing.txt
```

Figura A.14 - Eseguibile "Sirane.exe"

Come si osserva in Figura A.14, tramite terminale, si scrive il nome dell’eseguibile (“Sirane.exe”), il nome del file di testo che richiama tutti gli input (“Donnees_Paris.dat”) e infine si scrive “Listing.txt”, ovvero un file di testo in cui l’eseguibile riporta i calcoli effettuati.

A questo punto, una volta lanciato SIRANE, si ottiene la cartella degli output, da cui estrarre i valori delle velocità del vento nelle vie (vedi paragrafo 2.2.2).

A.2. DETTAGLI SULLE MODIFICHE AI RETICOLI URBANI

Per ogni città, si riporta l'elenco delle vie modificate dello shapefile output di Prog-HW, il quale, dopo ulteriori modifiche, viene utilizzato come input per SIRANE, come visto nel paragrafo 2.1.2. Inoltre, si riportano le coordinate geografiche utilizzate per le griglie di input di SIRANE.

A.2.1. PARIGI

Di seguito sono riportati gli elementi modificati dello shapefile output della utility Prog-HW. I valori dei campi sono riportati in metri.

- Rue Cambon, WD = -2.37 ---> WD = 0.1
- Rue Gaillon, WD = -0.18 ---> WD = 0.1
- Rue Saint Honoré, HD = 0 ---> HD = 0.1
- Rue de Nancy, WD = -1.69 ---> WD = 0.1
- Cité de Magenta, WG = -1.97 ---> WG = 0.1
- Rue René Boulanger, WG = -1 ---> WG = 0.1
- Rue du Vertbois, WG = -0.31 ---> WG = 0.1
- Cité Dupetit-Thouars, WG = -0.16 ---> WG = 0.1
- Rue des Tournelles, WG = -0.69 ---> WG = 0.1
- Rue Quincampoix, WG = -0.26 ---> WG = 0.1
- Rue des Vertus, WG = -0.1 ---> WG = 0.1
- Rue Pierre au Lard, WD = -1.03 ---> WD = 0.1
- Rue Saint Merri, WG = -0.21 ---> WG = 0.1
- Rue Amelot, WD = -0.54 ---> WD = 0.1

Osservando questi elementi su Google Maps, si tratta nella maggior parte dei casi di strade molto strette, per cui era errato il valore di WG o di WD (valori negativi sono insensati), come si può vedere in Figura A.15.



Rue Cambon



Rue de Nancy

Figura A.15 – Parigi, immagini di alcune vie con $WD < 0$ interessate dalla modifica

Tra gli input di SIRANE, sono richieste delle griglie georeferenziate, le cui coordinate geografiche devono essere coerenti con quelle della città rappresentata. Per la città di Parigi, il sistema di riferimento utilizzato è “Lambert-93”. Si riportano di seguito le griglie e le loro coordinate.

- **EmisSurf_Heure_XXXX** (XXXX = 0145, 0146, 0147, 0148), la griglia più piccola, utilizzata per rappresentare le emissioni superficiali (che tuttavia non sono importanti per questa analisi) in diverse ore del giorno (in questo caso, sono 4 ore).
Xmin = 640000; Xmax = 660000; Ymin = 6850000; Ymax = 6870000; $\Delta X = \Delta Y = 20000$.
- **Grille_Emis_Surf_L93**, ha dimensioni doppie rispetto alla precedente, serve anch'essa a rappresentare le emissioni superficiali.
Xmin = 630000; Xmax = 670000; Ymin = 6840000; Ymax = 6880000; $\Delta X = \Delta Y = 40000$.
- **Grille_Sortie_L93**, ha le stesse dimensioni della precedente, serve per rappresentare gli output.
Xmin = 630000; Xmax = 670000; Ymin = 6840000; Ymax = 6880000; $\Delta X = \Delta Y = 40000$.
- **Grille_Meteo_L93**, è la griglia più grande, serve per rappresentare i dati meteo.
Xmin = 625000; Xmax = 675000; Ymin = 6835000; Ymax = 6885000; $\Delta X = \Delta Y = 50000$.

A.2.2. NEW YORK CITY

Di seguito sono riportati gli elementi modificati dello shapefile output della utility Prog-HW. I valori dei campi sono riportati in metri.

- 2nd ave/E 56-57th st: $HG=0 \rightarrow HG=HD$
- E 45th st/Vanderbilt-Park ave: $HD=0 \rightarrow HD=HG/2$; $WD=0 \rightarrow WD=0.1$
- 9th ave/W 41-42nd st: $HG=0 \rightarrow HG=HD$
- 10th ave/W 40-41st st: $HG=0 \rightarrow HG=HD$

- 6th ave/W 30-31st st: $HG=0 \rightarrow HG=HD$
- 9th ave/W 26-27th st: $HG=0 \rightarrow HG=HD$; $WG=0 \rightarrow WG=0.1$
- W 26th st/9th ave (2 elementi): $HD=0 \rightarrow HD=HG/2$; $WD=0 \rightarrow WD=0.1$
- 10th ave/W 25-26th st: $HD=0 \rightarrow HD=HG/2$; $WD=0 \rightarrow WD=0.1$

In Figura A.16 sono presenti due esempi di vie che riportavano valori errati di HG (era nulla, è stato poi inserito un valore >0).



2nd Ave, 56/57 st



10th Ave, 40/41 st

Figura A.16 – New York, immagini di alcune vie interessate dalla modifica

Tra gli input di SIRANE, sono richieste delle griglie georeferenziate, le cui coordinate geografiche devono essere coerenti con quelle della città rappresentata. Per la città di New York, il sistema di riferimento utilizzato è “NAD 83 New York Long Island”. Si riportano di seguito le griglie e le loro coordinate.

- **EmisSurf_Heure_XXXX** (XXXX = 0145, 0146, 0147, 0148), la griglia più piccola, utilizzata per rappresentare le emissioni superficiali (che tuttavia non sono importanti per questa analisi) in diverse ore del giorno (in questo caso, sono 4 ore).
Xmin = 295000; Xmax = 305000; Ymin = 58000; Ymax = 68000; $\Delta X = \Delta Y = 10000$.
- **Grille_Emis_Surf_NAD83**, ha dimensioni doppie rispetto alla precedente, serve anch'essa a rappresentare le emissioni superficiali.
Xmin = 290000; Xmax = 310000; Ymin = 53000; Ymax = 73000; $\Delta X = \Delta Y = 20000$.
- **Grille_Sortie_NAD83**, ha le stesse dimensioni della precedente, serve per rappresentare gli output.
Xmin = 290000; Xmax = 310000; Ymin = 53000; Ymax = 73000; $\Delta X = \Delta Y = 20000$.
- **Grille_Meteo_NAD83**, è la griglia più grande, serve per rappresentare i dati meteo.
Xmin = 285000; Xmax = 315000; Ymin = 48000; Ymax = 78000; $\Delta X = \Delta Y = 30000$.

A.2.3. FIRENZE

Di seguito sono riportati gli elementi modificati dello shapefile output della utility Prog-HW. I valori dei campi sono riportati in metri.

WD < 0

Di seguito, sono riportati gli elementi con WD<0 che sono stati modificati. Si tratta di 20 elementi (1.7 % del totale), ai quali è stato assegnato il valore WD pari a 0.1 metri. Si riporta la via interessata dalla modifica e, tra parentesi, le vie traverse tra cui si è effettuata la modifica.

- Via Panzani (Piazza Unità d'Italia/Via del Giglio)
- Via Zannetti (Via dei Conti/Via de' Cerretani)
- Borgo Santi Apostoli (Piazza Santa Trinita/Chiasso degli Altoviti)
- Piazza del Limbo
- Chiasso del Buco (Piazza dei Saltarelli/Via Lambertesca)
- Via Lambertesca (Via dei Georgofili/Piazzale degli Uffizi)
- Vicolo Marzio (Piazza Santo Stefano/Via dei Girolami)
- Via dei Girolami (Piazza del Pesce/Via dei Georgofili)
- Via dei Castellani (Lungarno/Via dei Neri)
- Via dei Vagellai (Piazza Mentana/Via dei Benci)
- Via della Condotta (Via dei Magazzini/Piazza di San Firenze)
- Via delle Burella (Via dell'Acqua/Via Isola delle Stinche)
- Via della Vigna Vecchia (Via dell'Acqua/Via Isola delle Stinche)
- Via S. Cristofano (Via San Giuseppe/Via Ghibellina)
- Via delle Pinzochere (Via del Fico/Via Ghibellina)
- Via Tripoli (Piazza dei Cavalleggeri/Via delle Casine)
- Borgo Pinti (Via di Mezzo/Via Nuova de' Caccini)
- Via Luna (Via Gioberti/Via Giotto)
- Via Manin (Viale Mazzini/Via Scialoja)
- Via Duca d'Aosta (Viale Lavagnini/Via Zara)

WG < 0

Anche in questo caso, si riportano gli elementi con WG<0 che sono stati modificati, avendo posto WG = 0.1 metri. Si tratta di 15 elementi (1.25 % del totale).

- Via del Moro (Via delle Belle Donne/Via dei Banchi)
- Via degli Agli (Piazza degli Antinori/Via dei Pescioni)
- Via dei Pescioni (Via dei Pecori/Via dei Corsi)
- Via Teatina (Via degli Agli)
- Via dell'Alloro (Via del Giglio/Via dei Conti)
- Via del Melarancio (Piazza Unità d'Italia/Via dell'Amorino)
- Via Cennini (Piazza Adua/Via Faenza)

- Via Porta Rossa (Via Monalda/Piazza dei Davanzati)
- Via delle Bombarde (Borgo Santi Apostoli/Via delle Terme)
- Chiasso dei Baroncelli (Piazza della Signoria/Chiasso del Buco)
- Via dei Magazzini (Piazza della Signoria/Via della Condotta)
- Vicolo del Giglio (Via delle Oche/Piazza del Giglio)
- Borgo Santa Croce (Via dei Benci/Piazza Santa Croce)
- Via del Castellaccio (Via dei Servi/Piazza Brunelleschi)
- Via San Gallo (Piazza della Libertà/Via delle Mantellate)

WG = 0

Si riportano gli elementi con WG=0 che sono stati modificati, avendo posto WG = 0.1 metri. Si tratta di soli 2 elementi (0.17 % del totale).

- Via dei Tornabuoni (Via Porta Rossa/Via degli Strozzi)
- Via dei Rondinelli (Via del Trebbio/Via dei Banchi)

HG = 0

In questo caso, sono stati modificati 2 elementi appartenenti a degli incroci in prossimità di piazze.

- Piazza Sant'Ambrogio
HG = HD = H = 12.71 m
(HG, che era nulla, è stata posta uguale ad HD)
- Piazza Stazione/Piazza Unità d'Italia
HD = 15.13 m; HG = 20.11 m; WD = 29.50 m; WG = 11.62 m
(Sono stati utilizzati i valori dell'elemento adiacente)

In Figura A.17 sono presenti due esempi di vie che riportavano valori errati di WD e WG (erano negativi, sono stati poi inseriti valori >0).



Via della Condotta (WD<0)



Via delle Bombarde (WG<0)

Figura A.17 – Firenze, immagini di alcune vie interessate dalla modifica

Tra gli input di SIRANE, sono richieste delle griglie georeferenziate, le cui coordinate geografiche devono essere coerenti con quelle della città rappresentata. Per la città di Firenze, il sistema di riferimento utilizzato è "Monte Mario Italy zone 1". Si riportano di seguito le griglie e le loro coordinate.

- **EmisSurf_Heure_XXXX** (XXXX = 0145, 0146, 0147, 0148), la griglia più piccola, utilizzata per rappresentare le emissioni superficiali (che tuttavia non sono importanti per questa analisi) in diverse ore del giorno (in questo caso, sono 4 ore).
Xmin = 1677000; Xmax = 1687000; Ymin = 4844000; Ymax = 4854000; $\Delta X = \Delta Y = 10000$.
- **Grille_Emis_Surf_MM**, ha dimensioni doppie rispetto alla precedente, serve anch'essa a rappresentare le emissioni superficiali.
Xmin = 1672000; Xmax = 1692000; Ymin = 4839000; Ymax = 4859000; $\Delta X = \Delta Y = 20000$.
- **Grille_Sortie_MM**, ha le stesse dimensioni della precedente, serve per rappresentare gli output.
Xmin = 1672000; Xmax = 1692000; Ymin = 4839000; Ymax = 4859000; $\Delta X = \Delta Y = 20000$.
- **Grille_Meteo_MM**, è la griglia più grande, serve per rappresentare i dati meteo.
Xmin = 1667000; Xmax = 1697000; Ymin = 4834000; Ymax = 4864000; $\Delta X = \Delta Y = 30000$.

BIBLIOGRAFIA

- Blocken, B. (2015). Computational Fluid Dynamics for urban physics: importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91, 219-245.
- Boccaletti, S., Latora, V., Moreno, Y., Chavez, M., & Hwang, D.-U. (2006). Complex networks: structure and dynamics. *Physics Reports*, 424(4-5), 175-308.
- Borgatti, S. P., Mehra, A., Brass, D. J., & Labianca, G. (2009). Network analysis in the social sciences. *Science*, 323(5916), 892-895.
- Carruthers, D., Edmunds, H., Lester, A., McHugh, C., & Singles, R. (2000). Use and validation of ADMS-Urban in contrasting urban and industrial locations. *International Journal of Environment and Pollution*, 14(1-6), 364-374.
- Di Sabatino, S., Buccolieri, R., & Salizzoni, P. (2013). Recent advancements in numerical modelling of flow and dispersion in urban areas: a short review. *Int. J. Environ. Pollut.*, 7 52(3-4), 172-191.
- Fellini, S., Salizzoni, P., Soulhac, L., & Ridolfi, L. (2018). Propagation of toxic substances in the urban atmosphere: A complex network perspective. *Atmospheric Environment*, 198(2019), 291-301.
- Gelbrecht, M., Boers, N., & Kurths, J. (2017). A complex network representation of wind flows. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 27(3), 035808.
- Giustolisi, O., & Ridolfi, L. (2014). A novel infrastructure modularity index for the segmentation of water distribution networks. *Water Resources Research*, 50(10), 7648-7661.
- Hamlyn, D., Hilderman, T., & Britter, R. (2007). A simple network approach to modelling dispersion among large groups of obstacles. *Atmospheric Environment*, 41(28), 5848-5862.
- Kim, Y., Wu, Y., Seigneur, C., & Roustan, Y. (2018). Multi-scale modeling of urban air pollution: development and application of a street-in-grid model by coupling munich and polair3d. *Geoscientific Model Development*, 11(2), 611-629.
- Salizzoni, P., Soulhac, L., & Mejean, P. (2009). Street canyon ventilation and atmospheric turbulence. *Atmospheric Environment*, 43(32), 5056-5067.
- Soulhac, L., Salizzoni, P., Cierco, F.-X., & Perkins, R. (2011). The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; part I, presentation of the model. *Atmospheric Environment*, 45(39), 7379-7395.
- Soulhac, L., Salizzoni, P., Mejean, P., & Perkins, R. (2013). Parametric laws to model urban pollutant dispersion with a street network approach. *Atmospheric Environment*, 67, 229-241.