

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in  
INGEGNERIA ENRGETICA E NUCLEARE

Tesi di Laurea Magistrale

Qualità dell'ambiente interno e comfort globale:  
misure in campo ed analisi nella sede dell'ARPA della  
Valle d'Aosta



Relatori  
Prof. Marco Masoero  
Prof.ssa Arianna Astolfi

Candidato  
Niccolò Oggiani

Anno Accademico 2020/2021

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutto il personale della Sede dell'ARPA Valle d'Aosta che mi ha supportato nel mio lavoro di Tesi di Laurea, in particolare esprimo la mia gratitudine al Direttore Tecnico, ai tecnici e funzionari dell' Ufficio Rumore, dell'Ufficio Campi Elettromagnetici, del Laboratorio delle Acque e al mio Tutor Christian Tibone che mi ha accompagnato in questa bella esperienza.

Un particolare ringraziamento va ai miei Relatori che mi hanno stimolato a sviluppare questo progetto, alle Ricercatrici che mi hanno seguito con passione nella stesura della mia Tesi ed ai Tecnici per la loro disponibilità.

Dedico questo lavoro a tutta la mia famiglia.

## Sommario

La norma europea EN16798- parte 1 specifica i requisiti minimi per la progettazione e valutazione dei parametri ambientali interni riferiti all' ambiente termico, alla qualità dell'aria, all'illuminazione e all'acustica.

La normativa, però, propone un approccio valutativo di carattere puramente oggettivo (basato su grandezze misurabili), non andando a valutare la percezione soggettiva dell'ambiente da parte degli occupanti, che tuttavia hanno una forte rilevanza nel determinarne lo stato di comfort. Essa, inoltre, non fornisce un indicatore sintetico del comfort o della qualità dell'ambiente interno globale: propone solo indicazioni sulle grandezze prese singolarmente e non si pone il problema della restituzione del dato all'utente.

Questo studio si pone l'obiettivo di approfondire le tematiche legate ai vari aspetti della qualità dell'ambiente interno e del comfort ambientale adottando un approccio globale, ossia integrando sia a livello metodologico che analitico i diversi domini che lo compongono (termico, qualità dell'aria, acustico e luminoso). In particolare, lo studio ha previsto la correlazione delle grandezze fisiche oggettive (misurate in campo) con i parametri soggettivi raccolti attraverso la somministrazione di questionari. Infine, il lavoro si pone anche l'obiettivo di riflettere sulle modalità attraverso cui i parametri finora menzionati possano essere restituiti all'utente, per fornirgli informazioni sulla qualità dell'ambiente in cui svolge le proprie attività ed eventualmente stimolarne un comportamento proattivo, teso alla riduzione dello spreco di energia ed una gestione adeguata dei diversi aspetti che concorrono alla creazione di un ambiente salutare e confortevole. I dati utilizzati per svolgere la parte applicativa del lavoro sono scaturiti da una campagna di monitoraggio e da questionari svolti, nel corso di tre settimane consecutive dell'estate del 2020, presso la sede dell'ARPA della Valle d'Aosta.

L'elaborato seguente è caratterizzato da una parte introduttiva riguardante la normativa relativa al comfort termico, alla qualità dell'aria, al comfort visivo e acustico. In seguito, un capitolo riguardante il metodo illustra la sperimentazione posta in essere, fornendo un quadro degli ambienti monitorati e specificando le varie fasi che hanno caratterizzato lo studio (design dell'esperimento e protocollo di misura). A seguire, vengono descritti gli strumenti di misura utilizzati per il monitoraggio delle grandezze fisiche ed i due tipi di questionari (longitudinale e trasversale) somministrati agli occupanti dell'ambiente.

Il capitolo seguente è incentrato sulla presentazione e il commento dei risultati ottenuti analizzando, per ogni dominio della qualità dell'ambiente interno, i risultati oggettivi e soggettivi e la loro correlazione. Per l'elaborazione dei risultati dei parametri monitorati ed il loro confronto con i requisiti della norma EN16798 è stata utilizzata la statistica descrittiva e metodi di regressioni lineari per quanto riguarda le correlazioni. Il metodo di valutazione contemporanea dei dati oggettivi e soggettivi ha permesso, tra le altre cose, di verificare quanto i criteri enunciati nella norma fossero idonei (limitatamente al caso studio analizzato) a prevedere il numero di soggetti che avrebbero presentato una situazione di discomfort.

Nel penultimo capitolo sono presenti le discussioni, dove si analizzano le problematiche principali emerse nel capitolo dei risultati e si discute in merito alla normativa di riferimento se ha rappresentato con successo i giudizi emersi dai questionari.

L'ultimo capitolo intende valutare le conclusioni finali emerse dal caso studio.

Infine, come anticipato, questo studio si è interrogato su come i diversi aspetti precedentemente analizzati potessero essere presentati ad un utente finale per fornire un'indicazione generale del presunto livello di comfort globale, tenendo conto sia degli aspetti oggettivi (derivati dai dati monitorati) che soggettivi (basati sulle valutazioni degli occupanti dell'ambiente).

Gli approcci e i metodi utilizzati nell'elaborare questo studio potranno essere applicati per future ricerche volte a valutare il comfort globale degli ambienti.

## Abstract

The European standard EN16798 part 1 specifies the minimum requirements for the design and assessment of internal environmental parameters relating to the thermal environment, air quality, lighting and acoustics.

The legislation, however, proposes a purely objective evaluation approach (based on measurable quantities), not going to evaluate the subjective perception of the environment by the occupants, who nevertheless have a strong relevance in determining the state of comfort.

Furthermore, it does not provide a synthetic indicator of the comfort or quality of the global internal environment: it only offers indications on the quantities taken individually and does not raise the problem of returning the data to the user.

This study aims to deepen the issues related to the various aspects of the quality of the internal environment and environmental comfort by adopting a global approach, i.e. integrating the different domains that compose it both at a methodological and analytical level (thermal, quality of air, acoustic and light). In particular, the study envisaged the correlation of objective physical quantities (measured in the field) with the subjective parameters collected through the administration of questionnaires. Finally, the work also aims to reflect on the ways in which the parameters mentioned so far can be returned to the user, to provide him with information on the quality of the environment in which he carries out his activities and possibly stimulate a proactive behaviour, aimed at reduction of energy waste and adequate management of the various aspects that contribute to the creation of a healthy and comfortable environment. The data used to carry out the application part of the work arose from a monitoring campaign and questionnaires carried out, over the course of three consecutive weeks in the summer of 2020, at the ARPA headquarters in the Aosta Valley.

The following paper is characterized by an introductory part concerning the legislation. Subsequently, a chapter concerning the method illustrates the experimentation carried out, providing a picture of the monitored environments and specifying the various phases that characterized the study (design of the experiment and measurement protocol). The measurement tools used for monitoring physical quantities and the two types of questionnaires (longitudinal and transverse) administered to the occupants of the environment are described below.

The following chapter focuses on the presentation of the results obtained by analyzing, for each domain of the quality of the internal environment, the objective and subjective results and their correlation. For the processing of the results of the monitored parameters and their comparison with the requirements of the EN16798 standard, descriptive statistics and linear regressions were used for correlations. The method of simultaneous evaluation of objective and subjective data made it possible, among other things, to verify how suitable the criteria set out in the standard were to predict the number of subjects who would have presented a situation of discomfort.

Finally, as anticipated, this study questioned how the various aspects previously analyzed could be presented to an end user to provide a general indication of the presumed level of global comfort, taking into account both objective and subjective aspects.

## Indice

1 Introduzione .....	6
1.1 Comfort globale IEQ .....	6
1.1.1 Comfort termico .....	7
1.1.2 Qualità dell'aria .....	12
1.1.3 Comfort acustico .....	15
1.1.4 Comfort visivo.....	18
1.2 Obiettivo .....	20
2 Metodo .....	21
2.1 Caso studio .....	21
2.2 Time line .....	33
2.3 Misure oggettive.....	35
2.2.1 Strumenti.....	37
2.3 Valutazione soggettive .....	43
2.3.1 Questionario trasversale .....	43
2.3.2 Questionario Longitudinale .....	45
2.4 Analisi dei dati .....	48
2.4.1 Analisi del dato oggettivo .....	48
2.4.2 Analisi del dato soggettivo .....	51
2.4.3 Correlazione tra dato oggettivo e soggettivo.....	53
2.4.4 Restituzione all'utente e indice sintetico IEQ.....	56
3 Risultati .....	59
3.3 Analisi del dato oggettivo .....	59
3.4 Analisi del dato soggettivo .....	83
3.5 Correlazione Oggettivo Soggettivo.....	106
3.6 Restituzione all'utente e indice sintetico IEQ.....	123
4 Discussioni .....	129
5 Conclusioni.....	133

# 1 Introduzione

Negli ultimi cinque anni c'è stata un' evidente crescita di interesse nell'ambito della qualità dell'ambiente interno, dovuta, in gran parte, ad una relazione tra le condizioni interne dell'ambiente e la performance dei lavoratori [1]. Sebbene l'evidenza scientifica a sostegno tra IEQ e la produttività lavorativa è questione di dibattito, a causa delle variabili soggettive che influenzano il lavoratore, non risultano esserci dubbi sul fatto che gli occupanti di un edificio siano generalmente più soddisfatti con livelli di benessere dell'ambiente superiori [2].

## 1.1 Comfort globale IEQ

La valutazione della qualità dell'ambiente interno utilizza normalmente due modalità di acquisizione del dato: misurazioni strumentali e somministrazione di questionari agli occupanti. Non vi è ancora presente una metodologia universalmente accettata e standardizzata per la valutazione soggettiva della qualità dell'ambiente interno [1]. La valutazione delle grandezze oggettive di IEQ sono generalmente raggruppate in quattro distinte categorie:

- Comfort termico
- Qualità dell'aria interna
- Comfort acustico
- Comfort luminoso

Questa suddivisione per la valutazione della qualità dell'ambiente interno è presente nella normativa EN 16798 [37] che valuta più di una variabile fisica (temperatura, velocità dell'aria, livello equivalente, ecc.) per la stima della qualità ambientale di ogni categoria.

Il concetto di comfort sta subendo un' evoluzione in quanto non si valutano più singolarmente i vari parametri, come di fatto avviene nelle normative, ma si considerano i diversi aspetti come un insieme di entità collegate che mettono l'occupante dell' ambiente in una situazione di comfort o discomfort.

Questa introduzione vuole fare un riassunto delle varie grandezze appena illustrate rapportate alla normativa di riferimento per mostrare i vari parametri che determinano il comfort ambientale degli edifici.

Per la valutazione delle grandezze oggettive indicate precedentemente, la EN16798-1, riferendosi alla progettazione di edifici e il relativo dimensionamento dei sistemi meccanici, fornisce criteri di progettazione per l'ambiente interno indicando delle categorie di comfort in base alla percezione degli occupanti.

*Tabelle 1.1.1 Categorie di comfort*

Categoria	Livello di qualità
IEQ 1	Alta
IEQ 2	Media
IEQ 3	Moderata
IEQ 4	Bassa

### 1.1.1 Comfort termico

Il comfort termico è un insieme di procedure d'analisi per stabilire qual è la percezione degli esseri umani nei confronti dell'ambiente. Ovvero stabilire se un ambiente è caldo, freddo o neutro.

Gli ambienti si dividono in due categorie, termicamente moderati dove l'obiettivo dello studio è raggiungere le condizioni di comfort come nelle abitazioni residenziali e negli uffici e ambienti severi dal punto di vista termico dove l'obiettivo è la tutela degli operatori soggetti a stress termico, questa condizione si può verificare negli ambienti industriali.

Il comfort termico è determinato da fattori fisici esterni dipendenti dall'ambiente in cui si trova il soggetto e la sua risposta a tali fattori è condizionata dalla percezione di ogni singolo individuo. La condizione di comfort non dipende quindi da dati puramente oggettivi ma necessita di un'analisi statistica.

La teoria di Fanger è frutto di numerosi esperimenti su soggetti con caratteristiche differenti (genere, età ecc.), con l'obiettivo di correlare aspetti fisici e aspetti soggettivi.

Questa teoria è applicabile ai soli ambienti moderati e ha come conclusione che una situazione di comfort termico si verifica nel momento in cui:

- Non c'è accumulo di energia nel corpo umano e quindi la temperatura del corpo è costante.
- I sistemi di termoregolazione sono quasi inattivi

Per mantenere una condizione di temperatura costante entrano in funzione nel corpo umano i sistemi di termoregolazione, che attivano fenomeni comportamentali come la sudorazione negli ambienti caldi e brividi in ambienti più freddi.

I fattori microclimatici che influenzano la percezione del soggetto e la sua condizione di comfort sono:

- La temperatura dell'aria  $T_a$  [°C]
- La velocità dell'aria  $v_a$  [m/s]
- L'umidità relativa  $\phi$  [%]
- La temperatura medi radiante  $T_{mr}$  [°C]

Inoltre vi sono fattori soggettivi che influenzano la percezione:

- Isolamento dell'abbigliamento  $I_{cl}$  [clo]
- Attività fisica [Met]

Il corpo umano può essere modellizzato come una macchina termica, cioè come un sistema termodinamico aperto che scambia massa, calore e lavoro. Per modellizzare un Indice di comfort dobbiamo effettuare un bilancio termodinamico del corpo umano.

La Potenza metabolica  $M$  [W] è un parametro soggettivo ed è l'energia termica e meccanica proveniente dal nutrimento, in genere viene riferita all'unità di superficie corporea pari mediamente:

$$A_b = 1.8 \text{ m}^2$$

La Potenza metabolica è quindi espressa in Met, 1 Met corrisponde al calore prodotto nell'unità di tempo e di superficie da una persona seduta a riposo.

$$1 \text{ Met} = 58,15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Il calore scambiato dal corpo umano, invece, si divide in più fattori che sono divisi nella quota sensibile dovuta alla differenza di temperatura del corpo umano tramite conduzione  $C_k$  [W], convezione  $C$  [W] e irraggiamento  $R$  [W] e il calore latente  $E_{sk}$  [W] dato dalla potenza termica evaporativa per sudorazione  $E_{sw}$  [W] e traspirazione

della pelle  $E_d$  [W]. Si aggiunge un'altra potenza termica dispersa quella dovuta alla respirazione che si divide a sua volta in forma di calore latente  $E_{ve}$  [W] e sensibile  $C_{ve}$  [W].

Conoscendo i flussi termici e di massa scambiati dal corpo umano possiamo applicare il 1° principio della termodinamica per i sistemi aperti, dove  $M$  la potenza metabolica rappresenta la quantità di calore generata,  $W$  è il lavoro svolto,  $S$  è la quantità di calore accumulata,  $Q'$  i flussi di calore dispersi e  $m'_s \cdot h_s$  i flussi di massa scambiati.

$$\frac{\delta U}{\delta \tau} = S = M - W - \sum Q' - \sum m'_s \cdot h_s$$

Per raggiungere la condizione di omeotermia l'accumulo di calore all'interno del sistema deve essere pari a zero.

$$S = 0$$

Riscrivendo il bilancio di energia con i vari fattori fisiologici l'equazione diventa:

$$M - W = C + R + C_k + C_{ve} + E_d + E_{sw} + E_{ve}$$

Dove  $C$  è la convezione,  $R$  l'irraggiamento,  $C_k$  la conduzione,  $E_d$ ,  $E_{sw}$  e  $E_{ve}$  rappresenta la potenza termica evaporativa. La potenza meccanica  $W$  può essere trascurata in quanto il rendimento meccanico è molto basso.

Il soddisfacimento della condizione di omeotermia è condizione necessaria ma non sufficiente a garantire il comfort. La teoria di Fanger sostiene che la condizione per il soddisfacimento del comfort termoigrometrico avviene quando i sistemi di termoregolazione sono attivi in minima parte, quindi vi è una correlazione con l'attività termica svolta.

In caso di attività ( $M > 1$ ) i soggetti sono in comfort se la Temperatura della pelle  $T_{sk}^* < 34^\circ\text{C}$  e  $E_{sw}^* > 0$ .

$$T_{sk}^* = 35,7 - 0,0275 \cdot \frac{M - W}{A_b}$$

$$E_{sw}^* = 0,42 \cdot A_b \cdot \left( \frac{M - W}{A_b} - 58,15 \right)$$

Al fine di prevedere la condizione di comfort e valutare quindi lo scostamento delle condizioni di benessere (discomfort), si utilizza un indice che correla la sensazione termica ad un voto relativo alla percezione dell'ambiente, chiamato PMV Predicted Mean Vote (Voto medio previsto). Ed è basato su una scala a 7 punti:

- -3 Molto freddo
- -2 Freddo
- -1 leggermente freddo
- 0 Neutro
- 1 Leggermente caldo
- 2 caldo
- 3 Molto caldo

La sensazione termica provata è proporzionale al carico termico  $L$ , che è dato dalla differenza tra l'energia termica generata e quella dispersa in condizioni di benessere, cioè riferiti alla  $T_{sk}^*$ .

$$L = (M - W) - (C + R + C_k + R_{res} + E_{sk}^*)$$

$L=0$  è la condizione di neutralità termica, in cui ci si ritrova in condizioni di comfort.

La correlazione tra la sensazione termica  $L$  ed il PMV è:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot L$$

Al PMV si associa un altro indice PPD Predicted Percentage of Dissatisfied (Percentuale prevista di insoddisfatti), per tener conto delle valutazioni puramente soggettive dei singoli individui e di conseguenza fortemente variabili. Anche in condizioni di neutralità termica statisticamente almeno il 5% dei soggetti non è soddisfatto dell'ambiente in cui si trova.

$$PPD = 100 - 95 * e^{-(0,03353 * PMV^4 + 0,2179 * PMV^2)}$$

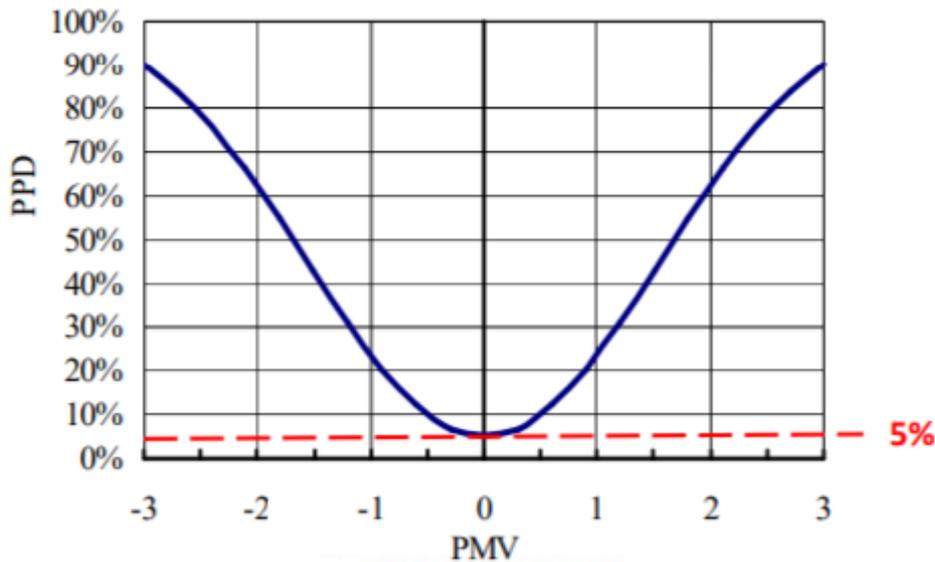


Figura 1.1.1.1 legame PMV e PPD

Infine la normativa EN16798-1 indica per ciascun intervallo del PMV e PPD una corrispondente categoria di qualità dell'ambiente interno. Come mostrato nella tabella 1.1.1.1.

Tabella 1.1.1.1 Categorie riferite agli indici PPD e PMV

Category	Thermal state of the body as a whole	
	Predicted Percentage of Dissatisfied PPD %	Predicted Mean Vote PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < + 0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < + 0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < + 0,7
IV	< 25	-1,0 < PMV < + 1,0

Le misurazioni di comfort termico dovrebbero essere effettuate dove è noto che gli occupanti trascorrono la maggior parte del loro tempo e in condizioni meteorologiche rappresentative della stagione fredda e calda. Il periodo di misurazione per tutti i parametri misurati dovrebbe essere sufficientemente lungo da essere rappresentante (10 giorni minimo). La valutazione dell'ambiente interno dell'edificio è fatta prendendo come riferimento differenti zone termiche dell'edificio [37].

## Comfort adattativo

Lo studio su cui si è basata la teoria di Fanger è stato svolto in laboratorio e detta dei limiti di adattamento che sono molto più stringenti rispetto a quelli tollerati dalle persone che occupano un ambiente reale. All'interno di un ambiente esistente, gli occupanti possono cambiare le condizioni e i parametri del comfort andando ad agire sul vestiario personale oppure aprendo, ad esempio, le finestre di un ufficio. Inoltre, per la teoria di Fanger, si presuppone che gli occupanti indossino abiti simili, svolgano attività simili e che, a parità di condizioni interne, in diverse zone climatiche le persone percepiscano lo stesso livello di comfort.

Il modello adattativo relaziona la temperatura interna di un ambiente con i parametri meteorologici esterni che influenzano l'adattamento psicologico all'ambiente del soggetto. Lo scopo è quello di valutare una condizione interna accettabile negli ambienti controllati naturalmente dove si possono aprire e chiudere le finestre per adattarsi a condizioni termiche interne più stringenti.

Questo metodo si applica per determinati ambienti in cui non è presente un sistema di raffreddamento meccanico in quanto, in questi ultimi, le persone tendono a pretendere prestazioni maggiori di omogeneità della temperatura nell'ambiente ed abituarsi di più alle basse temperature.

Per l'applicazione di questo metodo l'attività metabolica degli occupanti deve essere compresa tra 1.0 e 1.3 met e la resistenza dell'abbigliamento da 0.5 a 1.0 clo. Inoltre la temperatura media esterna non deve superare i 33.5 °C.

La EN16798-1 utilizza il metodo adattativo per la valutazione del comfort termico negli ambienti non meccanicamente controllati. Esso utilizza la temperatura operativa dell'ambiente termico e la mean outdoor temperature, come mostrato nella figura 1.1.1.2, per individuare tre diversi limiti delle categorie di comfort termico indicandole con tre linee tratteggiate differenti.

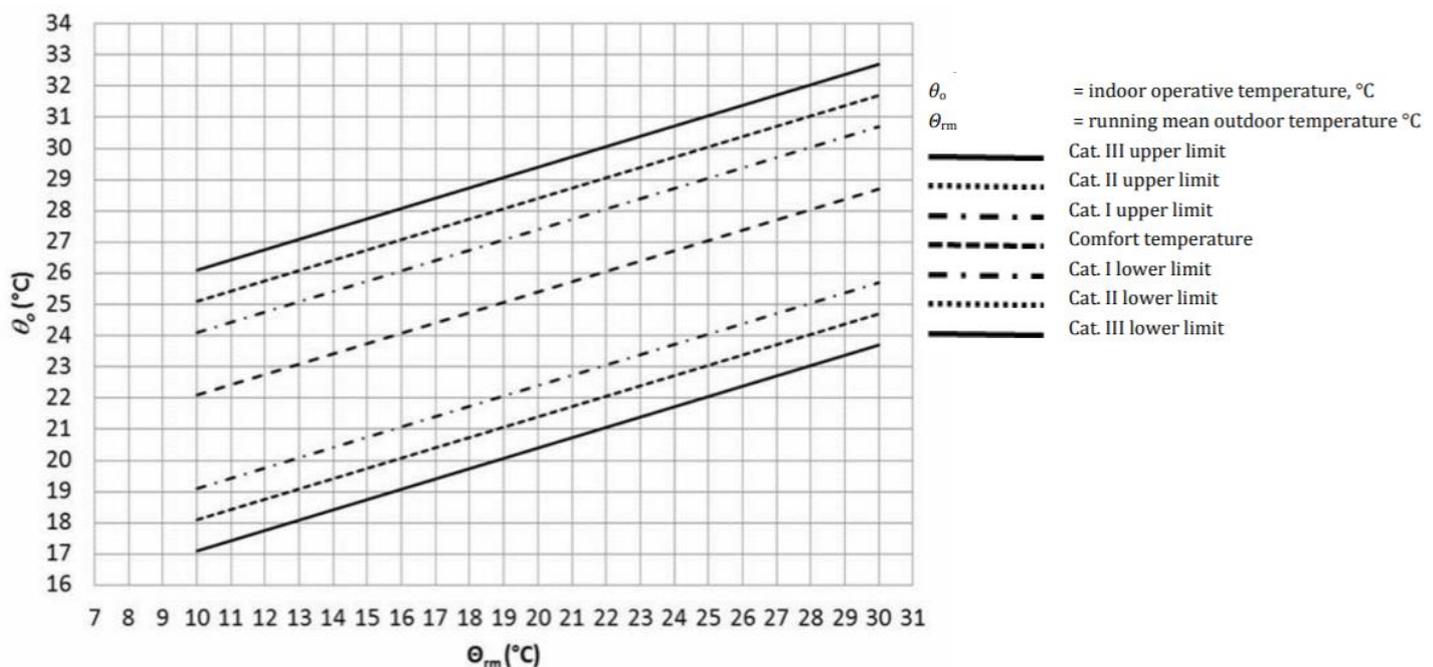


Figura 1.1.1.2 Comfort adattativo

## **Normativa di riferimento**

La normativa di riferimento per la valutazione del comfort termico degli ambienti interni è la EN16798 che per la progettazione e la valutazione ambientale si riferisce alla norma EN 15251 e la EN 7730. Queste normative definiscono e valutano i parametri del comfort che influiscono sulla produttività e sui vari aspetti del comfort degli occupanti. Inoltre specificano diverse categorie di criteri che possono avere un'influenza significativa sulla domanda di energia che un ambiente può richiedere.

Dal punto di vista del comfort termico stabiliscono i valori delle grandezze interne termiche di progetto basati sulle condizioni del comfort. Per stabilire i criteri di progettazione la normativa suddivide gli edifici in base al tipo di condizionamento presente, utilizzando l'indice adattativo e la temperatura per la progettazione di edifici privi di un impianto meccanico di raffrescamento e il PMV e la temperatura per la valutazione del comfort ambientale.

Per la valutazione dell'indice PMV si prende il valore dell'isolamento termico del vestiario che viene fornito dalle tabelle riportate nelle appendici della norma tecnica UNI EN ISO 77306, mentre per la valutazione del metabolismo energetico si utilizza la UNI EN ISO 8996.

Un'altra norma che, come le precedenti fissa i limiti per le condizioni di comfort termico, è la ASHRAE 55.

### 1.1.2 Qualità dell'aria

La qualità dell'aria interna si riferisce all'aria che si respira negli ambienti interni confinati [33].

La qualità dell'aria interna dipende principalmente dalla presenza degli inquinanti in ambiente; per la loro riduzione generalmente si agisce sulla ventilazione dell'ambiente, la riduzione delle fonti d'inquinanti e la filtrazione dell'aria.

La misurazione della qualità dell'aria interna si basa generalmente su un approccio indiretto della misurazione dei tassi di ventilazione di un ambiente. Un' adeguata ventilazione dovrebbe garantire un grado di soddisfazione agli utenti che percepiscono un' aria fresca e piacevole. La percezione di una cattiva qualità dell'aria negli ambienti chiusi è dovuta principalmente alla riduzione della concentrazione dell' ossigeno presente causato dai processi di respirazione e trasudazione dell'uomo che emette in ambiente: CO<sub>2</sub>, vapore acqueo e altre sostanze organiche.

I contaminanti presenti all'interno dell'ambiente sono generalmente superiori di quelli provenienti dall' esterno. Si vanno ad individuare quindi gli agenti inquinanti chimici di origine sia esterna che interna che determinano un rischio per la salute umana, essi sono:

- ETS (Fumo di tabacco)
- NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> (Ossidi di azoto)
- CO (Monossido di Carbonio)
- SO<sub>x</sub> (Ossidi di zolfo)
- PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> (Particolato)
- COV (Composti organici volatili)
- C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> (Benzene)
- Idrocarburi aromatici
- formaldeide

Indagini e misurazioni sul campo possono andare a inquadrare questi specifici inquinanti presenti nei vari ambienti. L'allegato I della normativa EN16798 fornisce i valori di riferimento per questi inquinanti.

Vi sono più metodologie di calcolo per la definizione della qualità dell'aria:

in primo luogo, si può individuare il tasso di ventilazione scegliendo in base al valore maggiore fra il tasso necessario per la riduzione dei rischi di uno specifico inquinante ed il tasso richiesto per ottenere il livello di qualità dell'aria interna desiderato, esso si esprime come segue:

$$q_{tot} = n * q_p + A_R * q_b$$

- $q_{tot}$  è il tasso di ventilazione totale [l/s]
- $n$  è il valore di progetto per il numero di persone
- $q_p$  è il tasso di ventilazione per occupazione [l/s\*persona]
- $A_R$  è la superficie del pavimento [m<sup>2</sup>]
- $q_b$  è il tasso di ventilazione per le emissioni dall'edificio [l/s\*m<sup>2</sup>]

In secondo luogo, la qualità dell'aria degli edifici può essere valutata analiticamente negli edifici in cui le persone sono la principale fonte d'inquinamento mediante la misurazione della concentrazione media di CO<sub>2</sub> nell'edificio[42]. Vengono così valutati i tassi di ventilazione necessari per una adeguata diluizione dell'aria ambiente:

$$qh = \frac{Gh}{Ch,i - Ch,o} * \frac{1}{\epsilon v}$$

- Qh è il tasso di ventilazione necessario per la diluizione [m<sup>3</sup>/s]
- Gh è il tasso di generazione di una sostanza [mg/s]
- Ch,i è il valore di riferimento per la sostanza [mg/m<sup>3</sup>]
- Ch,o è la concentrazione della sostanza nell'aria [mg/m<sup>3</sup>]
- εv è l'efficacia della ventilazione.

Infine, si possono utilizzare dei tassi di ventilazione minimi già predefiniti in base al numero di persone presenti oppure all'area dell' ambiente lavorativo. Viene quindi indicata la portata d'aria fresca che l'ambiente deve ricevere.

La normativa EN16798 stabilisce, per le varie categorie di comfort, delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> che si devono rispettare al fine di ricavare una buona qualità dell'aria e un determinato livello di aspettativa degli occupanti.

I livelli di concentrazione determinati dalla normativa sono mostrati nella seguente tabella:

Tabella 1.2.1.2 livelli di CO<sub>2</sub> per il dimensionamento degli ambienti

Category	Design ΔCO <sub>2</sub> concentration for living rooms (ppm above outdoors)
I	550
II	800
III	1 350
IV	1 350

La conoscenza limitata degli effetti di salute e comfort legate ai contaminanti negli ambienti civili rende impossibile sviluppare un singolo parametro IAQ che tenga conto di tutti i vari aspetti.

### Normativa di riferimento

Di seguito sono riportate le normative di riferimento dei sistemi impiantistici per la gestione degli inquinanti presenti nell'ambiente interno.

Gli impianti aeraulici permettono di ottenere, nei locali asserviti, il raggiungimento di una buona qualità dell'ambiente interno. La ventilazione agisce sull' aria mediante la sua diluizione con l'aria esterna e attraverso l'impiego di sistemi di filtraggio.

La norma europea EN 16798 specifica i requisiti per i parametri ambientali interni per la qualità dell'aria interna, riferendosi alla UNI EN 13779. L'allegato M della 16798-1, inoltre, fornisce dei suggerimenti e delle linee guida sui limiti orari di concentrazioni tollerabili in un ambiente interno.

Per la classificazione della qualità dell'aria interna nelle normative sopra indicate ci si riferisce a delle categorie di qualità, come mostrato nella Tabella 1.2.1.1 dove la classe IDA 4(\*) non viene considerata una qualità accettabile.

Tabella 1.2.1.1 *Categorie della qualità dell'aria interna*

<b>Categorie di qualità dell'aria</b>	<b>Corrispondenza UNI EN 13779</b>	<b>Corrispondenza EN16798</b>
Elevata	IDA 1	Categoria 1
Media	IDA 2	Categoria 2
Bassa	IDA 3	Categoria 3
-	IDA 4	Categoria 4

Come già spiegato in precedenza, negli ambienti in cui sono presenti dei contaminanti che possono avere effetti nocivi sulla salute umana, si vanno a verificare che i limiti per la determinata sostanza risultino accettabili. La EN 16798-1 stabilisce inoltre i criteri dettati dalla OMS<sup>1</sup> per le condizioni di salute dell'ambiente interno, indicando per le principali fonti dannose i valori massimi stabiliti.

Per locali dove la qualità dell'ambiente interno non è influenzato da particolari fonti d'inquinanti e nei quali l'inquinamento è causato principalmente dagli occupanti e dalla loro attività metabolica si fa riferimento, a livello normativo, alle concentrazioni della CO<sub>2</sub> presenti riportate nella tabella I.7 della 16798-1 e ai ricambi orari d'aria che il sistema di ventilazione deve garantire all'ambiente.

---

<sup>1</sup> Organizzazione mondiale della sanità

### 1.1.3 Comfort acustico

La grandezza fisica che caratterizza il suono è la pressione sonora, definita come la variazione di pressione rispetto alla pressione statica dell'aria [32]. Il suono si propaga nell'aria come un' onda piana caratterizzata da una specifica frequenza e una determinata lunghezza d' onda.

Generalmente il suono si esprime in base al suo livello di pressione  $L_p$  espresso in dB, ricavato dalla pressione sonora  $p$  generata da una sorgente rumorosa e la pressione di riferimento  $p_0$ :

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \text{ dB}$$

Il livello di pressione sonora  $L_p$  è misurato generalmente attraverso un microfono e, per un determinato ambiente, risulta essere la grandezza che meglio rappresenta la situazione di comfort acustico degli occupanti [3]. Le diverse tipologie di sorgenti acustiche come, ad esempio, il traffico stradale, il parlato umano e i sistemi meccanici possono influenzare negativamente le condizioni acustiche di un ambiente [4].

Ad ogni livello di pressione sonora misurato è associato una determinata percezione umana come rappresentato nella figura 1.1.3.1:

Pressione [Pa]			Livello di pressione sonora [dB]
≤ 200	kPa	dolore	≤ 200
...			...
2			160
0.63		150	
0.2		140	
0.063	Pa	danno	130
0.02			120
6.3		disturbo	110
2			100
0.63	90		
0.2	mPa	disturbo	80
63			70
20			60
6.3		comfort	50
2			40
630	30		
200	20		
63	μPa	comfort	10
20			0

Figura 1.1.3.1 livelli di pressione sonora e percezione umana

Un suono puro è caratterizzato da una specifica frequenza, mentre il livello di pressione sonora generato da una sorgente rumorosa è distribuito con continuità su tutte le frequenze. Le frequenze che sono percepibili dall'apparato uditivo umano sono comprese tra i 20 Hz e i 20000 Hz. Lo spettro in frequenza è generalmente diviso in bande di terzi d'ottava, ovvero in intervalli di frequenza centrale.

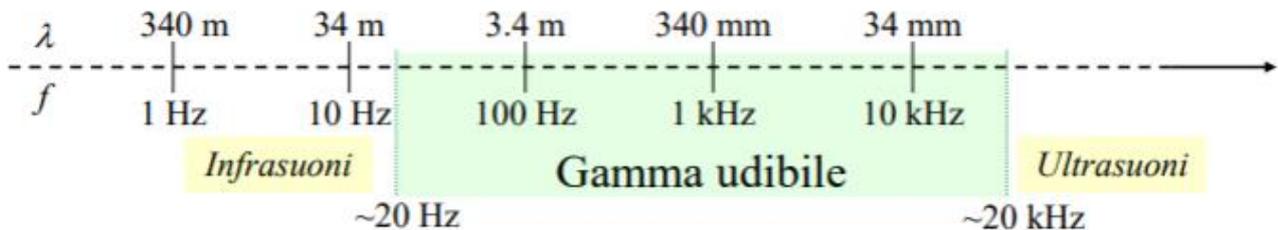


Figura 1.1.3.2 distribuzione dello spettro in frequenze

La percezione del livello di pressione sonora dipende fortemente dalla frequenza. Si fa riferimento all'audiogramma di Fletcher e Munson<sup>2</sup> in cui è riportato l'andamento delle curve di uguale sensazione uditiva al variare delle frequenze.

La sensazione acustica dipende dalla frequenza, il microfono deve quindi misurare l'intensità del suono come esso viene percepito dall'orecchio umano. È opportuno filtrare le pressioni in ingresso, riducendo l'intensità dei suoni a bassa frequenza, come indicato dall'audiogramma. Normalmente si utilizza la curva di ponderazione A per correggere i livelli di pressione sonora alle varie frequenze. Vediamo nella figura 1.1.3.1 che a 1000 Hz la correzione è pari a zero.

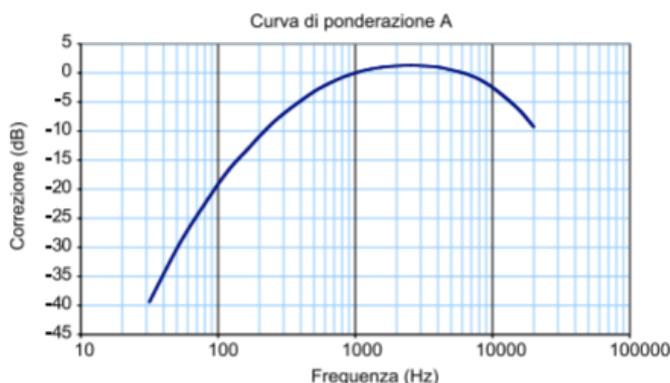


Figura 1.1.3.3 Curva di ponderazione A

Il campionamento in continuo del rumore percepito in ambiente è fondamentale per la determinazione della distribuzione del livello di pressione sonora nel tempo.

La misura di fondamentale interesse è il livello sonoro equivalente, che consente di attribuire ad un rumore variabile nel tempo T un singolo livello equivalente:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2}{p_0^2} \right) dB$$

<sup>2</sup> secondo la ISO-R2226

Quando si deve determinare il livello di pressione sonora in un ambiente è necessario conoscere le caratteristiche del campo sonoro di quell'ambiente. Il livello di pressione sonora in presenza di un ostacolo viene in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa. Il livello misurato, dipende non solo dall'onda direttamente generata dalla sorgente, ma anche dal contributo dell'energia riflessa sulle superfici che delimitano l'ambiente. Il contributo dell'energia riflessa è tanto più importante quanto più le superfici sono acusticamente riflettenti.

Gli ambienti chiusi, dove sono presenti sia sorgenti riflettenti che sorgenti dirette creano un campo sonoro comunemente chiamato semi riverberante. Uno dei problemi dovuti alla riverberazione è che la densità di energia sonora non si riduce a zero istantaneamente ma dipende dal tempo di riverberazione  $\tau_{60}$ , ovvero il tempo in cui il livello sonoro prodotto decresce di 60 dB. W.C. Sabine nel 1898 trovò la relazione che lega il tempo di riverberazione di un ambiente rispetto al suo volume  $V$  in  $m^3$  e le unità fonoassorbenti  $A$  in  $m^2$ :

$$\tau_{60} = 0,163 \frac{V}{A} s$$

Le unità fonoassorbenti  $A$  sono ricavate dalla somma tra i singoli fattori di assorbimento  $\alpha$  moltiplicati per la loro superficie  $S$ .

Infine, l'ultimo aspetto che influenza un ambiente chiuso è il fonoisolamento delle pareti che delimitano un ambiente da una sorgente esterna di rumore. Il potere fonoisolante  $R$  rappresenta la capacità di una struttura di trasmettere un'energia sonora rispetto all'energia incidente.

### **Normativa di riferimento**

Il livello equivalente continuo è alla base del criterio ISO 1996 e ISO 1999 dove si stabilisce una relazione tra livello di esposizione al rumore e perdita dell'udito.

Generalmente, la normativa di riferimento si riferisce alla valutazione del rumore presente in ambiente nell'ottica di progettazione dei sistemi di ventilazione, riscaldamento e raffrescamento come stabilito dalla 16798-1.

Il rumore di un locale deve essere valutato utilizzando la curva di ponderazione A, come definito dalla EN ISO 16032 e la EN ISO 10052, ed inseguito normalizzato rispetto al tempo di riverbero dello specifico ambiente, ottenendo un livello di pressione sonora equivalente normalizzato ( $L_{A,eq,nT}$ ). Vengono così valutati i rumori provenienti dai sistemi di servizio dell'edificio che potrebbero disturbare gli occupanti.

#### 1.1.4 Comfort visivo

Il comfort visivo è definito come la condizione di soddisfazione delle esigenze di ordine visivo espresse dall'utente. Esso deve in primo luogo garantire un adeguato compito visivo cioè l'osservazione di dettagli e oggetti in relazione allo svolgimento di una determinata attività. In secondo luogo una gradevolezza dell'ambiente interno rispetto alla luce presente evitando una sensazione di discomfort luminoso dovuto alle sorgenti naturali (Sole e volta celeste) e artificiali (Apparecchi luminosi).

Al fine di garantire un buon livello di visibilità dell'ambiente e di comfort tale da permettere lo svolgimento efficace dei vari compiti visivi viene utilizzato l'illuminamento come grandezza fotometrica per misurare il livello d'illuminazione presente nell'ambiente. L'illuminamento è definito come il rapporto tra il flusso luminoso incidente su una superficie e l'area della superficie stessa, l'unità di misura è il Lux.

I criteri di valutazione del valore di illuminamento presente su una determinata superficie devono essere selezionati in base ai compiti e alle attività svolte dall'utente.

Gli altri parametri che determinano la valutazione del comfort visivo sono:

- Uniformità dell'illuminamento

Nelle vicinanze della zona del campo visivo variazioni troppo elevate di illuminamento possono provocare fastidio e una lentezza nello svolgimento del compito visivo.

- Distribuzione delle luminanze

L'occhio umano percepisce gli oggetti in ragione della loro luminanza, la luminanza è il rapporto tra flusso luminoso emesso o riflesso da una superficie luminosa, per unità di angolo solido in una determinata direzione, e la superficie emettente proiettata su un piano perpendicolare alla direzione stessa, l'unità di misura è candela/m<sup>2</sup>.

- Direzionalità della luce

In base alla diversa inclinazione dell'angolo luminoso gli oggetti possono apparire in maniera differente.

- Colore della luce

Il colore della luce agisce a livello psicologico influenzando la gradevolezza di un ambiente.

- Resa del colore della luce

La resa cromatica CRI esprime il grado di restituzione di un determinato colore da parte di una sorgente luminosa. A livello inconscio si percepisce un disagio qualora una sorgente non sia in grado di restituire fedelmente un colore.

- Abbagliamento

Vi sono più tipologie di abbagliamento: da adattamento dovuto alla presenza nel campo visivo di sorgenti luminose con luminanze molto maggiori, da saturazione quando una buona parte del campo visivo è occupata da una superficie con luminanza molto elevata, abbagliamento perturbatore quando la sorgente luminosa è talmente forte da impedire temporaneamente la visione e l'abbagliamento molesto quando la sorgente crea un disagio alla persona.

- Contrasto di luminanza

Questo si verifica su superfici tipicamente riflettenti come schermi del computer e pagine di un libro durante lo svolgimento di un'attività tipicamente di lettura.

Un altro fattore che può influire nella quantità di luce dell'ambiente interno, è la quantità di luce diurna presente che può fornire tutta o in parte l'illuminazione necessaria dei compiti visivi.

### **Normativa di riferimento**

Per la valutazione dei livelli di illuminamento medio mantenuto nei luoghi di lavoro la EN16798 si riferisce alla normativa EN 12464-1 relativa alle caratteristiche di luce e illuminazione dei posti di lavoro.

La normativa sopra indicata individua per ciascun tipo di ambiente lavorativo e per ogni attività lavorativa svolta i valori minimi di illuminamento medio mantenuto, l'uniformità dell'illuminamento sul piano di lavoro, i gradi di abbagliamento e la resa cromatica della sorgente luminosa.

Per gli uffici e per i compiti visivi che richiedono un'attività di lettura il valore di illuminamento medio mantenuto è pari a 500 Lux.

## 1.2 Obiettivo

Questo studio si pone l'obiettivo di approfondire le tematiche legate ai vari aspetti della qualità dell'ambiente interno, per andare in primo luogo a fornire una restituzione del comfort percepito negli ambienti della sede dell'ARPA Valle d'Aosta. La percezione degli occupanti che si vuole fornire avviene attraverso uno studio di correlazione delle grandezze fisiche oggettive (misurate in campo) con i parametri soggettivi raccolti attraverso la somministrazione di questionari. Adottando un approccio multi dominio in cui, attraverso uno specifico metodo e un determinato approccio analitico, si vogliono unire i diversi domini che compongono gli aspetti del comfort ambientale che sono il comfort termico, la qualità dell'aria, il comfort acustico e il comfort luminoso in un unico indicatore del comfort globale.

Si vuole valutare inoltre, in base alla restituzione soggettiva, quando la normativa rappresenta correttamente la percezione soggettiva degli occupanti e quando, invece, non restituisce opportunamente le giuste correlazioni tra le grandezze oggettive e le percezioni soggettive.

Infine, il lavoro si pone anche l'obiettivo di riflettere sulle modalità attraverso cui i parametri finora menzionati possano essere restituiti all'utente, per fornirgli informazioni sulla qualità dell'ambiente in cui svolge le proprie attività ed eventualmente stimolarne un comportamento proattivo, teso alla riduzione dello spreco di energia ed una gestione adeguata dei diversi aspetti che concorrono alla creazione di un ambiente salutare e confortevole.

## 2 Metodo

Nel seguente capitolo sono mostrate e spiegate le modalità con cui si è svolto il progetto per raggiungere l'obiettivo proposto, andando a inquadrare in un primo momento gli ambienti in cui si è svolto lo studio discutendo sulle loro caratteristiche e la disposizione all'interno dell'ambiente parlando anche del campione di occupanti. In seguito sono spiegate le varie fasi dello studio che principalmente comprendono l'utilizzo di questionari per ricavare il dato soggettivo dell'utente durante le varie stagioni dell'anno e al momento delle misure e l'utilizzo di strumenti per le misurazioni oggettive dei parametri che caratterizzano l'ambiente interno. Dopodiché si va a spiegare nel dettaglio l'analisi dei dati soggettivi ed oggettivi spiegando i metodi statici applicati e la loro correlazione confrontata con la normativa di riferimento.

### 2.1 Caso studio

#### Generalità

La sede dell'ARPA Valle d'Aosta è situata nel comune di Saint-Christophe (AO) a 569 slm, e risulta essere inserita zona climatica E con 2850 gradi giorno. L'edificio è composto da più piani all'interno dei quali si trovano gli uffici e i laboratori chimico e microbiologico. Questi ultimi si trovano al piano terra dell'edificio e in essi vengono svolte analisi e attività di ricerca scientifica finalizzate al monitoraggio delle differenti matrici ambientali (acqua, suolo ...) del territorio della Valle d'Aosta. Al primo piano sono presenti gli uffici amministrativi e quelli delle altre aree tecniche che si occupano del monitoraggio della qualità dell'aria, degli agenti fisici (rumore e campi elettromagnetici) e dei cambiamenti climatici. Sul tetto dell'edificio è presente una stazione per il monitoraggio della radiazione ultravioletta ed altre apparecchiature di supporto alle attività di laboratorio.

Si possono fare delle considerazioni energetiche dell'edificio che presenta lungo tutte le facciate perimetrali una grossa parte di superficie vetrata che rende gli apporti di energia solari importanti, inoltre la stratigrafia della parete è di circa 40 cm, la struttura presenta quindi un'elevata capacità termica.



Figura 2.1.1 A sinistra la Sede ARPA Valle d'Aosta vista dalla strada

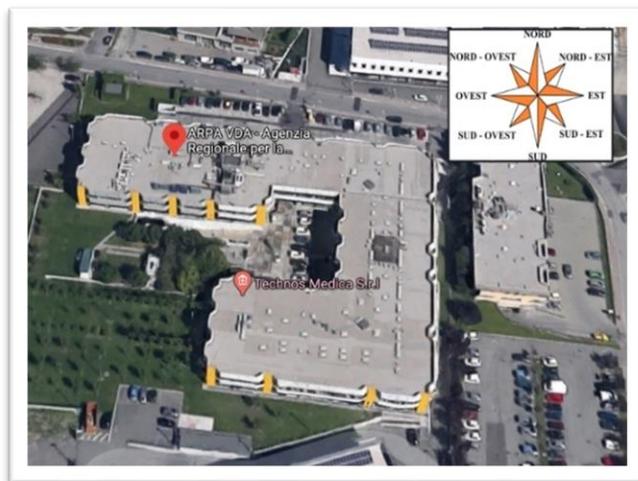


Figura 2.1.2 A destra l'immagine dal satellite

Lo studio di comfort microclimatico si è focalizzato su 3 ambienti all'interno della sede che sono caratterizzate da attività svolte, densità di occupazione, dimensione, esposizione solare differenti.

Ambienti monitorati:

- Ufficio rumore piano primo (lato nord)
- Ufficio radiazioni (NIR) piano primo (lato sud)
- Laboratorio acque piano terra (lato sud)

La scelta di questi ambienti è avvenuta principalmente per motivi logistici ed organizzativi legati all'effettuazione delle misure e poiché si differenziano tra di loro dal punto di vista dell'esposizione e della struttura. Un altro aspetto distintivo degli ambienti che ha influito sulla scelta è la differenza di controllo termico che c'era negli uffici rispetto al laboratorio: per motivi legati all'emergenza Covid-19 in tutti gli uffici sono stati spenti i ventil convettori presenti, in modo da ridurre l'eventuale circolazione del virus che si sarebbe potuta verificare nel locale climatizzato. Nei laboratori, invece, per motivi legati al mantenimento di un adeguato raffrescamento necessario alle apparecchiature dedicate alle analisi in esso svolte, gli aereotermi a soffitto sono rimasti accesi durante le ore lavorative e quindi durante il monitoraggio del IEQ svolto.

La ripresa delle attività in ufficio, avvenuta gradualmente dal mese di giugno a seguito della fase 1 si è alternata al lavoro da casa in smart working. Di conseguenza, nei giorni in cui sono state effettuate le misure, sia gli uffici che i laboratori non erano sempre completi di tutti gli impiegati normalmente previsti. Questo aspetto ha influito sia sul numero dei dati raccolti tramite i questionari sia sulla densità di occupazione degli ambienti che influisce direttamente su alcuni parametri del comfort come la qualità dell'aria, l'umidità e il rumore.

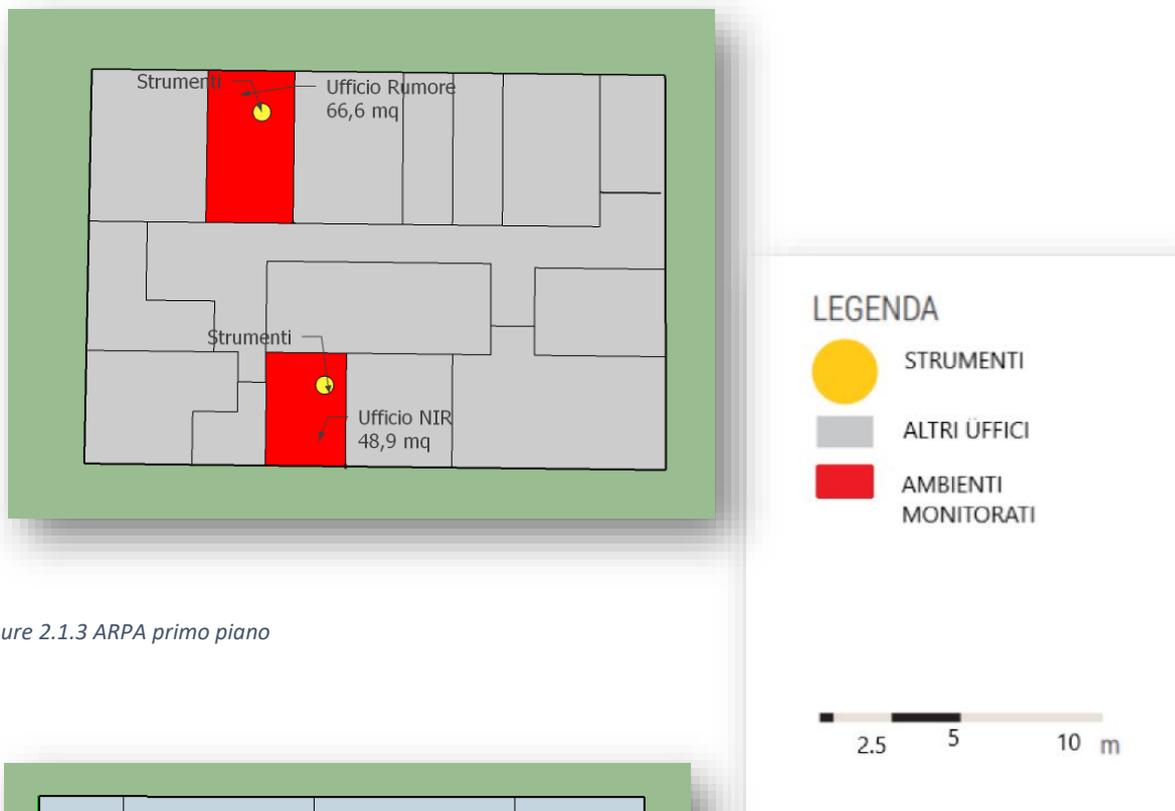


Figure 2.1.3 ARPA primo piano

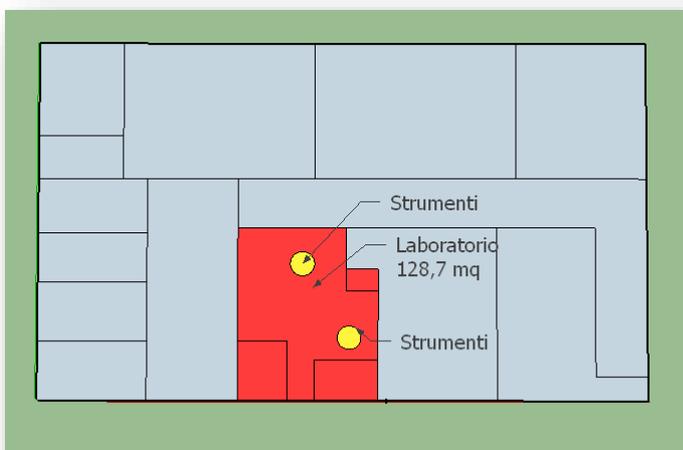


Figure 2.1.4 ARPA piano terra

## 1) Ufficio Rumore

L' ufficio è esposto a NORD è si trova al primo piano della struttura, all'interno lavorano tre persone che svolgono un'attività lavorativa d'ufficio (analisi dati, ricerca, attività di formazione ecc..) . L'ufficio da su un parcheggio e su una strada urbana mediamente trafficata. Presenta una serie di porte finestre apribili che danno sun un piccolo balcone di circa 8 mq.

Tabella 2.1.1 Scheda ambiente Ufficio rumore

Elementi del rilievo	
Volumetria [m <sup>3</sup> ]	149,4
Superficie totale [m <sup>2</sup> ]	55,3
Esposizione finestre	NORD
Balcone	SI
Numero apparecchi luminosi	9
Sorgente luminosa	fluorescenti
Numero di occupanti generali	3
Numero armadi	2
Numero scrivanie	4
Terminali riscaldamento/raffrescamneto	2
Tipo terminale apparecchiature	fancoil computer
Schermature interne	Veneziane
Schermature esterne	NO
Porte finestre apribili	6
Tipo vetro	Doppio vetro
Tipo telaio	PVC
Controsoffitto acustico	SI

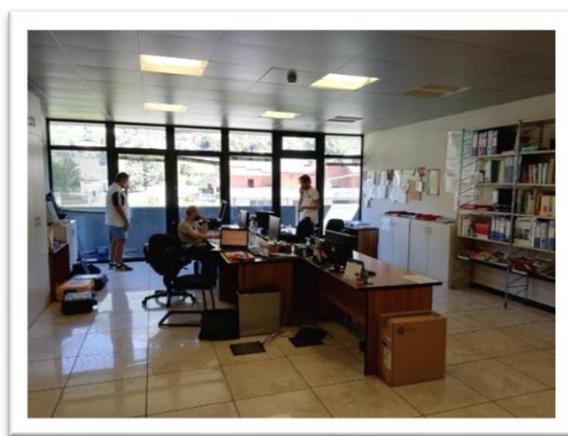
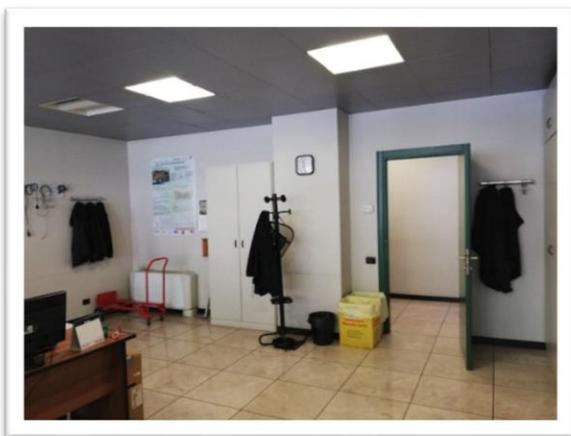


Figura 2.1.5 foto dell' Ufficio rumore



Figura 2.1.6 Foto del balcone e dell'area perimetrale esterna dell'ufficio

Nelle figure 2.1.7 e 2.1.8 vengono rappresentate le planimetrie dell'ufficio e dove sono stati posizionati i sensori e gli strumenti, si è deciso di posizionare il testo 480 al centro della stanza vicino alle scrivanie ed accanto ad esso sulle scrivanie è stato posiziona la strumentazione dalle dimensioni più ridotte vedi la figura 3.1.9.

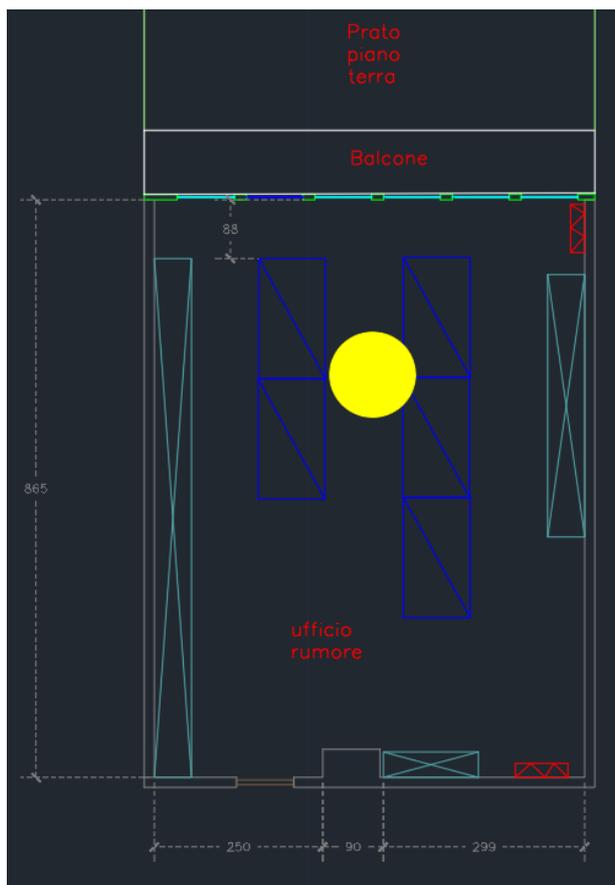


Figure 2.1.7 Planimetria Ufficio Rumore

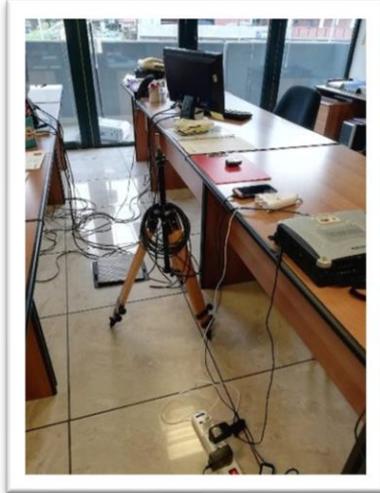
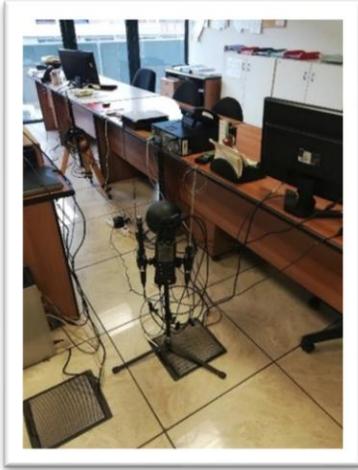


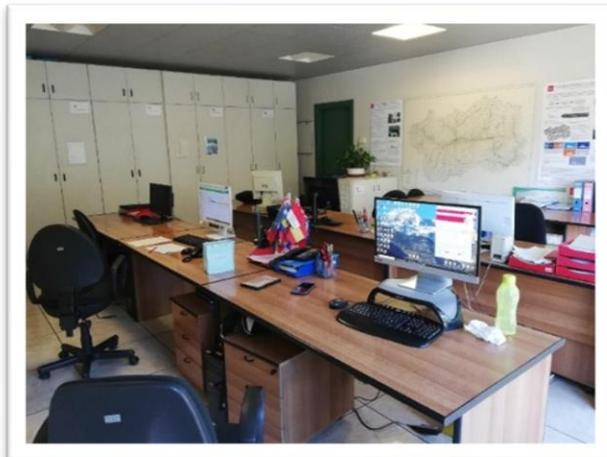
Figura 2.1.9 Foto del SoundBook, Air Beam, Testo 480, SEM, testo 174H

## 2) Ufficio NIR

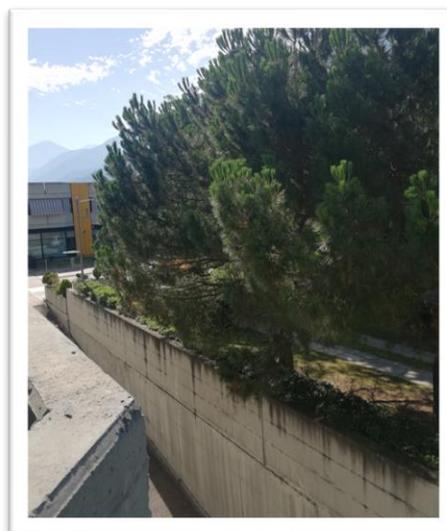
Il second ufficio a differenza del precedente è esposto a SUD, si trova sempre al primo piano della struttura, all'interno lavorano generalmente tre persone che svolgono un'attività d'ufficio. Anche in questo caso l'ufficio ha una serie di porte finestre che danno su un balcone posto al di sopra di un prato.

Tabella 2.1.2 Scheda ambiente Ufficio NIR

Elementi del rilievo	
Volumetria [m <sup>3</sup> ]	129,9
Superficie totale [m <sup>2</sup> ]	48,9
Esposizione finestre	SUD
Balcone	SI
Numero apparecchi luminosi	6
Sorgente luminosa	Fluorescente
Numero di occupanti generali	3
Numero armadi	3
Numero scrivanie	6
Terminali riscaldamento/raffrescam neto	2
Tipo terminale	fancoil
apparecchiature	computer
Schermature interne	Veneziane
Schermature esterne	Oscuranti
Porte finestre	5
Tipo vetro	Doppio vetro
Tipo telaio	PVC
Controsoffitto acustico	SI
All' esterno	a circa 5 metri presenti due alberi



*Figura 2.1.10 foto dell' Ufficio NIR*



*Figura 2.1.11 Vista all'esterno*

Nella figura 2.1.12 viene rappresentata le planimetrie dell'ufficio e dove sono stati posizionati i sensori e gli strumenti, si è deciso di posizionare anche qui il testo 480 al centro della stanza ed accanto ad esso sulle scrivanie è stato posiziona la strumentazione dalle dimensioni più ridotte vedi la figura 3.1.13.

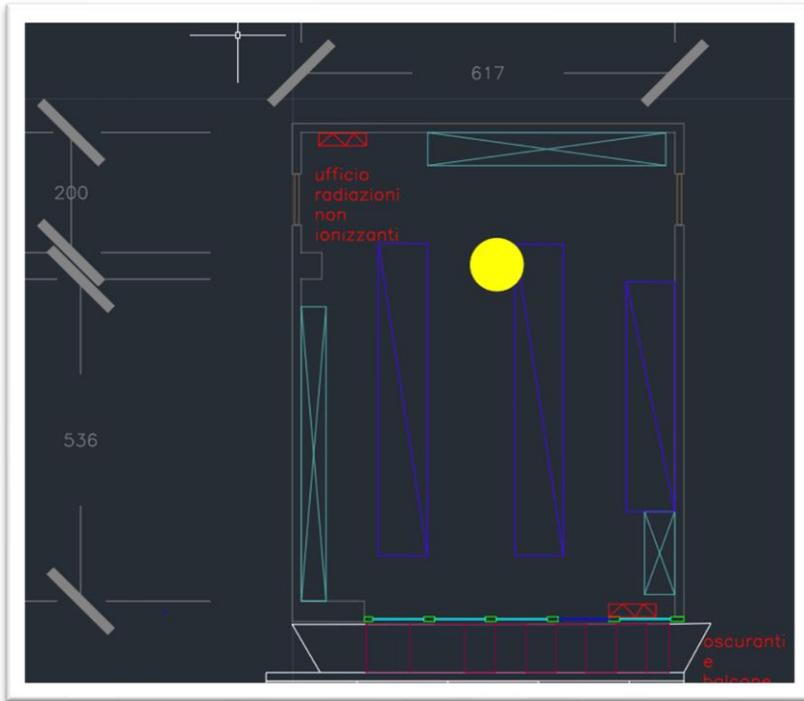


Figure 2.1.12 Planimetria

Nella seconda foto nella valigetta gialla è rappresentato il microfono Briel che ha accompagnato le misure nell'ufficio NIR, quando vi sono state problematiche legate al Semaforo acustico.

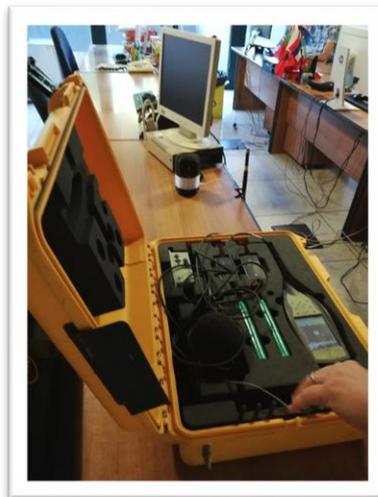


Figure 2.1.13 Foto del Briel, Air Beam, Testo 480, SEM, testo 174H

### 3) Laboratorio analisi acque

Il laboratorio si trova al piano terra della struttura ed è esposto a SUD, all'interno di esso lavorano in totale cinque persone che svolgono attività da laboratorio. Durante il periodo Covid-19 gli utenti erano sempre al massimo 3 che lavoravano nello stesso momento. A differenza degli Uffici qui l'orario di lavoro era spalmato su un numero maggiore di 8 ore lavorative in quanto i dipendenti seguivano le tempistiche dettate dalle analisi giornaliere.

L'ambiente è posto esattamente sotto l'ufficio delle radiazioni, quindi valgono le stesse considerazioni legate agli apporti solari. Inoltre rispetto agli uffici possiede una volumetria maggiore e più ambienti al suo interno. Durante la campagna di misure è stato considerato la sola parte open-space quella in cui si sono sistemati gli strumenti di misura e dove gli occupanti hanno risposto al questionario nonché dove gli occupanti passano la maggior parte del tempo durante l'orario di lavoro.

Tabella 2.1.3 Scheda tecnica Laboratorio

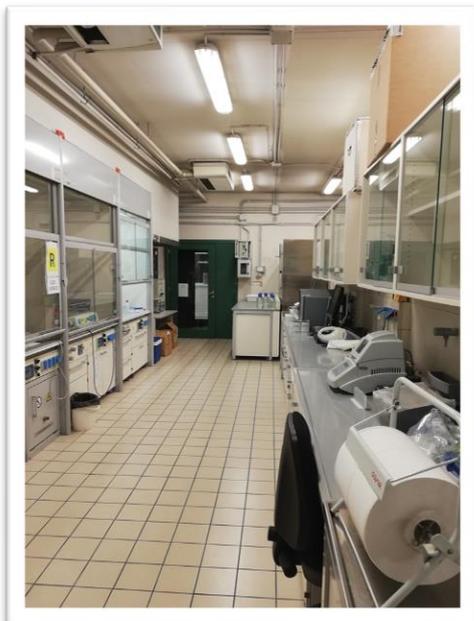
Elementi del rilievo	
Volumetria [m <sup>3</sup> ]	392,6
Superficie totale [m <sup>2</sup> ]	122,7
Numero lampade	17
Ambiente	Armadi, scrivanie, strumentazione, computer
Numero scrivanie	2
Finestre	6
Occupanti	5
Esposizione finestre	SUD
Numero apparecchi luminosi	23
Sorgente luminosa	Fluorescente
Terminali riscaldamento/raffrescameto	3
Tipo terminale	fancoil
Apparecchiature	Computer, Cappe, banconi con varia strumentazione, frigoriferi, lavandini, analizzatori, miscelatori, scrivanie
Schermature interne	Veneziane
Schermature esterne	tende
Tipo vetro	Doppio vetro
Tipo telaio	PVC
Controsoffitto	Calcestruzzo

Il Laboratorio da verso un prato esterno soleggiato, durante il periodo estivo come si può notare dalla figura 3.1.14 gli oscuranti sono abbassati per ridurre il carico dovuto agli apporti solari.



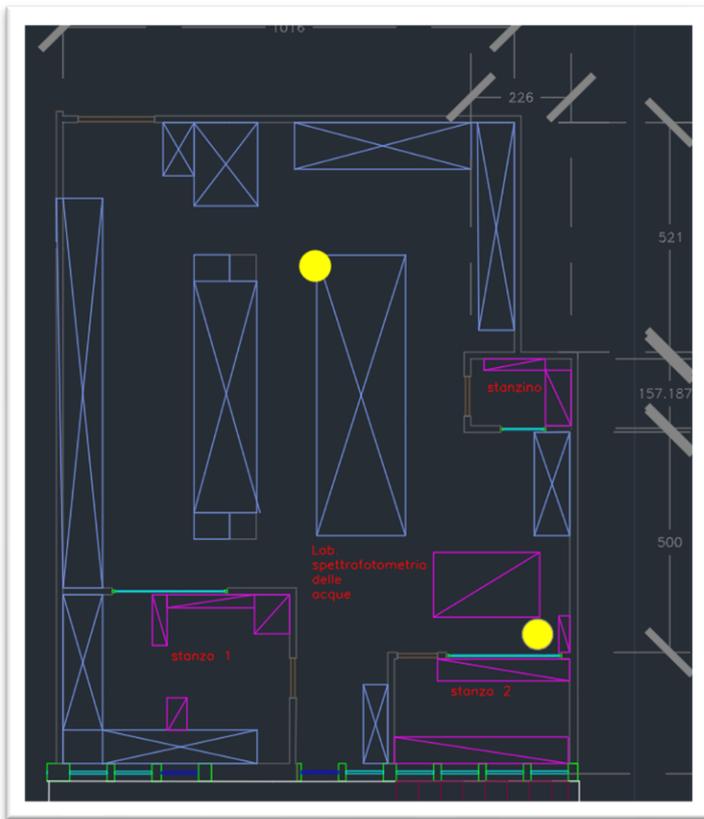
*Figura 2.1.14 esterno del Laboratorio*

All'interno del laboratorio sono presenti un grande numero di strumenti per l'analisi spettrale delle acque. Un aspetto importante è stato quello di sistemare la strumentazione in una postazione sicura in modo da non creare eventuali incidenti al personale. L'attività di questo laboratorio è abbastanza dinamica in quanto l'occupante passa da una postazione all'altra frequentemente.



*Figura 2.1.15 strumenti del Laboratorio openspace*

Nella figura 2.1.16 è riportata la planimetria complessiva di tutto il Laboratorio, la strumentazione è sempre stata posta nell' ambiente openspace.



Strumenti

Figura 2.1.16 Planimetria Laboratorio

Foto delle due postazioni: Nella figura 2.1.17 è rappresentata la postazione principale di misura puntuale e di misura continua posta al fondo dell'ambiente openspace, mentre nella figura 2.1.18 vi è la seconda postazione dove si sono inseriti il secondo SEM e il secondo data logger.

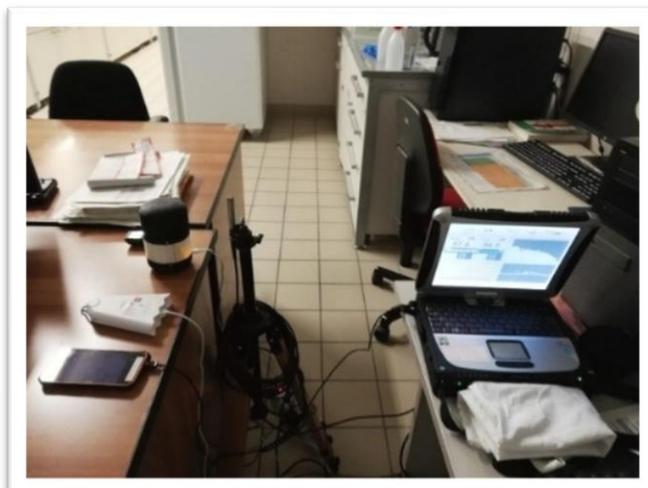
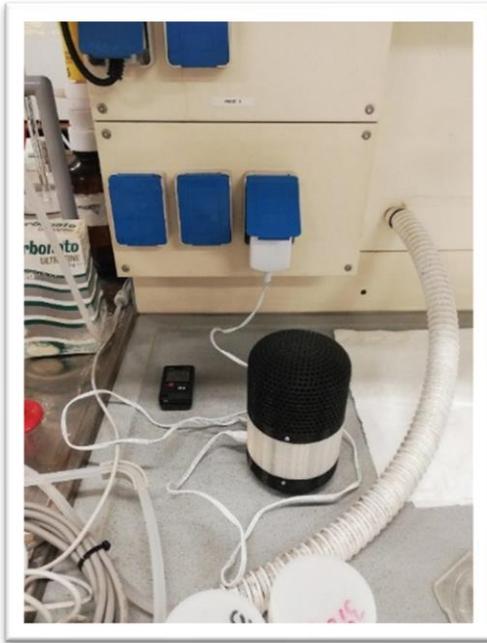


Figura 2.1.17 Postazione principali della strumentazione di Laboratorio



*Figura 2.1.18 La seconda postazione di misure continue*

## 2.2 Time line

Lo studio di monitoraggio della qualità dell'ambiente interno è avvenuto attraverso diversi stadi di misure sul campo e la fornitura di due diversi questionari. Nel seguente paragrafo sono riassunte le varie fasi dello studio dei tre ambienti mostrati nel capitolo precedente e sono presentate nell'ordine cronologico in cui sono state effettuate. Per ogni fase sono riportate il tipo di monitoraggio effettuato e il periodo temporale in cui è avvenuto.

### **FASE 1** dal 10/08 – 14/08

E' avvenuta nella prima settimana in cui si sono svolte le procedure burocratiche e si sono registrati i primi dati soggettivi degli occupanti relativi alle condizioni tipiche di comfort percepito. Inoltre, in questo periodo si sono recuperate le varie informazioni riguardo le caratteristiche dei vari ambienti tra cui le dimensioni, le caratteristiche architettoniche e termiche e si è deciso come procedere a livello operativo sulla seconda fase. Agli intervistati in questo periodo temporale è stata fornita la seguente documentazione:

- Somministrazione del foglio di consenso informativo: in cui si informa l'intervistato delle informazioni relative allo scopo e alle caratteristiche dello studio.
- Somministrazione di un questionario trasversale: con l'obiettivo di valutare il grado di soddisfazione rispetto alla qualità ambientale, acustica, luminosa e alla qualità dell'aria percepita nelle diverse stagioni dagli occupanti.

### **FASE 2** dal 17/08 al 02/09

- 17/08-19/08 Settimana 1
- 24/08-26/08 Settimana 2
- 31/08-02/09 Settimana 3

La seconda fase rappresenta la parte centrale dello studio che si è svolto per un totale di tre settimane e precisamente le ultime due di Agosto e la prima di Settembre del 2020; le giornate interessate andavano dal lunedì al mercoledì durante le 8 ore lavorative, dalle 9:00 alle 17:00. In questo arco temporale si sono valutate le condizioni e la qualità ambientale degli ambienti monitorati, occupandoci sia degli aspetti soggettivi che degli aspetti oggettivi. Inoltre, tutte le grandezze fisiche monitorate tramite i sondaggi e le misure sono state raccolte globalmente nello stesso intervallo temporale. Attraverso i singoli sondaggi si è seguito un approccio multi-dominio in modo da poter collegare le varie grandezze misurate [5]. Di seguito sono elencate le modalità di rilievo dei dati soggettivi ed oggettivi che verranno approfondite più specificamente nel paragrafo 2.3 e 2.4 del medesimo capitolo dove si andranno inoltre a individuare le grandezze fisiche.

- Monitoraggio in continuo: queste misure sono fatte in continuo nelle ore lavorative su tre giorni, per tre settimane, per tutti gli ambienti. Le rilevazioni in continuo forniscono una restituzione del dato in tutte le giornate di misura per le sole grandezze fisiche di monitoraggio continuo.
- Misure puntuali: queste misure avvengono sempre per l'intera giornata lavorativa di 8 ore ma solo per un giorno alla settimana per ciascun ambiente. Si otterranno così 3 misure per ogni ambiente nelle tre settimane per ogni grandezza monitorata.
- Somministrazione di un questionario longitudinale: nelle giornate di misure puntuali vengono distribuiti due questionari, uno al mattino e uno al pomeriggio.

Di seguito nella figura 2.2.1 sono riportati i monitoraggi spiegati precedentemente e le modalità con le quali sono stati organizzate a livello cronologico le varie fasi. La prima settimana, dal 10/08 al 14/08, è indicata la prima fase in cui gli intervistati hanno potuto rispondere al questionario trasversale. In seguito dal 17/08 è iniziata la seconda fase dove ogni giorno, dal lunedì al mercoledì, sono avvenute le misure continue mentre nei vari ambienti, a rotazione, è stata posizionata la strumentazione e gli occupanti hanno risposto ai questionari nelle giornate di misurazione puntuale.

Si è deciso di far ruotare i giorni delle misure puntuali durante le tre settimane come mostrato nella figura 3.2.1. Ad esempio, l'ufficio Rumore ha iniziato le misurazioni il lunedì della prima settimana, il mercoledì della seconda settimana ed infine il martedì per l'ultima settimana.

Le misure dei Composti organici volatili (COV) è avvenuta in continuo nei tre ambienti in corrispondenza delle giornate di misure puntuali solamente nell'ultima settimana, questo perché i radielli che misurano i COV erano disponibili solo dal 31/08.

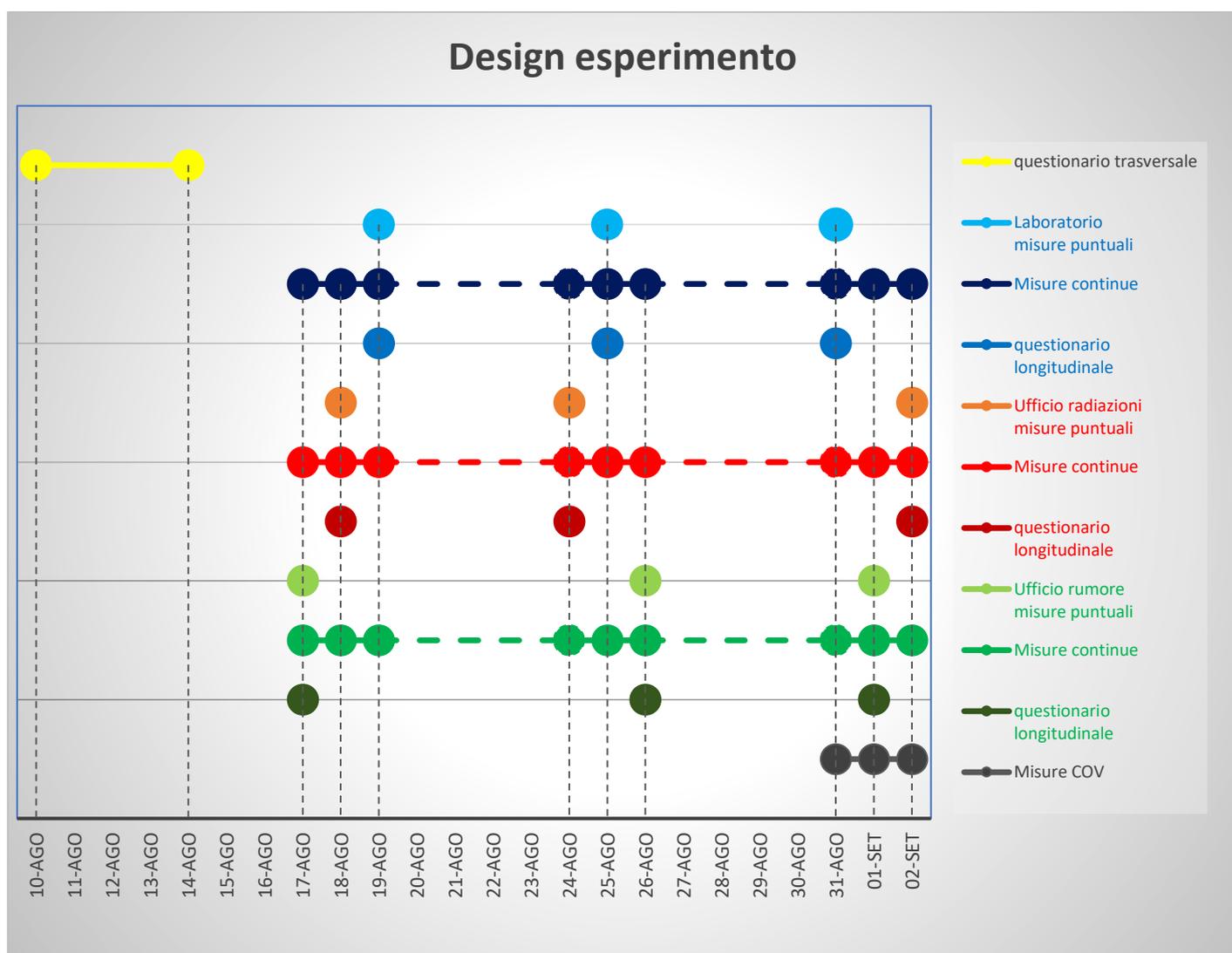


Figura 3.2.1 Design dell' esperimento

### 2.3 Misure oggettive

Gli Occupanti di un edificio sono esposti a molteplici fattori ambientali che comprendono fattori termici, visivi, acustici e relativi alla qualità dell'aria. Le misure si sono basate su un approccio multi-dominio [5] cercando quindi di misurare le varie grandezze fisiche che caratterizzano il comfort ambientale riferendosi alla normativa EN16798. Per ogni fattore ambientale ci sarà più di una grandezza fisica misurabile che sarà successivamente elaborata ed utilizzata per calcolare indici o valori che la normativa predispone al fine di valutare il livello di comfort ambientale.

Le misure sono state effettuate durante l'orario lavorativo dei dipendenti dell'ARPA Valle d'Aosta dove i locali sono occupati dalle 9:00 alle 17:00.

Le misure svolte sono avvenute in due periodi temporali differenti:

Misure continue: in questo caso studio le grandezze monitorate con le misure continue sono la temperatura interna, l'umidità interna, la pressione sonora e il campo magnetico 50Hz. Come già discusso nel paragrafo 2.2 le misure continue durano nell'arco di 8 ore lavorative, lungo tre giorni consecutivi, per tutti e tre gli ambienti in tutte e tre le settimane. Queste misure servono per avere una comprensione globale dell'andamento temporale dei vari ambienti riguardo le grandezze citate in precedenza.

Misure Puntuali: le grandezze fisiche monitorate sono la temperatura dell'aria, la temperatura media radiante, l'umidità relativa, la velocità dell'aria, l'illuminamento, la concentrazione di CO<sub>2</sub>, il particolato atmosferico e i composti organici volatili. Tali misure si svolgono a rotazione, in giorni diversi nei vari ambienti. Esse sono la fonte principale di dati per ricavare i vari indici ambientali. Questi indici a loro volta vengono poi correlati con i dati soggettivi.

Nella tabella 2.2.1 sono riassunti, per le misure puntuali e continue, i parametri misurati dallo strumento corrispondente utilizzato nella campagna di misurazione.

Gli strumenti delle misure continue che comprendono il testo 174H, il SEM e gli Emdex sono rimasti in una postazione fissa durante tutto il periodo di misurazione, mentre per le misure puntuali il testo 480, il radiello, l'Airbeam e il fonometro sono stati posizionati vicino agli strumenti continui ma venivano spostati per ogni giorno delle misure puntuali nei rispettivi ambienti.

Si è deciso inoltre di monitorare il livello del campo magnetico a 50 Hz presente nei vari uffici, questo non rientra nelle grandezze del comfort ambientale ma può essere un parametro interessante da valutare dal punto di vista della salute e la sicurezza degli ambienti interni.

Tabella 2.2.1 Parametri e strumenti di misura

Aspetto Ambientale	Parametri e grandezze	Simbologia	Normativa riferimento	di Strumento	Misura Puntuale	Misura continua
Comfort Termico	Temperatura interna[°C]	Ti [°C]	EN 16798	Testo 480 Testo 174H	x	x
	Temperatura esterna [°C]	Te [°C]	EN 16798	Hobo		x
	Umidità relativa interna [%]	URi [%]	EN 16798	Testo 480 Testo 174H	x	x
	Umidità relativa esterna [%]	URe[%]	EN 16798	Hobo		x
	Temperatura media radiante [°C]	Tmr [%]	EN 16798	Testo 480	x	
	Velocità dell'aria [m/s]	v <sub>aria</sub> [m/s]	EN 16798	Testo 480	x	
Qualità dell'aria	Concentrazione di CO <sub>2</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [ppm]	EN16798	Testo 480	x	
	Composti Organici Volatili [µg/m <sup>3</sup> ]	COV [µg/m <sup>3</sup> ]	EN16798	Radiello	x	
	Particolato: PM1, PM2.5, PM10 [µg/m <sup>3</sup> ]	PM1 [µg/m <sup>3</sup> ], PM2.5 [µg/m <sup>3</sup> ], PM10 [µg/m <sup>3</sup> ]	EN16798	Air Beam	x	
Comfort acustico	Livello di pressione sonora	L <sub>eq</sub> [dBA]	EN 16464 ISO 10052 ISO 1996	SEM Fonometro	x	x
Comfort Luminoso	Illuminamento	Em [Lux]	EN 12464	Testo 480	x	
Campo magnetico 50Hz		B [mT]		Emdex		x

### 2.2.1 Strumenti

La strumentazione per lo svolgimento delle misure oggettive nei vari ambienti è stata reperita, in parte, dal Politecnico di Torino che ha fornito il Testo 480, il testo 174H e i SEM e, in parte, dalla stessa ARPA Valle d'Aosta che ha messo a disposizione il fonometro, gli HOBO e l'Air Beam.

Di seguito sono mostrati i vari strumenti utilizzati nello studio con le varie specifiche tecniche suddivisi per aspetto ambientale monitorato.

#### Testo 480:

Il primo strumento che si presenta è il testo 480, un multi sensore utilizzato per l'analisi climatica dell'ambiente che, oltre a monitorare le grandezze legate agli aspetti termici, misura inoltre la concentrazione di CO<sub>2</sub> e l'illuminamento. All'interno del Testo sono presenti vari programmi di misura, in particolare si può andare a valutare direttamente l'indice PMV e PPD seguendo la normativa ISO 7730, avendo come input la temperatura, l'umidità e la temperatura media radiante e la velocità dell'aria.



Figura 2.2.1.1 Testo 480 e sonde collegate

Il testo è stato montato su un cavalletto all'altezza di 0,6 m per misurare il comfort dell'utente seduto e a 1,1 m per l'utente in piedi. Il testo è dotato di connettori per collocare le sonde per la misura del livello di comfort globale. Si mostrano ora le varie sonde utilizzate e le grandezze fisiche che hanno misurato:

#### Sonda misura grado di turbolenza:

Questa sonda fornisce tre valori di output a schermo: Temperatura aria, grado turbolenza/velocità aria e pressione assoluta che permette una compensazione automatica.

	Temperatura aria °C	Velocità aria m/s	Pressione assoluta hPa
Campo di misura :	da 0 °C a 50 °C	da 0 m/s a 5 m/s	da 700 hPa a 1100 hPa
Precisione:	±0.5 °C	±0.03 m/s	±3 hPa
Fondo scala:	0,1 °C	0,01 m/s	0,1 hPa

### Sonda a globo:

Viene utilizzata per la misura globotermometrica, nell'ambito del comfort globale ricava la temperatura media radiante per la valutazione del PMV. La Temperatura media radiante è funzione del punto in cui è posta la persona all'interno del locale, il globotermometro insieme al testo deve essere posizionato in una zona rappresentativa della stanza. Le dimensioni della sfera è di 150 mm di diametro.

	Temperatura media radiante °C
Campo di misura :	da 0 °C a 120 °C
Precisione:	Classe 1
Fondo scala:	0,1 °C

### Sonda IAQ

Sonda utilizzata per analizzare le misurazioni relative alla qualità dell'aria in ambienti chiusi, concentrazione di CO<sub>2</sub>, umidità, temperatura e pressione assoluta. Si è sempre utilizzata la temperatura misurata dalla sonda IAQ rispetto a quella misurata dalla Sonda che misura il grado di turbolenza in quanto meno soggetta al movimento dell'aria dell'ambiente.

	Temperatura aria °C	Umidità relativa %	Concentrazione CO <sub>2</sub> ppm	Press. Assoluta hPa
Campo di misura :	da 0 °C a 50 °C	Da 0 % a 100 %UR	Da 0 ppm CO <sub>2</sub> a 10000 ppm CO <sub>2</sub>	da 700 hPa a 1100 hPa
Precisione:	±0.5 °C	1,8 %UR	50 ppm CO <sub>2</sub>	±3 hPa
Fondo scala:	0,1 °C	0,1 %UR	1 ppm CO <sub>2</sub>	0,1 hPa

### Sonda Luxmetrica

Per la valutazione del comfort visivo è inserita un'ulteriore sonda che legge il valore d'illuminamento espresso in Lux posto sulla superficie piana dell'ambiente di lavoro, sulla scrivania nel caso dell'ufficio e sul bancone nel caso del laboratorio.

	Illuminamento Lux
Campo di misura :	da 0 Lux a 100000 Lux
Precisione:	Classe C conforme a DIN 5032-7
Fondo scala:	1 Lux

**Testo 174H:**

Un sensore resistente a lunga stabilità che funziona a batteria. Rileva temperatura e umidità relativa nell'ambiente di misurazione. Sono stati presi 4 data logger e sono stati lasciati a misurare in continuo per 3 settimane consecutive. Hanno fornito i valori di temperatura e umidità per le misurazioni continue degli ambienti interni.

	Temperatura aria	Umidità relativa
Campo di misura :	da -20 °C a 70 °C	Da 0 % a 100 %
Precisione:	$\pm 0.5$ °C	$\pm 3$ % a 25°C
Fondo scala:	0,1 °C	0,1 %



Figura 2.2.1.2 Testo 174H

**HOBO:**

L'Hobo è un data logger esterno, montato su un' asta all'interno di una scatola di protezione a circa 1,5 m di altezza dal suolo. Durante la campagna di misure ne sono stati utilizzati tre che sono stati posizionati all'esterno di ogni ambiente con lo scopo di misurare la temperatura e l'umidità esterna. Sono stati lasciati in continuo fissi per tutte e tre le settimane di misurazioni.

	Temperatura aria	Umidità relativa
Campo di misura :	da -20 °C a 70 °C	Da 0 % a 100 %UR
Precisione:	$\pm 0,5$ °C	$\pm 2$ %
Fondo scala:	0,1 °C	0,1 %



Figura 2.2.1.3 HOBO posizionato fuori dal Laboratorio

### Fonometro:

Per valutare il livello di rumore negli ambienti dell'ARPA si è utilizzato per l'analisi puntuale il Soundbook uno strumento di misura acustico multicanale che collegato ad un microfono di classe 1, ha registrato i livelli di pressione sonora e ha fornito un' analisi in frequenza dello spettro sonoro.

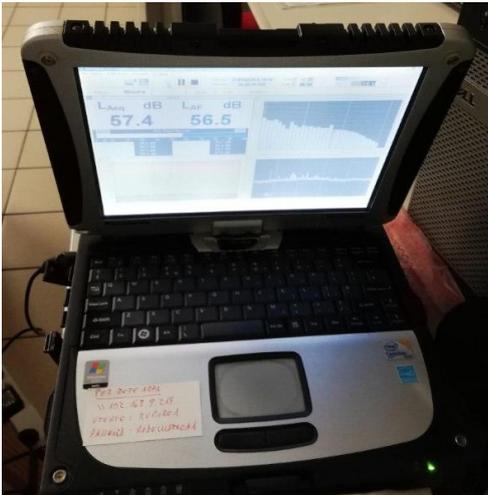


Figura 2.2.1.4 Soundbook

Il Soundbook si presenta come un computer portatile con all'interno un software chiamato Samurai capace di analizzare più parametri, tra questi vi sono gli aspetti legati al suono. Attraverso un porta seriale si può collegare il microfono e ricevere l'analisi in frequenza e il livello di pressione sonora misurato nel tempo.

Il microfono a condensazione utilizzato è il modello 377B02 dotato di un preamplificatore con sistema prepolarizzato con le seguenti caratteristiche tecniche:

	Model 377B02
Sensibilità	50mV/Pa
Frequenza	Da 3Hz a 20kHz
Intervallo dinamico:	Da 15 dB a 146 dB
Temperatura	Da -40 °C a +120 °C

### **SEM:**

Per le misure continue del Livello di pressione sonora si sono utilizzati quattro Semafori Acustici chiamati SEM, questi semafori durante la campagna di misure hanno avuto dei problemi di misurazione in alcuni giorni e sono stati quindi affiancati ad essi in caso di mancato funzionamento i fonometri Larson Davis 831 e Larson Davis 831c con caratteristiche simili a quelle viste per il microfono Model 377B02 sopra illustrato.

I SEM sono prototipi di microfoni di classe 2 che sono dotati di un sistema d'illuminazione che in base al livello di pressione sonora misurato accendono una striscia LED in modo da segnalare il disturbo causato dal rumore agli utenti. In questo caso studio le luci LED presenti nei SEM sono rimaste spente in quanto sono stati utilizzati come semplici microfoni e non come uno strumento di feedback all'occupante.



*Figura 2.2.1.4 SEM*

### **AirBeam:**

E' un misuratore portatile di piccole dimensioni che misura Temperatura, Umidità e il particolato PM1, PM2,5 e PM10. Utilizza un metodo basato sullo scattering luminoso per la determinazione del particolato, dove all'interno del misuratore viene emessa una luce che colpendo le particelle si disperde nel flusso d'aria. Questa dispersione della luce viene registrata e riconvertita in misura del particolato. L'Airbeam è collegato tramite Bluetooth ad un dispositivo Android dove vengono registrati i dati ed inviati sulla piattaforma Air Casting.



*Figura 2.2.1.5 AirBeam*

### Radielli:

Lo strumento utilizzato per la valutazione della qualità dell'aria riferita alla concentrazione dei composti organici volatili è il Radiello che sfrutta le proprietà diffusive per raccogliere una concentrazione d'inquinanti in una cartuccia. La concentrazione di inquinanti è ricavata dalla massa depositata sulla cartuccia diviso il tempo di campionamento.

Il Radiello è dotato di un corpo diffusivo di colore giallo collegato ad una piastra di supporto, il corpo diffusivo in questione ha come codice RAD145. Il radiello si presenta come una scatola chiusa di forma cilindrica costituita da una rete in acciaio inox, con una griglia di apertura  $3 \times 8 \mu\text{m}$  e diametro  $4,8 \text{ mm}$ , imballato con  $350 \pm 10 \text{ mg}$  di carbone grafitizzato.

I composti che vengono analizzati sono: i composti organici volatili come il benzene, toluene, etilbenzene e xilene e alcuni composti chimici come i HCFC, CFC, Idrocarburi, aldeidi, alcoli.



Figura 2.2.1.6 Radiello

### EMDEX:

Strumento programmabile che permette di misurare il livello di campo magnetico nel dominio del tempo e dello spazio. Nella versione standard il campo di misurazione va dai  $0,01 \text{ mT}$  ai  $300 \text{ mT}$ .

Sono stati posizionati in corrispondenza delle postazioni computer dei vari uffici per valutare i campi magnetici provenienti dai dispositivi elettrici e elettronici. Gli EMDEX venivano accesi ogni settimana e lasciati viaggiare in continuo fino allo scaricamento dei dati.



Figura 2.2.1.6 EMDEX

## 2.3 Valutazione soggettive

Tutti gli occupanti dei tre ambienti hanno partecipato allo studio sul comfort ambientale e sono stati invitati a compilare due tipologie di questionario:

- **questionario trasversale**, un questionario generale da sottoporre agli occupanti nella settimana che precede l'avvio delle misure oggettive con l'obiettivo di valutare per le varie grandezze fisiche che compongono il comfort ambientale il grado di soddisfazione dell'utente.
- **questionario longitudinale**, un questionario puntuale da sottoporre agli occupanti al mattino e al pomeriggio durante le giornate di misura puntuali così da correlare il dato oggettivo con quello soggettivo. Basandosi su un'analisi di letteratura.

Entrambi i questionari si basano come nel caso delle misure oggettive su un approccio multi dominio dove si fanno domande sui vari aspetti del comfort ambientale andando inoltre a chiedere in alcune specifiche domande una valutazione globale sulla qualità ambientale.

Tutti e due i questionari sono stati forniti online sulla piattaforma Google Form inviando agli occupanti per ogni giorno delle misure una mail contenente il link per accedere alla pagina, come avvenuto per altre indagini relative agli studi sul comfort [6], [7].

Gli intervistati sono stati in totale 11 così suddivisi: 3 nell'ufficio Rumore, 3 nell'Ufficio NIR e 5 nel Laboratorio. I questionari longitudinali sono stati inviati per ogni giornata di misurazione puntuale a tutti gli occupanti dell'ambiente corrispondente e si è chiesto di rispondere solo nel caso si fosse stati presenti nell'ambiente di lavoro.

Di seguito sono spiegati nel dettaglio le due tipologie di questionari appena introdotti.

### 2.3.1 Questionario trasversale

Questionario sottoposto agli occupanti nella settimana che precede l'avvio delle misure oggettive con l'obiettivo di indagare nello specifico sulle grandezze durante diversi periodi stagionali: Estate, Inverno, Mezza stagioni, Il tempo di compilazione del questionario è stimato in torno ai 10 minuti.

Struttura del questionario trasversale:

Per ogni domanda è stato associato un codice identificativo in modo tale da richiamare alla rappresentazione di ogni grafico una specifica domanda. Per il questionario trasversale il codice è rappresentato dalla lettera **T** e dal numero della domanda.

Il questionario è diviso in 2 sezioni, in principio vi è una parte introduttiva del progetto e del questionario trasversale dove si richiede all'utente di rispondere alle successive domande riferendosi alle condizioni mediamente percepite durante le varie stagioni dell'anno, ed di inserire il codice identificativo personale che servirà a collegare le varie risposte future.

La **prima sezione** è di carattere puramente generale, va indicato l'ambiente di lavoro e il tempo in cui si passa abitualmente nell'ambiente di lavoro.

La **seconda sezione** si richiede di rispondere su una scala a cinque punti rispetto al grado di soddisfazione di qualità ambientale interna nella personale postazione di lavoro. Si è cercato di indagare sulle condizioni di temperatura, qualità dell'aria, rumore, illuminazione naturale, illuminazione artificiale e sulla qualità globale dell'ambiente. Per questa sezione le domande sono state ripetute per il periodo estivo, invernale e mezza stagione (autunno e primavera).

Nella tabella 2.3.1.1 si vanno a specificare le domande della seconda sezione.

Tabella 2.3.1.1 Questionario trasversale seconda sezione

Categoria	Sezione	Codice	Domanda	Risposta
Comfort termico	Grado di Soddifazione	T1	Quanto è soddisfatto delle condizioni termiche (temperatura, umidità) nel suo ambiente di lavoro?	<p>-3. Molto insoddisfatto</p> <p>-2. Insoddisfatto</p> <p>-1. Leggermente insoddisfatto</p> <p>0. Neutro</p> <p>+1. Leggermente soddisfatto</p> <p>+2. Soddisfatto</p> <p>+3. Molto soddisfatto</p>
Comfort qualità dell'aria		T2	Quanto è soddisfatto della qualità dell'aria (odori, sensazione di freschezza e pulizia) nel suo ambiente di lavoro?	
Comfort acustico		T3	Quanto è soddisfatto della qualità acustica (rumori provenienti dall'esterno, da locali limitrofi o presenti nell'ambiente stesso, riverberazione dei suoni e delle voci) nel suo ambiente di lavoro?	
Comfort visivo		T4	Quanto è soddisfatto delle condizioni di illuminazione naturale (quantità di luce, abbagliamento, zone troppo o troppo poco illuminate) nel suo ambiente di lavoro?	
Comfort visivo		T5	Quanto è soddisfatto delle condizioni di illuminazione artificiale (quantità di luce, abbagliamento, zone troppo o troppo poco illuminate) nel suo ambiente di lavoro?	
Comfort globale		T6	Quanto è soddisfatto complessivamente della qualità ambientale nel suo ambiente di lavoro?	

### 2.3.2 Questionario Longitudinale

Il secondo questionario è di tipo longitudinale dove gli occupanti vanno a rispondere alle domande durante il periodo di misurazioni. Il questionario è stato quindi distribuito nelle sole giornate di misura puntuale così da correlare il dato oggettivo con quello soggettivo, Il questionario utilizzato è stato sviluppato da esperti di più settori ed è stato convalidato dopo numerosi test pilota, consiste in 6 sezione con all'interno circa 55 domande [8].

Questo questionario ha come finalità la determinazione del comfort ambientale nel periodo estivo in quanto le domande si riferiscono alla condizione fisica e psichica nel momento in cui si sta compilando.

Inoltre i questionari longitudinali mirano a poter studiare e correlare le misure dei vari parametri del comfort ambientale alla sensazioni personali dei vari occupanti degli ambienti [9], che possono essere successivamente applicati per studi futuri e indagini di ricerca simili.

Il questionario è così suddiviso:

La **prima sezione** va a ricavare informazioni generali come il sesso, l'età degli occupanti e se l'utente è un fumatore.

La **seconda sezione** pone domande su delle informazioni puramente relative al momento della compilazione:

- Se le luci nell'ambiente sono accese o spente
- Se le finestre sono aperte o chiuse
- se gli oscuranti sono abbassati
- Se il sistema di condizionamento è attivo

Inoltre attraverso una lista di indumenti si chiede all'utente di indicare quali sono i capi di abbigliamento utilizzati in quanto poi serviranno a determinare l'isolamento termico in CLO in base alla ISO 7730.

La **terza sezione** mira alla valutazione della qualità ambientale, in particolare è presente una domanda sull'ambiente termico che si basano secondo la EN ISO 10551 su una scala da 1 a 7 punti che va da "molto freddo" a "molto caldo". Inoltre sono presenti domande sulla percezione e sull'accettabilità termica.

La **quarta sezione** si riferisce alla percezione della qualità dell'aria andando inoltre ad indagare sull'origine dell'odore che ha causato una percezione sgradevole. Le risposte si rifanno principalmente ad una scala a 5 punti.

La **quinta sezione** interessa domande sul comfort visivo e si chiede all'utente di valutare la quantità di luce presente sul piano di lavoro e se vi sono sorgenti che creano abbagliamento. Le risposte si rifanno principalmente ad una scala a 5 punti.

La **sesta sezione** si vanno a valutare i livelli d'intensità dei rumori presenti e se quest'ultimi hanno causato un disturbo all'occupante. Le risposte si rifanno principalmente ad una scala a 5 punti.

La **settima sezione** infine è quella di sintesi dove si riassumono il livello di soddisfazione di tutti i parametri del comfort ambientale: termico, qualità dell'aria, visivo, acustico e globale. Anche qui ci basiamo su una scala a 5 punti.

Nella Tabella 2.3.1.1 sono specificate nel dettaglio le domande fatte nelle ultime cinque sezioni.

Tabella 2.3.1.1 Questionario Longitudinale dalla terza alla settima sezione

Sezione	Codice	Domanda	Risposta
Comfort termico	L1	Consideri la condizione termica dell'ambiente accettabile o no?	Accettabile Non accettabile
Comfort termico	L2	Preferiresti una condizione termica dell'ambiente più calda, più fredda o nessun cambiamento?	Più calda Nessun cambiamento Più fredda
Comfort termico	L3	L'ambiente è:	Molto freddo → -3 Freddo → -2 Leggermente freddo → -1 Neutro → 0 Leggermente caldo → +1 Caldo → +2 Troppo caldo → +3
Comfort termico	L4	Senti fastidiose correnti d'aria?	Sì o No
Comfort termico	L5	Come percepisci l'aria in relazione alla sua umidità?	Piuttosto umida Né secca né umida Piuttosto secca
Comfort termico	L6	Percepisci pareti e/o finestre particolarmente calde o fredde?	Sì o No
qualità aria	L7	Come percepisci l'odore dell'aria all'interno dell'ambiente di lavoro?	1. Molto sgradevole 2 3 4 5. Molto gradevole
qualità aria	L8	Se alla domanda precedente si è percepito una valutazione $\leq 3$ , si va a valutare l'origine dell'odore specificando la fonte è la sua intensità: (a) Odori legati al fumo di tabacco (b) Odori legati al corpo umano (c) Odori di origine chimica (d) Altro	1. Fastidio irrilevante 2 3 4 5. Fastidio molto elevato
comfort visivo	L9	Come giudichi la quantità di luce presente sul tuo tavolo di lavoro?	1. Insufficiente 2 3 4 5. Eccessiva
comfort visivo	L10	Come giudichi la luminosità delle seguenti sorgenti di luce e superfici presenti nell'ambiente in relazione al disturbo provocato? (a) Superfici vetrate senza schermi (b) Superfici vetrate con schermi (c) Apparecchi di illuminazione artificiale	1. Non disturbanti 2 3 4 5. Disturbanti
comfort acustico	L11	Valuta il livello di intensità dei rumori presenti nell'ambiente: (a) Persone che si muovono e/o parlano nell'ufficio (b) Persone che si muovono e/o parlano nel corridoio (c) Persone che si muovono e/o parlano negli uffici adiacenti	1. Intensità Irrilevante 2 3 4 5. Intensità molto elevata

		(d) Impianto di climatizzazione (f) Computer, stampanti (g) Rumore nell'edificio, all'esterno dell'ufficio (h) Traffico esterno (i) Rumore all'esterno dell'edificio (non rumore da traffico) (l) Altro	
<b>comfort acustico</b>	<b>L12</b>	Il rumore presente nell'ambiente ti ha causato un disturbo:	1. Irrilevante 2 3 4 5. Forte
<b>sintesi</b>	<b>L13</b>	Come consideri il comfort ambientale nell'ambiente di lavoro? Comfort termico Qualità dell'aria Comfort visivo Comfort acustico Comfort globale	1. Inaccettabile 2 Scarso 3 Discreto 4 Buono 5. Ottimo
<b>sintesi</b>	<b>L14</b>	Quale importanza che attribuisce ai diversi aspetti del comfort ambientale? Comfort termico Qualità dell'aria Comfort visivo Comfort acustico	1. Molto bassa 2 3 4 5. Molto elevata

## 2.4 Analisi dei dati

Questa sezione del metodo va a illustrare e giustificare a livello normativo le scelte di rappresentazione grafica e logica del capitolo 3 che mirano alla restituzione generale del dato grezzo su tutte le grandezze fisiche monitorate per i dati oggettivi e soggettivi e la loro correlazione. In seguito si cerca di fornire al lettore meno esperto una rappresentazione più chiara e immediata del dato grezzo che fornisce, inoltre, un'indicazione generale sull'indice di comfort globale monitorato nelle tre settimane di misurazione nei tre ambienti della sede dell'ARPA.

La normativa di riferimento utilizzata principalmente nel nostro studio è la EN 16798 che fornisce i valori di dimensionamento delle grandezze fisiche dell'ambiente interno.

Tuttavia, non sempre la normativa è coerente con il dato soggettivo fornito dall'utente; si è cercato quindi di dare una restituzione più rappresentativa della sensazione percepita.

### 2.4.1 Analisi del dato oggettivo

Le analisi svolte si sono basate su un approccio multi-dominio dove si cerca di correlare i vari aspetti del comfort ambientale [5]. I dati rappresentati vengono suddivisi in base alla tipologia di parametro monitorato: di norma vengono prima rappresentate le analisi sul comfort termico, a seguire quelle sul comfort acustico, poi visivo e, infine, gli aspetti legati alla qualità dell'aria.

Le misure analizzate sono commentate tramite statistica descrittiva che rappresenta il classico metodo d'esposizione dei dati sul comfort ambientale [10], [11]. I dati vengono rappresentati principalmente tramite grafici e tabelle su tutte e tre le settimane di misurazione. Le tabelle hanno lo scopo di dare un'informazione sintetica del dato oggettivo fornendo le medie ricavate del mattino e del pomeriggio di ogni giorno per tutti e tre gli ambienti e, ogni dato rappresentato, è confrontato con il proprio riferimento normativo presente nella EN16798-1 che specifica una determinata categoria di qualità. Per l'analisi temporale delle varie grandezze si utilizzano grafici a linee che vengono poi commentati a livello sintetico.

Tutte le tabelle e i grafici rappresentano il dato in base all'ambiente. Si sono scelti tre tipi di colore per collegare ogni dato ad un ambiente: in verde è rappresentato l'Ufficio Rumore, in rosso l'Ufficio NIR e in blu il Laboratorio.

Nella prima parte dei risultati del dato oggettivo si fornisce una tabella riferita sia alle misure puntuali che alle misure continue in cui si indicano per ogni giorno le grandezze di misura monitorate, quando sono andate a buon fine e quando invece si sono riscontrati dei problemi con lo strumento di misura. Questa tabella si pone l'obiettivo di fornire al lettore un'informazione completa sulla restituzione della campagna di misure.

#### **Comfort termico:**

Questa sezione è divisa in due parti. Nella prima si mostrano i risultati dell'analisi continua, misurati tramite i Data logger e gli Hobo. I parametri rappresentati sono la temperatura interna, la temperatura esterna e l'umidità relativa. Sono stati rappresentati i valori delle tre settimane di analisi puntuale per tutti e tre gli ambienti. La seconda parte, invece, riguarda l'analisi puntuale, andando a calcolare gli indici indicati nella normativa EN16798-1 che esprimono le condizioni termiche presenti nei vari ambienti.

Viene prima riportata l'analisi del PMV (Predicted Mean Vote) e il valore di PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Il PMV è stato calcolato attraverso l'utilizzo di un programma Matlab secondo lo script presente nella ISO 7730, in cui si sono inseriti i relativi valori di velocità dell'aria, la temperatura interna, la temperatura

media radiante e l'umidità relativa misurati in ambiente con il testo 480. Inoltre, per calcolare il PMV si è utilizzata, negli uffici, un'attività metabolica media di 1,2 Met mentre, nei Laboratori, un'attività metabolica pari a 1,4 Met. L'isolamento da vestiario medio in Clo è stato calcolato, giorno per giorno, in base alle risposte del questionario relative all'abbigliamento degli utenti. Ciò verrà spiegato in dettaglio nel paragrafo successivo.

Infine, l'altro indice che viene analizzato per ogni ufficio è il metodo adattativo che, rispetto al PMV, risulta essere più adatto per l'analisi di ambienti non climaticamente controllati. Per la sua valutazione si è calcolato il valore della Outdoor running mean temperature in base alle temperature misurate nei giorni antecedenti la giornata di misurazione e la temperatura media operativa della stanza. Il dato è stato poi espresso per tutti i giorni di misura puntuale per ogni ambiente.

### **Comfort Acustico:**

I valori misurati durante le campagne di misure continue e puntuali del livello equivalente ponderato A ( $L_{eq}$ ), che secondo la ISO 1996 [41] risulta essere la grandezza più rappresentativa del livello di rumore presente nell'ambiente interno, sono stati registrati tramite i fonometri e i SEM e sono stati poi corretti secondo la UNI EN ISO 10052 [47] per il tempo di riverberazione di ciascun ambiente. Questo metodo è stato usato per rendere confrontabile il livello equivalente  $L_{eq}$  misurato con gli strumenti rispetto al valore del Livello equivalente continuo  $L_{eq,nT}$  della normativa EN16798.

Il termine di normalizzazione rispetto al tempo di riverberazione è il seguente:

$$K_2 = -10 * \log_{10}\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

Dove T è l'approssimazione del tempo di riverberazione stimato nei tre ambienti tramite il metodo Eyrin-Norris [33] e  $T_0$  è il tempo di riverberazione di riferimento variabile in funzione del volume V:

Dove per  $100 \text{ m}^3 < V < 2500 \text{ m}^3$

$$T_0 = 0,05 * (V)^{0,5}$$

I livelli sono stati così corretti:

$$L_{eq,nT} = L_{eq,A} + K_2$$

La rappresentazione grafica del dato medio registrato per ogni ambiente è avvenuta tramite delle tabelle riassuntive iniziali e dei grafici temporali che ne hanno indicato l'andamento. Inoltre, per ogni ufficio alla curva temporale è stato associato, tramite un linea tratteggiata, il valore medio misurato.

I livelli di pressione sonora mostrati nei grafici sono mediati ogni 15 minuti di campionamento sia per i SEM (giornate di misura continue) che per i fonometri (giornate di misura puntuale). Inoltre, si sono rappresentati i dati oggettivi riferendoli all'analisi di categoria presente nella tabella L.1 della EN16798-1. Un aspetto da specificare è che la normativa fa riferimento ad ambienti non occupati mentre i livelli che si sono misurati fanno riferimento ad un ambiente occupato.

Come è stato fatto per l'analisi del comfort termico, si rappresenta per prima l'analisi continua dei livelli di pressione sonora misurati nei tre ambienti per le rispettive giornate di misurazione continua. Nel Laboratorio erano presenti 2 SEM, uno dei due non ha funzionato correttamente e pertanto si è deciso di riportare l'analisi solo di quello con il dato completo. In seguito si sono riportati i valori, opportunamente corretti, del livello medio continuo equivalente misurato con i fonometri per le giornate di misura puntuale.

Nei giorni in cui sia il SEM e sia il Fonometro hanno registrato i livelli medi, si sono andati a confrontare tramite un grafico a scatole e baffi, il range di dati misurati nei vari ambienti di livello continuo equivalente. Tracciando una X all'interno delle varie scatole è stato poi mostrato il livello medio misurato in tutti gli ambienti.

#### **Comfort luminoso:**

Per il comfort luminoso sono presenti i dati relativi alle sole giornate di misura puntuale misurati con il Testo 480 dell'illuminamento presente sulle scrivanie. È presente una prima tabella riassuntiva dei valori medi misurati nelle mattine e nei pomeriggi e il loro confronto con il valore richiesto dalla normativa. Dopodiché si riporta il profilo temporale per i vari ambienti e il loro rispettivo valore medio.

Le tabelle e i grafici sono stati commentati e analizzati cercando di mostrare le differenze che si sono registrate nei vari ambienti.

#### **Qualità dell'aria:**

Per la qualità dell'aria si sono analizzate più grandezze: il particolato PM1, PM2.5, PM10 e la concentrazione della CO<sub>2</sub>. Questi valori sono stati rappresentati nella tabella riassuntiva delle giornate di misure puntuali per le mattine ed i pomeriggi e, in seguito, correlate con la normativa di riferimento. Infine, si riporta l'analisi temporale della CO<sub>2</sub> per i vari ambienti con il rispettivo valore medio commentando le differenze che si sono registrate nei vari ambienti.

## 2.4.2 Analisi del dato soggettivo

Le risposte percepite dagli occupanti durante l'intera campagna di monitoraggio sono state raccolte tramite Google teams su un file Excel, da questo elenco dati si è potuto iniziare ad analizzare i vari parametri soggettivi.

L'analisi soggettiva è finalizzata a far emergere i risultati sulla base delle domande poste attraverso i questionari che hanno come obiettivo la ricerca del giudizio sulla percezione della qualità ambientale in termini di accettabilità e preferenza [1].

La struttura descrittiva dei risultati emersi dal dato soggettivo segue l'ordine delle sezioni presenti nei due questionari (trasversale e longitudinale), si è cercato di far emergere per ogni domanda posta nel questionario la percentuale di risposte pervenute differenziandole per ogni ambiente.

Per rendere chiara questa rappresentazione, che contiene per ogni grafico una serie di informazioni concatenate fra loro, si sono utilizzati i grafici a istogramma Pivot di Excel che permettono di rappresentare la percentuale di risposte per ogni grado di soddisfazione suddividendo l'informazione per ogni ambiente monitorato. Le informazioni generali e riassuntive sono state rappresentate con l'utilizzo di specifiche tabelle. Sia i grafici che le tabelle sono stati commentati e riassunti facendo emergere gli aspetti chiave dello studio.

Si spiegano, ora, in dettaglio i metodi utilizzati per l'analisi dei due questionari presentati in precedenza nella sezione 2.2.

### **Analisi questionario Trasversale:**

L'analisi del dato di questo questionario mira a rendere più completa possibile l'informazione emersa dalle risposte e fa emergere tramite dei grafici le questioni più rilevanti, questo permette di rappresentare in maniera chiara gli aspetti più importanti riscontrati.

Le risposte della prima sezione del questionario sono state espresse tramite una tabella riassuntiva dividendo le informazioni per ogni ufficio e Laboratorio.

Nella seconda sezione relativa al grado di soddisfazione sulla qualità ambientale, si è deciso di non fare un grafico per ogni domanda in quanto sarebbe risultato poco chiaro e dispersivo, si è voluto invece riassumere le informazioni contenute nel questionario con dei grafici appositi.

La rappresentazione utilizzata è identica per ogni grafico a istogramma dove sull'asse delle ordinate si riporta la percentuale di risposte e sull'asse delle ascisse i vari gradi di soddisfazione corrispondenti ad ogni parametro ambientale (condizione termiche, qualità dell'aria, qualità acustica ecc..).

Nel primo grafico si rappresentano i parametri ambientali che hanno generato dell'insoddisfazione nei vari ambienti non andando però a suddividere l'informazione per le varie stagioni ma lasciando emergere un quadro sintetico generale.

Nei successivi tre grafici si sono rappresentati, rispettivamente per i tre ambienti, tutte le risposte del grado di soddisfazione per i vari parametri ambientali, mostrando le differenze stagionali solamente per l'ufficio NIR dove si sono riscontrate significative differenze stagionali che non sono state invece riscontrate negli altri uffici.

Infine nell'ultimo grafico emerge il dato relativo al grado di comfort globale relativo all'estate e l'inverno per i tre ambienti.

### **Analisi questionario Longitudinale:**

Come per l'analisi trasversale, ogni grafico si riferisce alle domande presenti nel questionario seguendo l'opportuna scala cromatica associata. Anche in questo caso si è suddivisa la struttura dell'analisi in base alle varie sezioni presenti nel questionario.

I questionari longitudinali sono stati somministrati nelle giornate di misure puntuali al mattino e al pomeriggio. I risultati delle analisi qui presentati si riferiscono principalmente alle singole giornate senza andare a differenziare tra ore antimeridiane e ore pomeridiane. Ciò ha facilitato la rappresentazione di un numero notevole di dati nel modo più chiaro e efficace possibile.

Per la sola domanda relativa alla percezione della sensazione termica nell'ambiente **codice L3** si sono stati differenziati i dati tra mattino e pomeriggio, questo ha permesso di far emergere le rilevanti differenze di percezione termica presenti negli ambienti non controllati climaticamente o semi-controllati come il Laboratorio.

La prima parte dell'analisi prevede un riassunto delle domande di carattere generale e delle domande relative al momento della compilazione, dove si riassumono le informazioni divise in mattine e pomeriggi in un'unica tabella. Ad alcune domande relative a delle informazioni oggettive come, ad esempio: "le finestre sono aperte o chiuse?" si è presentato nella tabella il valore con il maggior numero di risposte andando ad indicare la percentuale di risposta nelle parentesi. Per l'informazione relativa all'isolamento termico del vestiario espresso in Clo, si sono andate a sommare le singole resistenze termiche dei capi di vestiario che i vari utenti hanno indicato nel questionario con i valori presenti nella ISO7730, dopodiché si è fatta una media di tutte le resistenze termiche associate ad ogni utente ed è stato fornito quel dato in tabella. Questi valori sono stati utilizzati successivamente per il calcolo del PMV.

La seconda parte è relativa alle informazioni di sintesi sull'importanza che l'utente ha nei confronti di ogni aspetto del comfort ambientale e sulla percezione del comfort a livello globale. Il dato è stato espresso basandosi sul voto medio che gli utenti hanno indicato per ogni ambiente.

La parte successiva è relativa alle domande sul comfort termico dove vengono presentati negli istogrammi rispettivamente le domande relative sull'accettabilità termica, sulla preferenza termica e sulla percezione dell'umidità. Per la domanda sull'accettabilità si è deciso di non rappresentare la totalità delle informazioni ma di selezionare le sole giornate in cui vi sono stati degli utenti che non hanno ritenuto accettabile l'ambiente. Sulla preferenza termica e sulla percezione dell'umidità nell'ambiente è stato rappresentato il dato per ogni giorno di misura puntuale. Infine è stata fatta una rappresentazione in tre diversi grafici per ogni ambiente, divisi in mattino e pomeriggio, sulle domande relative alla sensazione termica come già spiegato all'inizio.

Per la rappresentazione delle domande relative al comfort acustico e alla rappresentazione della qualità dell'aria si è seguito il medesimo approccio, andando ad individuare con un primo grafico il livello di disturbo e la sensazione olfattiva percepita dagli utenti per ogni ambiente e, in seguito, si sono valutate le sorgenti rumorose che hanno generato tale disturbo e le fonti di odori che sono risultate poco gradevoli.

Infine per la sezione relativa al comfort luminoso si sono individuate le sorgenti luminose naturali e artificiali che generavano un disturbo e/o un abbagliamento. L'ufficio NIR non ha mai ritenuto che ci fossero sorgenti disturbanti e quindi non è stato inserito nel grafico. In seguito si è espresso il livello di illuminamento medio percepito sul piano di lavoro nei tre uffici tramite la scala a 5 punti presente nel questionario.

### 2.4.3 Correlazione tra dato oggettivo e soggettivo

In questa sezione si spiegano le correlazioni utilizzate per legare il dato oggettivo con quello soggettivo. Anche in questo caso si è utilizzata della statistica descrittiva per commentare i grafici proposti che forniscono, attraverso regressioni lineari e grafici a istogramma, l'informazione oggettiva e soggettiva cercando di ricavarne un trend per poi valutare se i parametri oggettivi descrivono in maniera corretta le percezioni soggettive provate. Per ogni parametro soggettivo, attraverso l'utilizzo di una tabella, si riassumono i dati presenti nei grafici per le mattine e i pomeriggi delle giornate di misura puntuale.

Per ogni grafico di regressione si è valutato a monte se i dati presenti fossero ben correlati fra loro e se fossero al livello statistico significativamente rappresentabili. Questa valutazione è avvenuta con il calcolo dell'indice di correlazione  $r$  e del valore del coefficiente di significatività chiamato Pvalue. La regressione, infine in questi casi, mi rappresenta a livello grafico se è presente una correlazione lineare fra i dati in questione.

La EN16798-1, come già ripetuto, utilizza grandezze come temperatura, livello equivalente continuo e indici quali il PMV e il PPD per valutare i vari aspetti della qualità ambientale interna. Ad ogni range di valori di ciascuna grandezza è associata una relativa categoria di qualità ambientale che esprime, inoltre, la percentuale prevista di insoddisfazione degli utenti. Si è quindi deciso di correlare i voti soggettivi pervenuti dai questionari con le grandezze presenti all'interno della normativa in modo da verificare che il numero di utenti insoddisfatti emersi dai questionari fosse coerente con quelli previsti dalla normativa.

#### Comfort termico:

Si sono valutati i valori medi soggettivi misurati al mattino e al pomeriggio delle giornate di misura puntuali per poi essere confrontati con la temperatura media misurata, con l'indice PMV e con il metodo adattativo. Inoltre, si sono analizzati separatamente gli uffici dal Laboratorio in quanto i primi risultano non essere dotati di sistemi di condizionamento dell'aria attivi e i secondi, invece, presentano gli aereotermi a soffitto operativi. La scelta di separare l'analisi in due tipologie di ambienti è dovuta alle differenze di temperatura e di percezione soggettiva emersa tra gli utenti e anche dal fatto che studi simili hanno utilizzato lo stesso criterio di separazione per ambienti con le medesime caratteristiche [12] [9].

Il primo grafico proposto, comprende sia gli uffici che il Laboratorio, presenta sull'asse delle ascisse la temperatura media misurata e sull'asse delle ordinate il Voto medio soggettivo corrispondente alla scala ASHRAE di 7 punti. All'interno del grafico sono posti, per ogni temperatura media, i valori di PMV misurato nelle corrispondenti giornate e il voto medio soggettivo rispetto alla domanda con **codice L6** utilizzando la seguente scala dove ad ogni sensazione si associa un voto della scala ASHRAE:

Molto freddo → -3  
Freddo → -2  
Leggermente freddo → -1  
Neutro → 0  
Leggermente caldo → +1  
Caldo → +2  
Troppo caldo → +3

Tracciando una linea di tendenza si è potuto confrontare la relazione che intercorre tra il voto medio e la temperatura rispetto alla relazione tra il PMV e la temperatura. In questo modo si può valutare se queste due grandezze sono opportunamente correlate.

Nel grafico seguente si è deciso di confrontare l'andamento del PMV con l'andamento del voto medio soggettivo, sempre tramite una regressione lineare, in questo modo più il valore di  $R^2$  si avvicina a 1, più il PMV è rappresentativo del comfort percepito al livello soggettivo.

Nel grafico seguente si è confrontato il voto medio soggettivo attraverso la rappresentazione del metodo adattativo dove, anche in questo caso, vengono separati gli uffici dal Laboratorio. Vengono indicati con un'etichetta in corrispondenza dei dati medi di temperatura operativa e di Outdoor running mean temperature i valori del voto medio soggettivo. Si individua così un trend tra il dato soggettivo posto sull'etichetta e il dato oggettivo del comfort adattativo.

La tabella finale mostra il riassunto dei dati espressi precedentemente rappresentati in termini di categoria riferendoli alla EN16798-1. In questo modo ogni valore di comfort adattativo, PMV, temperatura e voto medio soggettivo si riconduce a una categoria e quindi a una percentuale di insoddisfatti. A questo punto si può evidenziare, osservando le categorie in tabella, quale sia la grandezza dei tre parametri oggettivi che meglio rappresenta il dato soggettivo lungo le tre settimane di misura e poterla utilizzare sia come dato oggettivo da fornire all'utente sia come parametro che prevede il numero d'insoddisfazione.

### **Comfort acustico:**

Anche nel caso del comfort acustico si è deciso di separare lo studio delle correlazioni tra dato soggettivo e dato oggettivo per gli uffici e il Laboratorio in quanto gli utenti sono sottoposti a livelli di pressione sonora completamente differenti durante tutto l'arco della giornata. Il rumore è dovuto principalmente ai macchinari presenti nel Laboratorio che creano una forte sorgente di disturbo. Di conseguenza dei livelli di pressione sonora percepiti dagli utenti del Laboratorio che risultano per essi poco disturbanti in quanto abituati costantemente a livelli di pressione sonora di fondo elevata, risulterebbero essere molto disturbanti per gli utenti degli uffici.

Si è deciso di confrontare il livello continuo equivalente misurato (predisposto dalla normativa EN16798) e il livello di disturbo percepito dagli occupanti relativo alla domanda del questionario longitudinale con **codice L12** che risulta espresso con una scala a 5 punti, dove con voto 1 si indica un disturbo irrilevante e con voto 5 si indica un disturbo molto forte. Per ogni voto espresso in ogni questionario somministrato si è andati a misurare il livello continuo medio equivalente nei 15 minuti antecedenti alla consegna del questionario, associando così un livello medio ad ogni voto pervenuto. In seguito si sono divisi tutti i dati in base alla fascia di voto da 1 a 5 ottenendo una serie di livelli di pressione sonora per ogni voto medio soggettivo. Questa analisi statistica è stata espressa graficamente tramite delle regressioni lineari. Per i valori sopra citati sono state calcolati gli indici di correlazione e il valore del P value. In questo modo facendo la media di tutti i livelli medi misurati per ogni fascia di voto si è potuto valutare un Livello continuo equivalente per ciascun voto medio soggettivo.

Si è potuto così confrontare, per gli uffici e il Laboratorio, una serie di Livelli equivalenti a una sensazione di disturbo percepita dagli occupanti. A differenza del comfort termico, nel caso del comfort acustico si è deciso di non utilizzare i livelli di pressione sonora presenti nella EN16798-1 da correlare con i voti medi soggettivi in quanto essi si riferiscono a misure ad ambiente non occupato e quindi non restituiscono una percezione reale dell'ambiente [13]. Si è ritenuto quindi che la correlazione diretta tra Livello misurato e voto medio soggettivo descritta in precedenza sia la più corretta da adottare per la restituzione dell'informazione all'utente finale.

Infine nelle due tabelle finali si esprimono il riassunto dei voti medi misurati nelle giornate di misure puntuali e i corrispondenti voti medi soggettivi.

### **Comfort visivo e Qualità dell'aria interna:**

L'approccio utilizzato per correlare la grandezza fisica oggettiva e il dato soggettivo espresso dagli utenti è stato applicato sia per il comfort visivo sia per la qualità dell'aria interna. Anche in questi due casi l'analisi statistica è stata espressa graficamente tramite delle regressioni lineari e si sono calcolati i corrispondenti indici di correlazione e il valore del P value.

In questi due casi però non si sono andati a suddividere lo studio di correlazione tra uffici e Laboratorio in quanto non vi erano motivi validi per cui le condizioni di illuminazione e di odore percepito fossero diverse fra i due ambienti. Questa ipotesi è fondata sul fatto che per quanto riguarda l'illuminazione sulle scrivanie di entrambi gli ambienti a luce accese si garantiscono sempre i 300 Lux di progetto. Per quanto concerne invece la Qualità dell'aria nei due ambienti, i valori di concentrazione media misurati non si differenziano di molto nelle tre settimane di campagna.

Per il Comfort visivo si è preso il voto soggettivo espresso nella domanda del questionario longitudinale con **codice L9** relativa al livello di illuminazione percepito per poi correlarla con il Livello medio d'illuminazione misurato sulla scrivania 15 minuti prima della consegna del questionario. Per la qualità dell'aria, invece, si è presa la domanda sull'odore percepito con il **codice L7** per correlarla con il livello di CO<sub>2</sub> misurato. In seguito, come nel caso del comfort acustico, si sono divisi tutti i dati in base alla fascia di voto da 1 a 5 della scala soggettiva, associando per ogni voto soggettivo un relativo livello corrispondente di concentrazione di CO<sub>2</sub> e di livello d'illuminamento.

Infine nelle due tabelle finali si esprimono il riassunto dei voti medi misurati nelle giornate di misure puntuali e i corrispondenti voti medi soggettivi.

#### 2.4.4 Restituzione all'utente e indice sintetico IEQ

In seguito allo studio di correlazione e all'analisi grezza dei dati oggettivi e soggettivi, si è voluto proporre una restituzione del dato fruibile per l'utente in quanto la normativa EN16798 non fornisce una tale rappresentazione e non dà, inoltre, un' indicazione sintetica della qualità dell'ambiente interno globale [1]. Essa, infatti, propone solo un' informazione sulle grandezze fisiche prese singolarmente e non si pone il problema della restituzione del dato a livello globale.

Si è cercato di rappresentare nel modo più semplice ed immediato il dato all'utente tramite l'utilizzo di faccine colorate dove il colore indica il grado di soddisfazione percepito rispetto ai vari parametri del comfort ambientale. Tuttavia, allo stesso tempo, questo dato è frutto di numerosi ragionamenti che si sono sviluppati nel corso della sezione di correlazione.

Nella rappresentazione all'utente si fornisce, per ogni parametro ambientale, la rispettiva grandezza oggettiva che è stata ritenuta più rappresentativa ovvero la temperatura per il comfort termico, il livello  $L_{eq,nT}$  per il comfort acustico, la concentrazione di  $CO_2$  per la qualità dell'aria e l'illuminamento medio per il comfort visivo.

Nella restituzione finale, la faccina colorata indica il dato soggettivo percepito dall'utente che non è frutto della percezione diretta dell'occupante ma dell'analisi di correlazione svolta tra dato oggettivo e soggettivo dove per ogni temperatura, livello di pressione sonora, concentrazione di  $CO_2$  e illuminamento si è associato una specifica sensazione fornita dalle risposte ai questionari.

L'approccio sopra riportato è stato pensato in vista di una restituzione all'utente finale tramite un multi sensore che ha lo scopo di fornire il dato del comfort globale percepito in ambiente. [3], [14], [15], [16]

Nella rappresentazione finale all'utente l'inserimento di un' informazione diretta del dato percepito non sarebbe finalizzata ad una previsione del dato soggettivo.

Solo per il comfort termico si è utilizzato come riferimento per la correlazione tra dato oggettivo e soggettivo l'analisi di categoria presente nella EN16798-1 riferita alla temperatura media misurata nell'ambiente.

La categoria di riferimento rappresenta uno specifico livello di qualità termica che, a sua volta, rappresenta una percentuale prevista di insoddisfazione:

Qualità termica alta → Categoria 1 → < 6% insoddisfazione

Qualità termica media → Categoria 2 → < 10% insoddisfazione

Qualità termica moderata → Categoria 3 → < 15% insoddisfazione

Qualità termica scarsa → Categoria 4 → < 25% insoddisfazione

Qualità termica molto scarsa → Categoria >4 → >25% insoddisfazione

Ogni livello di qualità termica è espresso tramite un' apposita faccina colorata all'utente.

Per il Comfort acustico, per la qualità dell'aria e per il comfort luminoso ci si riferisce, come dato oggettivo, rispettivamente al livello di pressione sonora, di concentrazione di  $CO_2$  e di illuminamento medi misurati nelle mattine e nei pomeriggi delle giornate di misure puntuali. Ogni dato medio oggettivo misurato viene correlato alla percezione soggettiva espressa dagli occupanti in base allo studio proposto nel paragrafo 2.4.2 dove ad ogni voto della scala da 1 a 5 punti si è associato uno specifico valore della grandezza misurata.

Per queste tre grandezze si è deciso di non utilizzare il confronto con la normativa ma il metodo di calcolo proposto nella sezione delle correlazioni, in quanto il livello di pressione sonora misurato risultava sempre troppo elevato per essere confrontato con la normativa.

Per la qualità dell'aria il livello di concentrazione di CO<sub>2</sub> misurata risulta ricadere sempre nella prima categoria indicata nella normativa, cioè nella fascia di qualità più alta. Al contrario, alcuni utenti esprimevano, per quei valori registrati, un grado d'insoddisfazione.

Infine per il comfort visivo il livello misurato di illuminamento non ha mai raggiunto i 500 Lux previsti dalla normativa.

Per le tre grandezze sopra citate come per il comfort termico ad ogni voto della scala si è associata una determinata faccina colorata. L'unico gruppo di faccine presenti nella legenda che risultano non essere coerenti graficamente con le altre sono quelle del comfort luminoso in quanto non si esprime un livello ma una specifica condizione di percezione della luce presente, pertanto la condizione di comfort risulta essere a metà della scala di percezione.

Anche per la temperatura, come nel comfort luminoso, si dovrebbe fare riferimento alla sensazione ed esprimere quindi colori diversi in base alla percezione di caldo e freddo. Questo non avviene perché si è deciso di riferirsi al range di temperatura proposto dalla tabella H.5 della EN16798-1 che non distingue tra caldo e freddo. Occorre quindi creare due scale differenti per il periodo estivo e per il periodo invernale.

Dallo studio di confronto fra dato soggettivo e dato oggettivo, si sono associati, per ogni indicatore della scala di percezione, dei valori numerici. Procedendo in questo modo si è così potuto fornire una opportuna rappresentazione della percezione soggettiva all'utente finale.

Graficamente la restituzione all'utente è formulata in un unico quadrante dove si comunica il dato sintetico dell'andamento giornaliero delle mattine e dei pomeriggi nelle giornate di misure puntuali rispetto ai quattro parametri che determinano la qualità ambientale: comfort termico, comfort acustico, qualità dell'aria e comfort luminoso.

Infine, nella schermata finale il riquadro in alto a sinistra rappresenta l'indice di comfort globale restituito, anche in questo caso, con una faccina colorata. Questa informazione è stata calcolata assegnando ad ogni faccina, per ogni parametro del comfort presente nel quadrante, il punteggio riportato nella figura 2.4.4.1.

Dopodiché si è fatta la media dei vari punteggi (4 aspetti del comfort per la mattina e 4 per il pomeriggio) ottenendo un punteggio medio con il quale si ricava la corrispettiva faccina colorata, sempre tramite la figura 2.4.4.1.

Otteniamo un'informazione finale della condizione globale della qualità dell'ambiente interno.

Figura 2.4.4.1 punteggio assegnato alle faccine colorate



Punteggio: 0 → Qualità ambientale Ottima



Punteggio: 1 → Qualità ambientale buona



Punteggio: 2 → Qualità ambientale discreta



Punteggio: 3 → Qualità ambientale scarsa



Punteggio: 4 → Qualità ambientale pessima

### 3 Risultati

In questo capitolo sono riportate la presentazione e la discussione dei risultati del caso studio, analizzando per il comfort termico, per la qualità dell'aria, per il comfort acustico e per il comfort visivo i risultati oggettivi e soggettivi e la loro correlazione. I risultati ottenuti sono stati confrontati con la normativa di riferimento.

#### 3.3 Analisi del dato oggettivo

Nel seguente paragrafo sono mostrate le analisi delle grandezze misurate durante le giornate di misura puntuale e le giornate di misura in continuo dei vari ambienti. I risultati emersi dalle analisi fisiche sono stati confrontati con la normativa di riferimento.

Per prima cosa si riporta per ogni giorno e per ogni grandezza misurata la restituzione del dato da parte dello strumento. Se la misura è andata a buon fine si colora la casella di **verde**, al contrario, quando abbiamo avuto dei problemi con la misura e non si sono registrati i dati si colora la casella di **rosso**. Infine, quando lo strumento ha funzionato solamente al mattino o solamente al pomeriggio per qualche problema si colora la casella di **giallo**. Da notare, inoltre, che le misure dei COV con i radielli si sono effettuate solo dalla 3<sup>a</sup> settimana.

Dalla tabella 3.3.1 relativa alle misure puntuali si vede che le misure sono andate quasi sempre a buon fine, tranne il pomeriggio del 25/08 nel Laboratorio dove la misura del particolato atmosferico non è avvenuta; e, sempre nel Laboratorio il 31/08, il fonometro non ha registrato il dato durante tutto l'arco della giornata.

Tabella 3.3.1 Misure puntuali

Settimana 1	Ufficio Rumore		Ufficio Radiazioni		Laboratorio	
	Lunedì 17/08/2020		Martedì 18/08/2020		Mercoledì 19/08/2020	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Ti [°C]						
URi [%]						
Tmr [°C]						
v <sub>aria</sub> [m/s]						
L <sub>A,eq</sub> [dBA]						
Em [lux]						
CO2 [ppm]						
PM1 [µg/m <sup>3</sup> ],						
PM2.5 [µg/m <sup>3</sup> ]						
PM 10 [µg/m <sup>3</sup> ]						
COV [µg/m <sup>3</sup> ]						
Settimana 2	Ufficio Radiazioni		Laboratorio		Ufficio Rumore	
	Lunedì 24/08/2020		Martedì 25/08/2020		Mercoledì 26/08/2020	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Ti [°C]						
URi [%]						
Tmr [°C]						
v <sub>aria</sub> [m/s]						
L <sub>A,eq</sub> [dBA]						
Em [lux]						
CO2 [ppm]						
PM1 [µg/m <sup>3</sup> ],						

PM2.5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]						
PM 10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]						
COV [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]						
Settimana 3	Laboratorio		Ufficio Rumore		Ufficio Radiazioni	
	Lunedì 31/08/2020		Martedì 01/09/2020		Mercoledì 02/09/2020	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Ti [°C]						
URi [%]						
Tmr [°C]						
v <sub>aria</sub> [m/s]						
L <sub>A,eq</sub> [dBA]						
Em [lux]						
CO2 [ppm]						
PM1 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ],						
PM2.5 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]						
PM 10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]						
COV [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]						



## Comfort Termico

Vengono rappresentati i dati relativi alle analisi continue dei profili di temperatura e umidità dei tre ambienti, per le misure puntuali si valutano invece gli indici del PMV e del comfort adattativo.

### Misure in continuo: analisi del profilo termico

Nella tabella 3.3.3 sono mostrate le medie giornaliere di tutti e tre gli ambienti per tutte le giornate di misura puntuale. I dati sono stati confrontati con la normativa di riferimento della EN16798-2 tabella B.4.

Entrambi gli uffici, nelle prime due settimane, sono quasi sempre rientrati nella terza categoria di qualità ambientale il che implica una moderata situazione di comfort. Solo il 26/08 la temperatura misurata ha fatto rientrare gli uffici nella quarta categoria prevedendo un livello di soddisfazione molto basso. Nell'ultima settimana l'ufficio Rumore e l'ufficio NIR rientrano nella categoria più alta rispecchiando così un ottimo livello di qualità termica.

Nel Laboratorio la temperatura misurata prevede un buon livello di qualità dell'ambiente interno su tutte le settimane, grazie al sistema di raffrescamento le temperature nell'ambiente rimangono costanti e inferiori rispetto a quelle misurate negli uffici.

Tabella 3.3.3 Misure continue temperatura interna e analisi di categoria

Ti [°C]	Ufficio Rumore										
	Lunedì 17/08	Martedì 18/08	Mercoledì 19/08	Lunedì 24/08	Martedì 25/08	Mercoledì 26/08	Lunedì 31/08	Martedì 01/09	Mercoledì 02/09		
	Valore medio	26,7	26,1	26,1	26,3	26,4	27,2	23,7	24,0	23,5	
	Categoria	3	3	3	3	3	4	1	1	1	
	Ufficio NIR										
	Lunedì 17/08	Martedì 18/08	Mercoledì 19/08	Lunedì 24/08	Martedì 25/08	Mercoledì 26/08	Lunedì 31/08	Martedì 01/09	Mercoledì 02/09		
	Valore medio	26,7	26,2	26,7	26,7	26,1	27,5	23,8	24,2	24,3	
	Categoria	3	3	3	3	3	4	1	1	1	
	Laboratorio										
	Lunedì 17/08	Martedì 18/08	Mercoledì 19/08	Lunedì 24/08	Martedì 25/08	Mercoledì 26/08	Lunedì 31/08	Martedì 01/09	Mercoledì 02/09		
Valore medio	25,8	26,0	25,8	26,0	25,8	25,7	25,9	23,8	24,0		
Categoria	2	2	2	2	2	2	2	1	1		

Nella Figura 3.3.1 vengono rappresentati i profili di temperatura relativi ai tre ambienti del caso studio e la temperatura esterna misurata. Il profilo temporale riportato è relativo alle misure in continuo, svolte in ogni ambiente per tre settimane dal lunedì al mercoledì.

La presenza dell'impianto di climatizzazione nel Laboratorio è evidenziato dalla diversità dei profili di temperature rispetto agli Uffici che invece sono influenzati dall'andamento della temperatura esterna e risultano possedere profili simili.

L'ambiente con il profilo meno variabile è il Laboratorio, durante le prime 2 settimane ha una variazione di temperatura inferiore ai 3 °C a differenza degli altri due ambienti dove la variazione di temperatura raggiunge i 10 °C.

Il Laboratorio essendo l'unico dotato di un sistema di condizionamento funzionante ha temperature interne meno soggette alle variazioni di temperatura esterna. Il giorno più caldo negli uffici risulta essere il 26/08 dove si raggiungono i 31°C nell'ufficio NIR e i 28°C nell'ufficio Rumore.

La terza settimana per tutti e tre gli ambienti risulta comunque essere la più fredda con un abbassamento netto delle temperature.

Il Laboratorio, mantenendo una temperatura media inferiore ai 26 °C e superiore ai 22 °C, rientra nel range di una buona qualità dell'ambiente interno rispetto agli standard normativi della stagione estiva per gli edifici meccanicamente controllati presenti nella EN16798-2.

Gli uffici rientrano quasi sempre in un valore discreto di qualità dell'ambiente interno, tranne per alcuni momenti delle ore centrali delle giornate dove le temperature superano i 28°C e rispecchiano una scarsa qualità dell'ambiente interno.

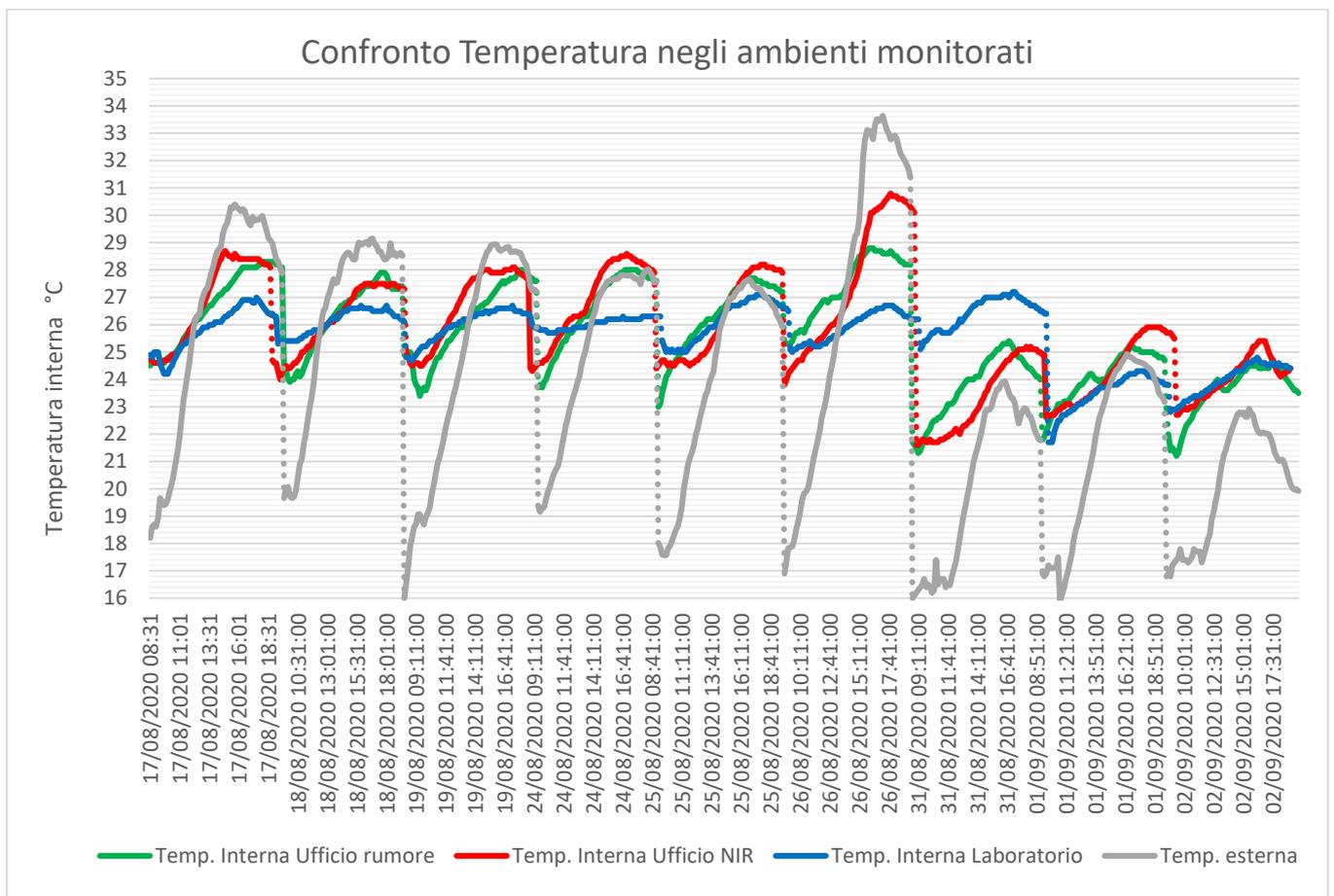


Figura 3.3.1 Confronto temperatura ambienti: Variazione temporale di temperatura nei 3 ambienti e della Temperatura esterna

## Analisi del profilo igrometrico

Nella Figura 3.3.2 vengono riportati i profili temporali del grafico precedente ma in questo caso si riportano i profili di umidità relativa interna.

I profili dell'Ufficio Rumore e del Laboratorio sono praticamente identici con valori di umidità relativa che oscillano tra il 55% alla mattina, questi ambienti risultano essere umidi nella prima parte della giornata e più secchi nel pomeriggio fino a scendere al 24% di umidità relativa. L'ufficio NIR presenta valori nettamente inferiori ma caratterizzati anch'essi da profili che seguono gli andamenti degli altri ambienti. Si può ipotizzare che questo discostamento è probabilmente dovuto ad un'errata lettura dell'umidità dello strumento di misura in quanto i due uffici risultano avere dei valori simili, cosa che non avviene per l'ufficio NIR.

Tutti gli ambienti hanno profili molto altalenanti, in particolare si ha un brusco calo dell'umidità nella giornata del 26/08 in corrispondenza dell'aumento di temperatura Figura 3.3.2, in quanto, a parità di umidità specifica nell'aria, un aumento di temperatura comporta una riduzione dell'umidità relativa.

Un'altra importante osservazione va fatta per il Laboratorio in quanto l'umidità segue i profili medesimi degli uffici, si può quindi ipotizzare che non ci sia condensa dovuta agli aerotermi a soffitto perché l'umidità relativa rimane circa uguale a quella degli altri ambienti.

Secondo la UNI 16798 per edifici senza particolari requisiti di mantenimento di specifici livelli d'umidità relativa non si va a fare un confronto normativo. Non si riporta un'analisi di categoria per l'umidità relativa in quanto non è ritenuta necessaria.

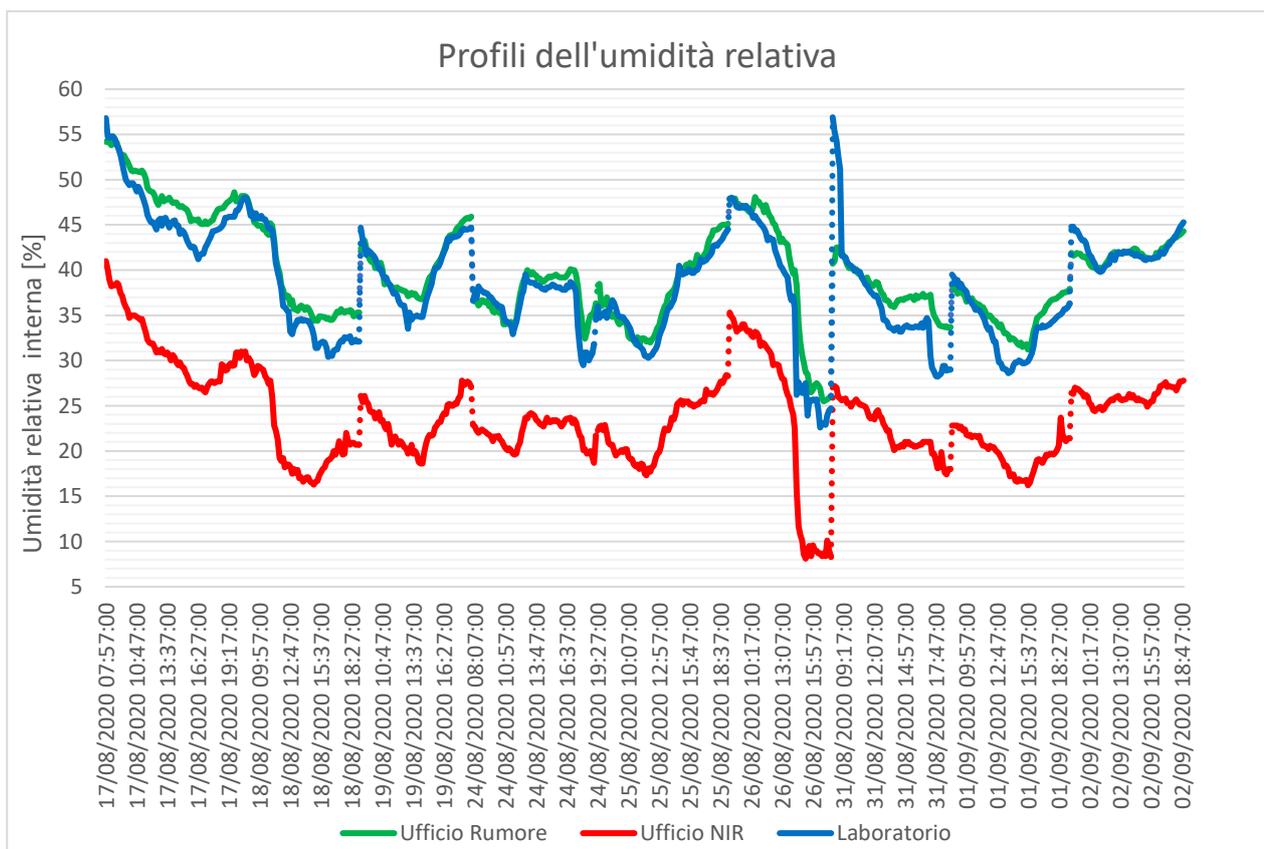


Figura 3.3.2 Profili dell'umidità relativa: Profilo temporale dell'umidità relativa nei tre ambienti

## Misure puntuali del comfort termico

Di seguito sono riportate le analisi puntuali svolte per le principali grandezze che caratterizzano il comfort ambientale, rappresentati tramite tabelle e grafici.

Nella tabella 3.3.4 sono riportati i valori medi del mattino e del pomeriggio per ogni giorno di misura puntuale del voto medio previsto (PMV) e della percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) e la loro categoria corrispondente secondo la EN 16798.

Nelle prime due settimane delle giornate di misure puntuali dal 17/08 al 19/08 e dal 24/08 al 26/08 si sono registrati dei valori medi di PMV vicino allo zero (situazione di neutralità termica), infatti il dato del PMV misurato non supera mai il valore assoluto di 0,6.

Nell'ultima settimana di misure i valori di PMV sono stati leggermente negativi durante tutta la giornata, con un aumento del numero di insoddisfatti. Il dato che si discosta di più da una condizione di neutralità termica è al mattino di martedì 01/09 nell'ufficio Rumore dove si prevede che il numero di insoddisfatti sia pari al 34% con un PMV di -1,18. Il dato di sensazione termica più alta è prevista nell'ufficio NIR il pomeriggio del 18/08.

In generale l'indice PMV ha constatato, nella maggior parte dei casi, che negli ambienti è risultato un'insoddisfazione soggettiva dovuta principalmente ad una condizione di un ambiente freddo.

Confrontando i dati del PMV con l'Allegato H della EN 16798-2, si può fare un'analisi di categoria per le mattine e i pomeriggi delle varie giornate di misure puntuali. In generale si evidenzia un'acceptabilità dell'ambiente termico molto variabile: gli ambienti risultano, nel 50% dei casi, all'interno delle categorie 1 e 2 che sono condizioni in cui si prevede di rientrare in una situazione di comfort termico, mentre il 40% dei dati valutati rientrano nella categoria 3 in cui l'ambiente risulta accettabile come enunciato nella normativa. Infine nel restante 10% si rientra nella categoria 4 dove il livello di comfort risulta basso.

Tabella 3.3.4 PMV e PPD medi relativi alle giornate di misure puntuali e la categoria riferita allo standard

	Ufficio Rumore					
	Lunedì 17/08		Mercoledì 26/08		Martedì 01/09	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
<b>PMV</b>	0,04	0,34	0,09	0,57	-1,18	-0,57
<b>PPD</b>	5,0 %	7,4 %	5,2 %	11,8 %	34,3 %	11,8 %
<b>Categoria</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>
	Ufficio NIR					
	Martedì 18/08		Lunedì 24/08		Mercoledì 02/09	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
<b>PMV</b>	-0,5	0,54	-0,44	0,47	-0,65	-0,14
<b>PPD</b>	10,2 %	11,1 %	9,0 %	9,6 %	13,9 %	5,4 %
<b>Categoria</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>
	Laboratorio					
	Mercoledì 19/08		Martedì 25/08		Lunedì 31/08	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
<b>PMV</b>	0,06	0,52	-0,1	0,2	-0,6	-0,4
<b>PPD</b>	5,1 %	10,7 %	5,2 %	5,8 %	12,5 %	8,3 %
<b>Categoria</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>

### Comfort adattativo:

Nella tabella 3.3.5 sono mostrati i risultati per ogni ufficio che emergono dall'analisi sul comfort adattativo riferiti alla EN 16798 nelle giornate di misure puntuali. Si può evincere che per tutti gli ambienti si ricade sempre in media nella prima categoria con una percentuale di utenti soddisfatti pari al 90%. Nei grafici seguenti sono mostrati in dettaglio le analisi per ciascun ambiente.

Tabella 3.3.5 Percentuale soddisfazione per comfort adattativo

	Ufficio Rumore					
	Lunedì 17/08		Mercoledì 26/08		Martedì 01/09	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Percentuale Soddisfazione	90%					
Categoria	1					
	Ufficio NIR					
	Martedì 18/08		Lunedì 24/08		Mercoledì 02/09	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Percentuale Soddisfazione	90%					
Categoria	1					
	Laboratorio					
	Mercoledì 19/08		Martedì 25/08		Lunedì 31/08	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Percentuale Soddisfazione	90%					
Categoria	1					

Nei grafici si verifica che la temperatura operativa interna media correlata con la running mean outdoor temperature rispetta gli intervalli raccomandati dalla normativa. I dati rappresentati nei grafici si riferiscono alle tre giornate di monitoraggio puntuale svolte nei tre ambienti. Ogni dato monitorato corrisponde ad un intervallo di misura di 10 minuti. Le temperature sono riferite alle sole ore lavorative dalle 8:30 alle 18:00.

Nei grafici seguenti sono rappresentati i limiti superiori e inferiori delle tre categorie specificate dalla normativa con l'opportuno tratteggio.

In tutti e tre i grafici i trend settimanali sono simili con una percentuale di utenti che rientra quasi sempre nei limiti della prima categoria per la quale si prevede che il 90% degli occupanti sia soddisfatto. Nei giorni di misure puntuali della prima e della seconda settimana i valori si avvicinano al limite superiore della prima categoria ma rimangono quasi sempre all'interno dell'intervallo. Nella terza settimana, che risulta essere la più fredda, qualche dato sfiora e supera il limite inferiore della prima categoria.

Possiamo quindi affermare che secondo il metodo adattativo tutti e tre gli ambienti presentano un'elevata percentuale di soddisfatti durante tutto l'arco della giornata.

La Figura 3.3.4 rappresenta le analisi basate sulla teoria del comfort adattativo per l'ufficio Rumore, dove la temperatura interna operativa ricade sempre nella fascia di prima categoria. La giornata del 01/09 risulta la più fresca delle tre e, come già detto, rientra sempre nei limiti stabiliti dalla normativa.

Per alcune ore del 26/08 i valori della Outdoor running mean temperature superano i 31 °C, oltre questa temperatura il metodo non è più applicabile e non si può pertanto prevedere la percentuale di utenti soddisfatti.

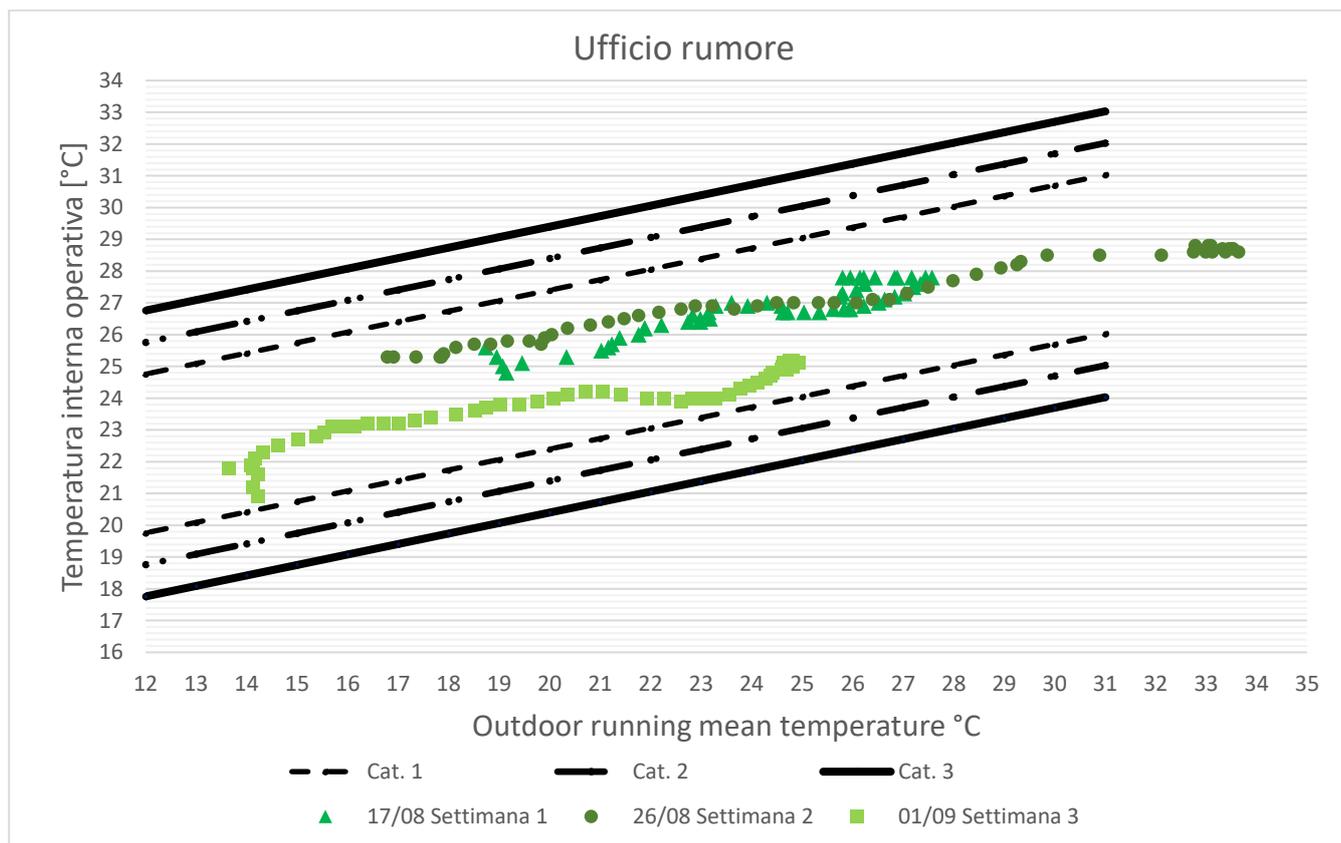


Figura 3.3.4 Comfort Adattativo Ufficio Rumore

L'ufficio NIR presenta due giornate dove i profili di temperatura sono molto differenti, il giorno 24/08 risulta essere il più caldo con temperature operative vicine al limite superiore della prima categoria; mentre il giorno 02/09 risulta essere la giornata più fredda in quanto molti valori scendono sotto la soglia del limite inferiore della prima categoria.

Oltre il 92 % dei dati misurati risultano all'interno dei limiti di comfort ottimale. L'ambiente dal punto di vista del comfort adattativo risulta avere un elevato numero di soddisfatti.

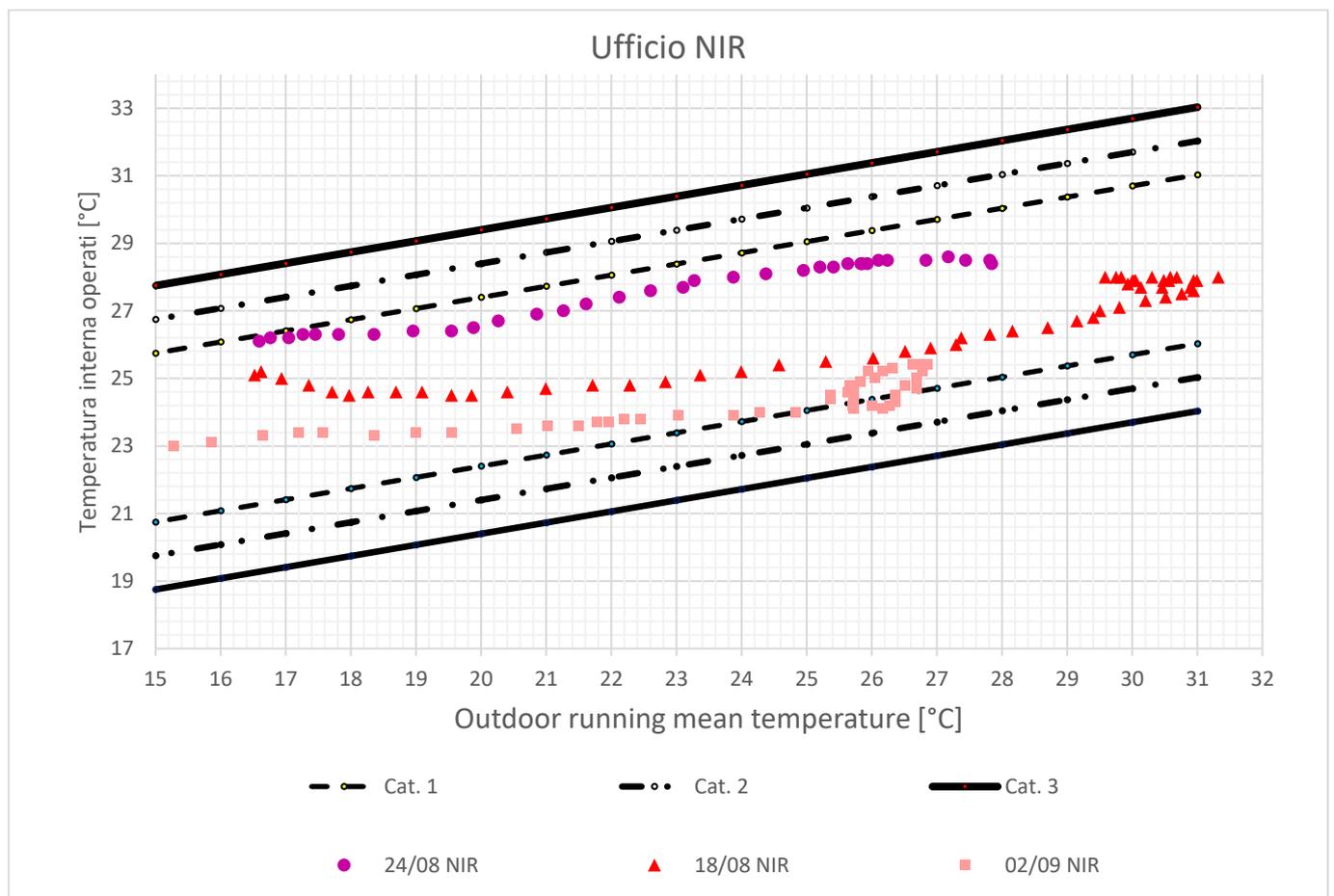


Figura 3.3.5 Comfort Adattativo Ufficio NIR

Nella figura 3.3.6 sono rappresentati i valori del Laboratorio che risulta essere l'ambiente con la differenza di temperatura interna operativa minore.

Anche nel Laboratorio, secondo il modello di comfort adattativo, quasi tutti i valori rientrano all'interno della prima categoria con un numero di soddisfazione pari al 90%. Come precedentemente, la giornata di misure dell'ultima settimana risulta essere la più fredda con alcuni dati che scendono sotto il limite della prima categoria.

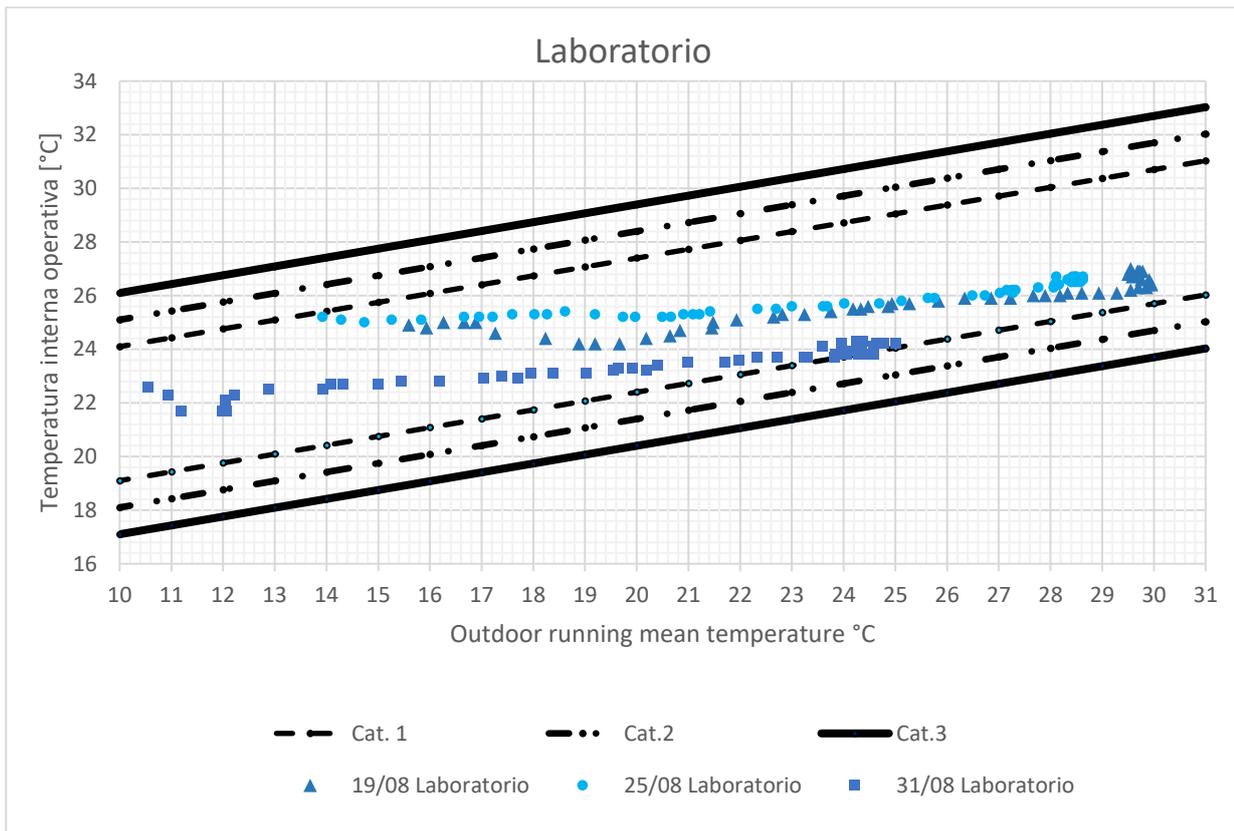


Figura 3.3.6 Comfort Adattativo Laboratorio

## Comfort acustico

Si presentano i risultati relative alle analisi puntuali e continue della pressione sonora misurata nei vari ambienti, si riportano prima i valori medi in tabella e poi, tramite i grafici, si va a valutare il profilo temporale.

Nella tabella 3.3.6 sono mostrati i fattori di correzione rispetto al tempo di riverberazione, i tempi di riverberazione di riferimento  $T_0$  sono proporzionali al volume dell'ambiente considerato. Si ottengono così dei termini di normalizzazione  $K_2$  del livello equivalente trascurabili per gli uffici e una riduzione di 5 dBA nel Laboratorio.

Tabella 3.3.6 Termine di normalizzazione per ogni ufficio

Ambienti	$T_0$ Tempo di riverberazione di riferimento	T Tempo riverberazione approssimato	$K_2$ termine di normalizzazione
Ufficio Rumore	0,61	0,61	0
Ufficio NIR	0,57	0,66	0,1
Laboratorio	1	3,2	-5,1

### Analisi dei livelli di pressione sonora delle misure continue

Nella tabella 3.3.7 sono riassunti i valori medi di pressione sonora continui equivalenti confrontati con la normativa di riferimento. Queste misure sono avvenute nelle giornate di misure continue registrate con i SEM posti sulle scrivanie degli uffici e dei Labortori.

I tre ambienti presentano valori medi di livello equivalente differenti fra loro, l'ufficio NIR risulta essere il meno rumoroso con valori che si aggirano intorno ai 46 dBA, mentre il Laboratorio è il più rumoroso con livelli medi pari a 57 dBA. Infine, l'ufficio Rumore presenta valori che variano dai 47 dBA ai 52 dBA. Tutti e tre gli ambienti non rientrano nella terza categoria della tabella L.1 della normativa EN16798-1, dove questi ivelli si riferiscono al rumore proveniente dagli impianti ad ambiente non occupato.

Di conseguenza gli ambienti risultano essere troppo rumorosi se riferiti ai valori presenti nella normativa ma dobbiamo tener conto che le misure sono avvenute ad ambiente occupato e quindi i valori normativi posso dare solo un'indicazione del livello di soddisfazione degli occupanti riguardo il comfort acustico ma non una reale valutazione.

Tabella 3.3.7 Misure continue pressione sonora riferiti al livello continuo equivalente

Leq,nT [dBA]		Ufficio Rumore								
		Lunedì 17/08	Martedì 18/08	Mercoledì 19/08	Lunedì 24/08	Martedì 25/08	Mercoledì 26/08	Lunedì 31/08	Martedì 01/09	Mercoledì 02/09
	Valore medio	48,5	46,8	49,2	51,8	47,9	50	48,1	52,0	41,7
	Categoria	>3								
		Ufficio NIR								
		Lunedì 17/08	Martedì 18/08	Mercoledì 19/08	Lunedì 24/08	Martedì 25/08	Mercoledì 26/08	Lunedì 31/08	Martedì 01/09	Mercoledì 02/09
	Valore medio	44,9	44,6	43,3	46,2	41,8	42,8	42,8	42,6	44,8
	Categoria	>3								
		Laboratorio								
		Lunedì 17/08	Martedì 18/08	Mercoledì 19/08	Lunedì 24/08	Martedì 25/08	Mercoledì 26/08	Lunedì 31/08	Martedì 01/09	Mercoledì 02/09
Valore medio	57,9	58,1	58,3	56,4	58,0	56,2	55,1	54,9	53,7	
Categoria	>3									

Nella Figura 3.3.3 si sono rappresentati i livelli equivalenti continui di pressione sonora ponderato A ( $L_{eq,nT,A}$ ) mediati ogni 15 minuti per tutti e tre gli ambienti monitorati. Il profilo temporale a cui si riferisce il grafico è relativo alle misure continue utilizzate in precedenza e viene inoltre rappresentato il valore medio globale lungo le tre settimane di misura.

I profili sonori sono tipici di locali con un indice di occupazione elevato in quanto sono presenti molti picchi che si discostano dal valor medio registrato.

Il Laboratorio risulta l'ambiente con il dato medio più alto (pari a 57,1 dBA), con un valore massimo di livello continuo registrato pari a 66,7 dBA. I due uffici, invece, presentano valori medi pari a 49 dBA (ufficio rumore) e 47 dBA (ufficio NIR). La differenza tra uffici e il Laboratorio è quindi molto marcata avendo una differenza di circa di 10 dBA.

La normativa EN 16798 nella tabella L.1 pone un limite di 40 dBA per il livello continuo misurato negli uffici di media dimensione. Nelle tre settimane di misura questo limite non viene rispettato in quanto per l'ufficio NIR e per l'ufficio Rumore i livelli medi misurati si aggirano intorno ai 50 dBA. Per gli ambienti più grandi come il Laboratorio la normativa richiede di rispettare un livello di 45 dBA che anche in questo caso non viene mai rispettato, registrando valori medi misurati che sfiorano i 60 dBA.

Come già detto in precedenza la normativa fa riferimento alle sole fonti provenienti dai sistemi meccanici per ambienti non occupati, di conseguenza i livelli che sono stati registrati durante il caso studio che sono avvenuti ad ambiente occupato sono notevolmente superiori a quelli previsti dalla normativa. A livello normativo mancano indicazioni sui livelli di pressione sonora tollerabili riferibili all'ambiente occupato.

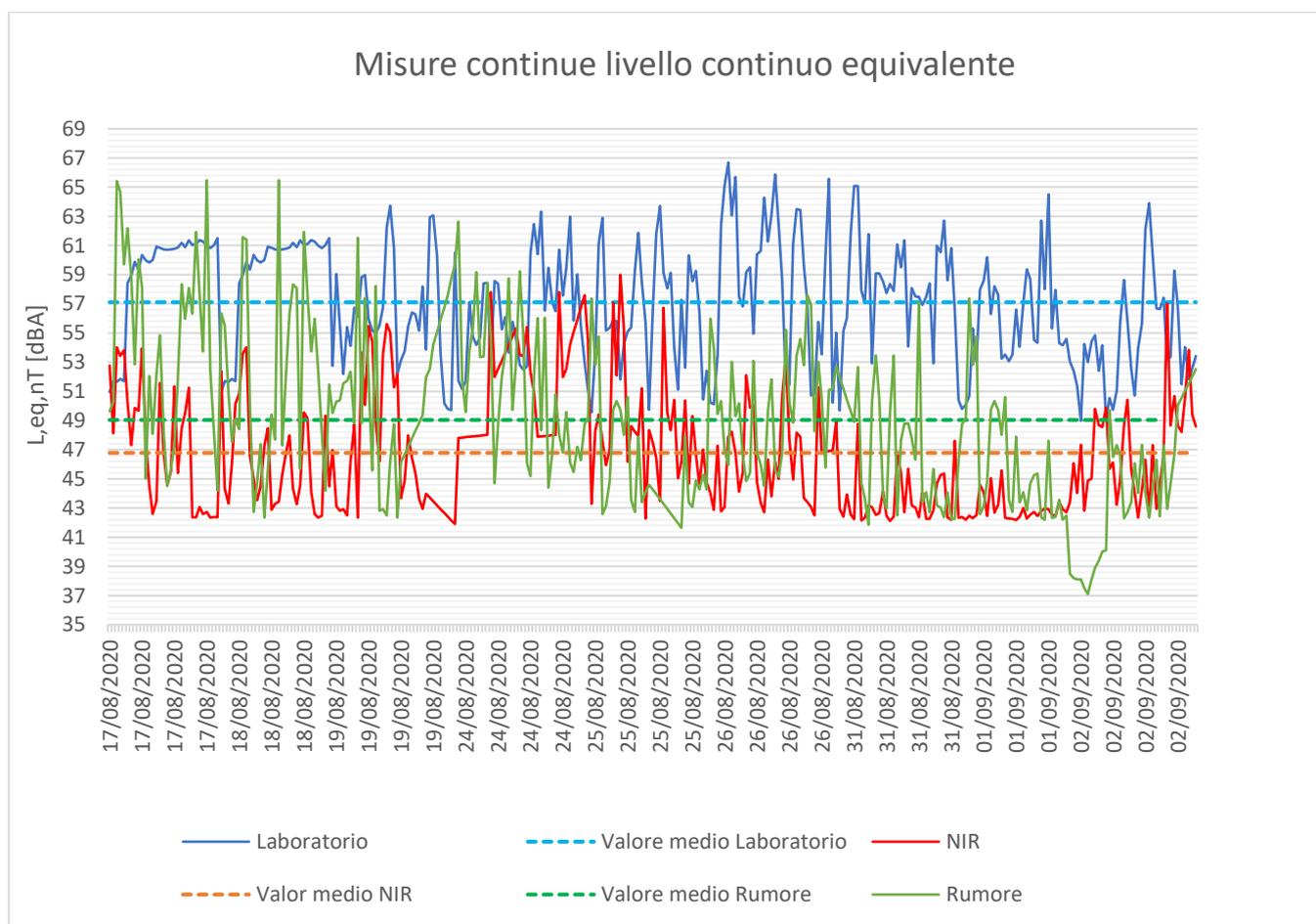


Figura 3.3.3 Misure continue livello continuo equivalente nei rispettivi tre ambienti con il corrispondente valor medio

### Analisi del livello di pressione sonora delle misure puntuali

Di seguito sono riassunti i valori medi di livello continuo equivalente valutati attraverso il fonometro e poi corretti con il tempo di riverberazione per i tre uffici per le mattine e i pomeriggi delle giornate di misure puntuali.

Il giorno 31/08 il Soundbook non ha registrato e quindi manca il dato puntuale dell'intera giornata di misure.

Dalla comparazione dei livelli di pressione sonora media emerge una grossa differenza tra i vari ambienti. Il Laboratorio, che ha dei livelli medi intorno a 60 dBA, risulta il locale più rumoroso. L'Ufficio NIR si conferma essere il più silenzioso, con una media pari a 47 dBA. Infine, l'Ufficio Rumore è caratterizzato da 52 dBA medi rispetto alle tre settimane di misura.

Il valore medio delle misure puntuali di tutti e tre gli ambienti risulta essere leggermente maggiore rispetto a quello delle misure continue per motivi principalmente legati alla sensibilità dello strumento.

A livello normativo valgono quindi le stesse riflessioni fatte per le misure continue, dove i livelli che sono stati registrati durante il caso studio sono notevolmente superiori alla normativa e di conseguenza non rientrano nei requisiti minimi.

Tabella 3.3.8 Misure puntuali pressione sonora

<b>L<sub>eq,nT</sub> [dBA]</b>		<b>Ufficio Rumore</b>					
		<b>Lunedì 17/08/2020</b>		<b>Mercoledì 26/08/2020</b>		<b>Martedì 01/09/2020</b>	
		<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>
	<b>Valor medio</b>	53,8	51,1	47,6	49,9	51,4	48,2
	<b>Categoria</b>	>3					
		<b>Ufficio NIR</b>					
		<b>Martedì 18/08/2020</b>		<b>Lunedì 24/08/2020</b>		<b>Mercoledì 02/09/2020</b>	
		<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>
	<b>Valor medio</b>	46,4	41,0	50,2	39,9	44,1	47,3
	<b>Categoria</b>	>3					
		<b>Laboratorio</b>					
		<b>Mercoledì 19/08/2020</b>		<b>Martedì 25/08/2020</b>		<b>Lunedì 31/08/2020</b>	
		<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>
	<b>Valor medio</b>	59,3	60,2	59,4	59,2	-	-
	<b>Categoria</b>	>3					

Nella figura 3.3.7 si sono prese in considerazione le intere tre settimane di misure puntuali dei livelli misurati alle sole ore lavorative (8 ore al giorno). Il dato è stato espresso con un intervallo temporale di 15 minuti; inoltre, sono stati inseriti, con un tratteggio, i livelli medi misurati per i tre ambienti perché sono ben rappresentativi della condizione del comfort acustico presente.

Il grafico rappresenta l'andamento dei livelli massimi e minimi che la tabella precedente non fornisce. Inoltre, mostra ulteriormente la differenza di livello sonoro tra il Laboratorio e gli altri due ambienti in cui i livelli di pressione sonora rimangono praticamente sempre maggiori dei 50 dBA risultando essere troppo alti per un ambiente openspace.

L'ultima giornata di misure del Laboratorio non è riportata in quanto, come già detto in precedenza, il fonometro non ha registrato il dato.

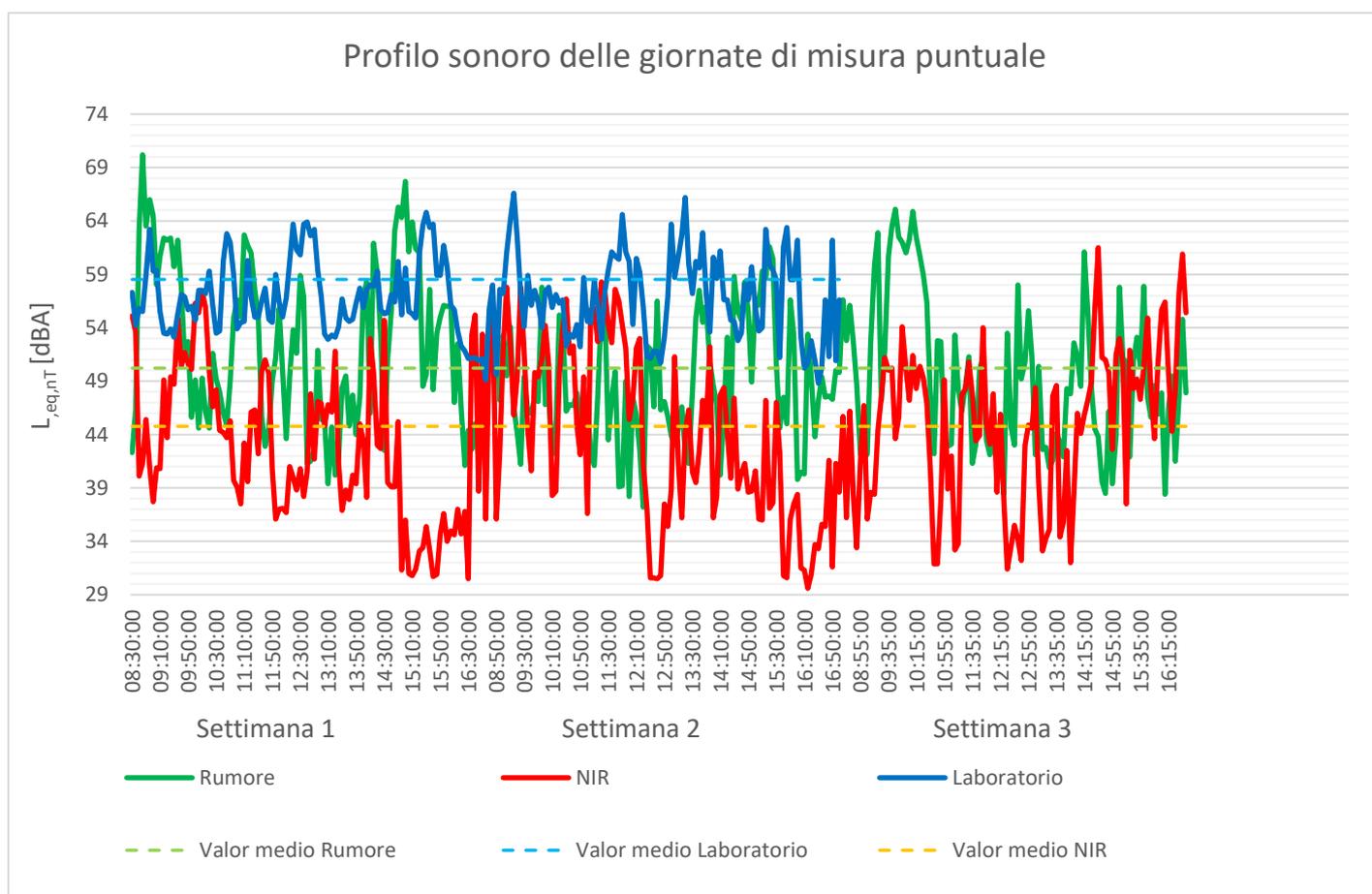


Figura 3.3.7 Profilo sonoro della seconda settimana di misure puntuali del Livello continuo equivalente ponderato A

## Confronto SEM e Fonometro

Nell'ultimo grafico dell'analisi della pressione sonora vengono riportate le differenze rilevate dai due strumenti di misura utilizzati, il SEM per le misure continue e il fonometro per le misure puntuali.

Il fonometro è uno strumento di classe 1 e il SEM è uno strumento di classe 2, emergono quindi differenze nelle misure del livello di pressione sonora continuo misurato.

I valori presenti nella figura 3.3.8 fanno riferimento alle sole giornate di misura puntuale in cui gli strumenti hanno funzionato insieme negli stessi ambienti.

Nel Laboratorio dove il disturbo proveniente dai macchinari è una fonte rilevante di rumore, il fonometro riesce a misurare con più continuità valori più alti rispetto al semaforo acustico che presenta medie registrate nettamente inferiori. Nell'ufficio Rumore gli intervalli dei valori misurati con il SEM e il fonometro sono simili, il Semaforo acustico quindi risulta più indicato come strumento per la misurazione dei livelli di parlato caratteristici degli uffici.

Infine nell'ufficio NIR dove al pomeriggio abbiamo una forte diminuzione del livello di pressione sonora, il fonometro registra più facilmente livelli inferiori ai 40 dB rispetto al SEM che non riesce per via della sua scarsa precisione a misurare livelli più bassi.

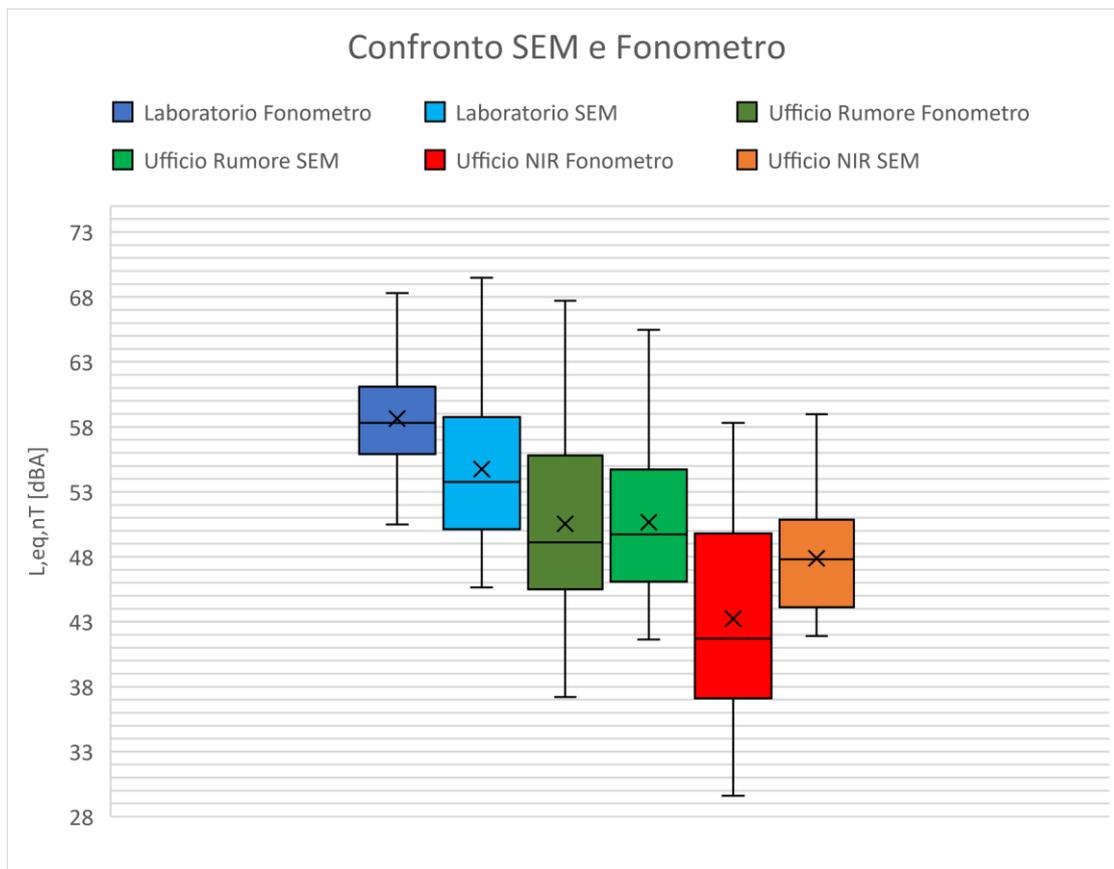


Figura 3.3.8 Confronto del livello continuo equivalente di pressione sonora misurato con il Fonometro e con il SEM

## Comfort visivo

Nella tabella riassuntiva 3.3.9 sono rappresentati i valori medi di illuminamento misurato sulle scrivanie nelle giornate di misura puntuale e confrontati con la normativa di riferimento.

Nell'Ufficio Rumore al mattino si raggiungono valori di 300 Lux medi mentre al pomeriggio si registrano valori sempre inferiori ai 150 Lux.

Nell'Ufficio NIR risultano valori sempre inferiori ai 150 Lux, con valori anche qui leggermente più alti al mattino.

Il Laboratorio risulta essere l'ambiente più illuminato e si registrano mediamente 300 Lux.

Secondo la EN 12464 il valore di illuminamento medio mantenuto di dimensionamento degli impianti degli uffici è di 500 Lux. I valori misurati durante le misure puntuali sono risultati nettamente inferiori in tutti e tre gli ambienti rispetto al riferimento normativo.

Nei due Uffici sono presenti apparecchi luminosi che garantiscono i 300 Lux sul piano di lavoro, questo fa ipotizzare che le luci, durante le giornate di misura puntuale, siano rimaste quasi sempre spente considerando che mediamente si sono misurati valori intorno ai 100 Lux.

Mentre nei Laboratori in cui si necessita un livello d'illuminamento più elevato si ipotizza che le fonti luminose risultino essere state, per la maggior parte del tempo, accese.

Tabella 3.3.9 Misure puntuali illuminamento

E <sub>m</sub> [Lux]		<b>Ufficio Rumore</b>					
		<b>Lunedì 17/08/2020</b>		<b>Mercoledì 26/08/2020</b>		<b>Martedì 01/09/2020</b>	
		<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>
	<b>Valor medio</b>	301	121	318	123	163	144
	<b>Livello normativo</b>	500					
		<b>Ufficio NIR</b>					
		<b>Martedì 18/08/2020</b>		<b>Lunedì 24/08/2020</b>		<b>Mercoledì 02/09/2020</b>	
		<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>
	<b>Valor medio</b>	130	86	95	73	150	143
	<b>Livello normativo</b>	500					
		<b>Laboratorio</b>					
		<b>Mercoledì 19/08/2020</b>		<b>Martedì 25/08/2020</b>		<b>Lunedì 31/08/2020</b>	
		<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>
	<b>Valor medio</b>	334	364	286	356	267	280
	<b>Livello normativo</b>	500					

Nel grafico 3.3.8 sono mostrati i livelli di illuminamento espressi in Lux associandoli al loro valore medio (calcolato sull'intero periodo di monitoraggio) per tutti e tre i giorni delle settimane di misura puntuale.

Il livello misurato nell'ufficio NIR risulta essere il più basso pur essendo esposto a SUD, con un valore poco superiore ai 100 Lux medi. Questo, probabilmente, è dovuto alla presenza di tende che hanno oscurato l'ambiente durante tutte e tre le giornate di misure puntuali. Nell'ufficio Rumore il livello di illuminamento medio non raggiunge i 200 Lux, i picchi più alti si hanno nelle prime ore della giornata probabilmente dovute all'accensione degli apparecchi luminosi.

Il Laboratorio è quello che risulta meglio illuminato dove si riscontrano valori medi nelle giornate della prima e della seconda settimana pari a 350 Lux e nell'ultimo giorno un valore poco inferiore ai 300 Lux.

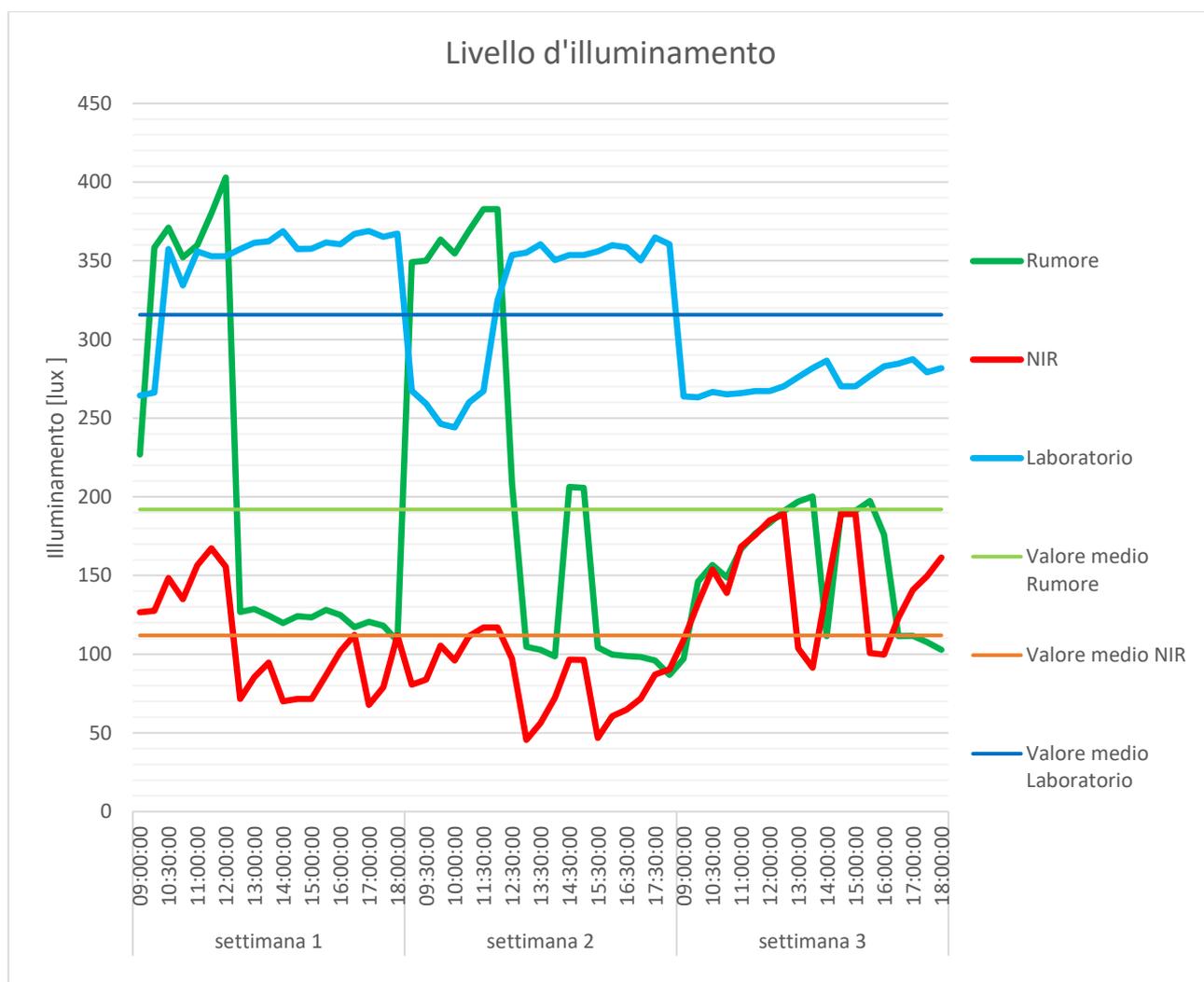


Figura 3.3.8 Livello d'illuminamento misurato nelle rispettive 3 settimane di misure puntuali

## Qualità dell'Aria interna

Sono rappresentati di seguito i valori delle concentrazioni medie di inquinanti misurati nei tre ambienti lungo le tre settimane di misurazioni puntuali, utili per valutare la qualità dell'aria dell'ambiente interno (IAQ).

Non vengono riportati i valori misurati con i radielli dei COV in quanto, come già spiegato nello scorso capitolo, le analisi del Laboratorio sono tardate ad arrivare.

La normativa EN16798-1 nella tabella I.7 fornisce dei valori massimi di concentrazione di CO<sub>2</sub> da mantenere negli ambienti per ogni categoria di qualità ambientale. I valori misurati nei nostri tre ambienti rientrano sempre nella prima categoria, cioè quella dove l'ambiente presenta una qualità migliore.

I valori di CO<sub>2</sub> presenti nella tabella 3.3.10 risultano essere sempre compresi tra i 400 e i 500 ppm tranne per la giornata di martedì 01/09 dove nell'ufficio Rumore il valore raggiunge i 540 ppm. Il dato misurato non si avvicina mai al valore di 950 ppm stabiliti dalla normativa che farebbe rientrare l'ambiente nella seconda categoria di qualità. Riferendoci al livello normativo si ritiene che gli uffici e i Laboratori abbiamo un' elevata qualità dell'aria interna.

I valori di PM1 sono sempre vicini ad un valore pressoché nullo nel Laboratorio e nell'ufficio NIR, mentre si raggiungono valori leggermente più alti nell'ufficio Rumore.

I valori di PM2.5 sono quasi sempre vicini all'unità nel Laboratorio e nel NIR mentre il nell'ufficio Rumore si raggiunge il valore di 9,3 µg/m<sup>3</sup> durante il mattino del 26/08.

Il PM10 raggiunge il valore più alto di 10,9 3 µg/m<sup>3</sup> mercoledì 02/09 nell'ufficio NIR.

La normativa EN 16798-1 nell'Allegato M segue i valori guida suggeriti per gli inquinanti atmosferici interni formulato dall'OMS, prescrivendo il mantenimento nelle 24 ore di un valore inferiore di 25 µg/m<sup>3</sup> per il PM2.5 e 50 µg/m<sup>3</sup> per il PM10. I valori misurati quindi son ampiamenti rispettati dalla normativa di riferimento.

Tabella 3.3.10 concentrazioni di CO<sub>2</sub> e di particolato

IAQ	Ufficio Rumore					
	Lunedì 17/08/2020		Mercoledì 26/08/2020		Martedì 01/09/2020	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
CO <sub>2</sub> [ppm]	439,3	433	479,4	457,8	538,7	470,6
Categoria	1					
PM1 [µg/m <sup>3</sup> ]	2	1,8	5,4	3	0,8	0
PM 2.5 [µg/m <sup>3</sup> ]	3,9	3,7	9,3	3,3	2,2	0,1
PM 10 [µg/m <sup>3</sup> ]	3,5	3,4	7,6	3,1	1,7	0
	Ufficio NIR					
	Martedì 18/08/2020		Lunedì 24/08/2020		Mercoledì 02/09/2020	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
CO <sub>2</sub> [ppm]	427	421,5	450,9	413,8	463,4	454,2
Categoria	1					
PM1 [µg/m <sup>3</sup> ]	1,8	0,03	0,4	0,4	0,4	0,3
PM2.5 [µg/m <sup>3</sup> ]	3,9	0,14	1,9	1,7	1,6	1,6
PM 10 [µg/m <sup>3</sup> ]	3,3	0,07	1,4	1,4	10,9	1,3
	Laboratorio					
	Mercoledì 19/08/2020		Martedì 25/08/2020		Lunedì 31/08/2020	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
CO <sub>2</sub> [ppm]	418,5	419,9	412,2	421,2	415,5	411,2
Categoria	1					
PM1 [µg/m <sup>3</sup> ]	0,3	0,2	0,3	-	0	0
PM2.5 [µg/m <sup>3</sup> ]	1,7	1,2	1,7	-	0,1	0,1
PM 10 [µg/m <sup>3</sup> ]	1,3	1	1,3	-	0	0

Nella figura 3.3.9 si mostrano i soli valori di concentrazioni di CO<sub>2</sub> rilevati durante le tre giornate di misure puntuali nei vari ambienti.

Dal grafico emerge che la concentrazione di CO<sub>2</sub> all'interno degli ambienti non varia molto rispetto a quella presente all'esterno dell'ambiente occupato. I valori di concentrazione nel Laboratorio rimangono sempre inferiori ai 450 ppm, con dati misurati pressoché costanti durante tutti e tre le giornate di misura puntuale. L'ufficio NIR presenta un profilo simile, anche se caratterizzato da picchi che raggiungono i 500 ppm durante alcuni momenti della giornata.

L'ufficio Rumore, invece, presenta un picco importante nella giornata dell'ultima settimana di misure, con la CO<sub>2</sub> che arriva a superare nella mattinata la soglia dei 600 ppm.

Durante la notte negli uffici e nei Laboratori sono stati misurati i livelli di concentrazione in assenza di occupanti. Si è andato così a ricavare un valore medio di concentrazione che è stato poi utilizzato come dato di CO<sub>2</sub> presente naturalmente nell'ambiente risultato pari, per tutti e tre gli ambienti, a 400 ppm. I valori monitorati durante le giornate di misura puntuale risultano essere poco superiori, massimo 200 ppm, rispetto a quelli già presenti naturalmente negli ambienti.

Quindi riferendosi alla tabella B.11 della normativa EN 16798-1, per confrontare i dati misurati con la normativa bisogna fare la differenza tra il livello di concentrazione di CO<sub>2</sub> misurato nell'ambiente interno e quello presente naturalmente nell'ambiente pari a 400 ppm.

Possiamo calcolare quindi il  $\Delta\text{CO}_2$  medio per i vari ambienti che rappresenta la concentrazione di CO<sub>2</sub> al di sopra di quella misurata in assenza di persone:

$\Delta\text{CO}_2$  medio ufficio NIR = 50 ppm

$\Delta\text{CO}_2$  medio Ufficio Rumore = 60 ppm

$\Delta\text{CO}_2$  medio Laboratorio = 15 ppm

Secondo la EN16798-1 i valori di concentrazione di CO<sub>2</sub> misurati fanno rientrare tutti e tre gli ambienti nella prima categoria cioè con un'ottima qualità dell'aria ambiente in quanto le concentrazioni risultano sempre inferiori ai 550 ppm di  $\Delta\text{CO}_2$  stabiliti nella normativa.

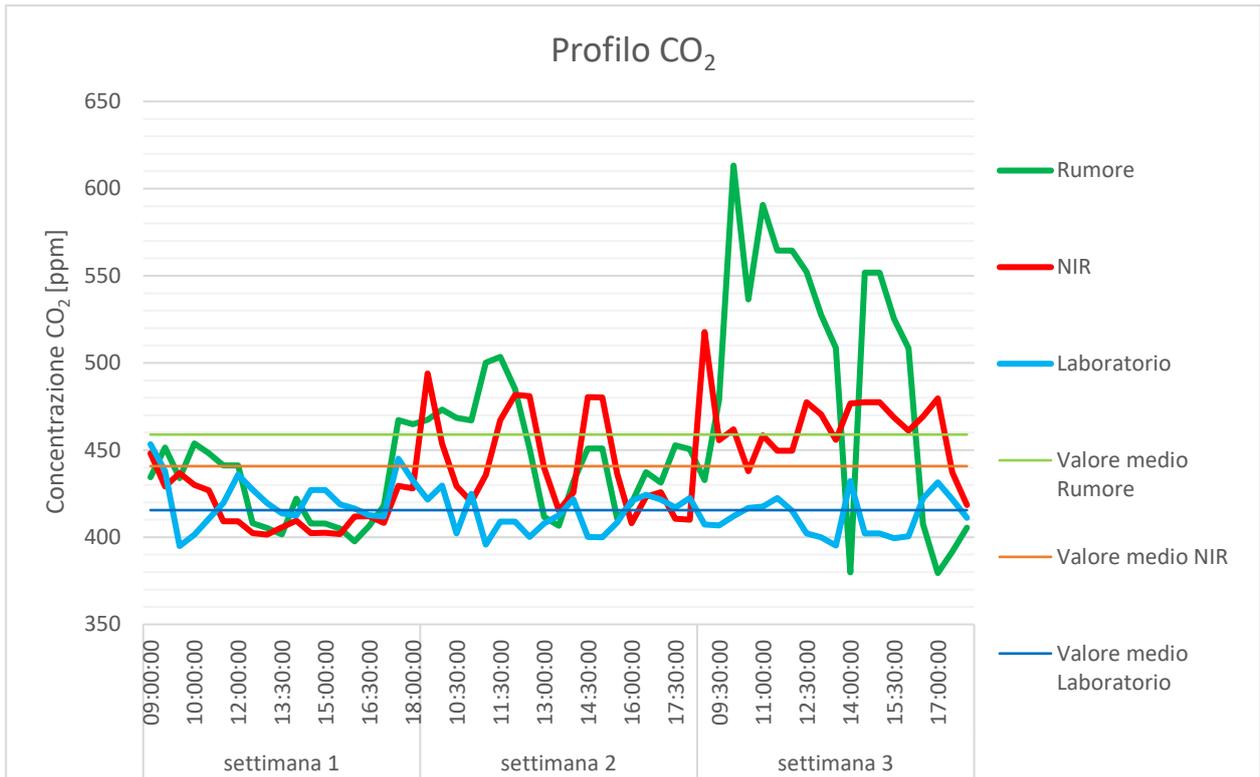


Figura 3.3.9 Profili concentrazione CO<sub>2</sub> misurato nelle rispettive 3 settimane di misure puntuali

### Campo magnetico:

Nella tabella 3.3.10 sono riportati i valori medi dei livelli del campo magnetico misurate presso le scrivanie degli uffici e dei Laboratori. Questi valori, per tutte le giornate di misure continue, sono ben al di sotto al limite di 100  $\mu$ T a 50 Hz previsto dalla normativa per gli le persone fisiche.

Dalla tabella possiamo vedere che nell' ufficio NIR e nel Laboratorio si rileva un debole campo magnetico nei pressi della postazione computer. Per l'ufficio Rumore i valori di campo che vengono misurati sono quasi pari al valore di fondo scala dello strumento.

Tabella 3.3.10 livelli del campo magnetico

		Ufficio Rumore								
		Lunedì 17/08	Martedì 18/08	Mercoledì 19/08	Lunedì 24/08	Martedì 25/08	Mercoledì 26/08	Lunedì 31/08	Martedì 01/09	Mercoledì 02/09
Em [ $\mu$ T]	Valore medio	0,05	0,03	0,03	-	-	-	0,06	0,05	0,06
		Ufficio NIR								
		Lunedì 17/08	Martedì 18/08	Mercoledì 19/08	Lunedì 24/08	Martedì 25/08	Mercoledì 26/08	Lunedì 31/08	Martedì 01/09	Mercoledì 02/09
	Valore medio	0,14	0,15	0,14	0,14	0,13	0,14	0,11	0,13	0,12
		Laboratorio								
		Lunedì 17/08	Martedì 18/08	Mercoledì 19/08	Lunedì 24/08	Martedì 25/08	Mercoledì 26/08	Lunedì 31/08	Martedì 01/09	Mercoledì 02/09
	Valore medio	0,03	0,02	0,03	0,12	0,13	0,13	0,11	0,12	0,12

### 3.4 Analisi del dato soggettivo

Vengono illustrate in seguito le analisi delle risposte relative ai due questionari presentati nel caso studio, mostrando prima il questionario trasversale e poi il questionario longitudinale.

Sia nel questionario trasversale che nel questionario longitudinale tutte le domande fornite agli intervistati sono state completate come richiesto. Negli uffici e nel Laboratorio non erano sempre presenti il numero completo degli utenti intervistati in quanto per motivi legati ad uscite sul campo e motivi legati all'emergenza sanitaria Covid-19 non erano in sede o in ufficio per poter rispondere al questionario somministrato.

#### Questionario Trasversale

Di seguito nella tabella 3.4.1 sono riportate le Informazioni di carattere generale sul questionario trasversale e le risposte alle domande della **prima sezione**. Il tempo di permanenza negli uffici è uguale per tutti i dipendenti dell'ARPA. Inoltre, tutti gli occupanti hanno partecipato al questionario, permettendo di avere una rappresentazione complessiva della loro soddisfazione.

Tabella 3.4.1 informazioni sulla prima sezione del questionario

Ambiente	numero totale d'intervistati	Tempo di occupazione	Tasso di risposta
Ufficio Rumore	3	Da 6 a 8 ore	100%
Ufficio NIR	3	Da 6 a 8 ore	100%
Laboratorio	5	Da 6 a 8 ore	100%

Le Risposte della **seconda sezione** del questionario trasversale relative al grado di soddisfazione dell'ambiente di lavoro sono riportate nei prossimi grafici, che evidenziano le criticità e le condizioni generali percepite dagli occupanti durante le varie stagioni.

Nel Grafico 3.4.1 si sono rappresentati i parametri ambientali che hanno generato insoddisfazione nei tre ambienti monitorati riferiti alle domande del questionario da **codice T1 a codice T8** . Le domande sul grado di soddisfazione per la luce naturale e artificiale **codice T6 e T7** non sono state inserite in quanto si è sempre rilevata una larga percentuale di soddisfazione e non rappresentano quindi una fonte di disturbo.

Il dato rappresentato nel grafico si riferisce alle condizioni medie stagionali, andando quindi a rappresentare un grado di soddisfazione su tutto l'arco dell'anno.

L'ambiente che risulta meno confortevole è sicuramente il Laboratorio in quanto per tutti e quattro i parametri mostrati presenta un'insoddisfazione media (considerando i tre voti della scala corrispondenti a tale giudizio) del 55%. Il comfort acustico risulta essere il parametro più critico.

Nell'ufficio NIR la sensazione termica risulta non essere gradita dalla maggior parte degli occupanti.

Gli occupanti dell'Ufficio Rumore, invece, non sono soddisfatti della condizione globale dei parametri ambientali con una percentuale del 66,6% d'insoddisfazione generale.

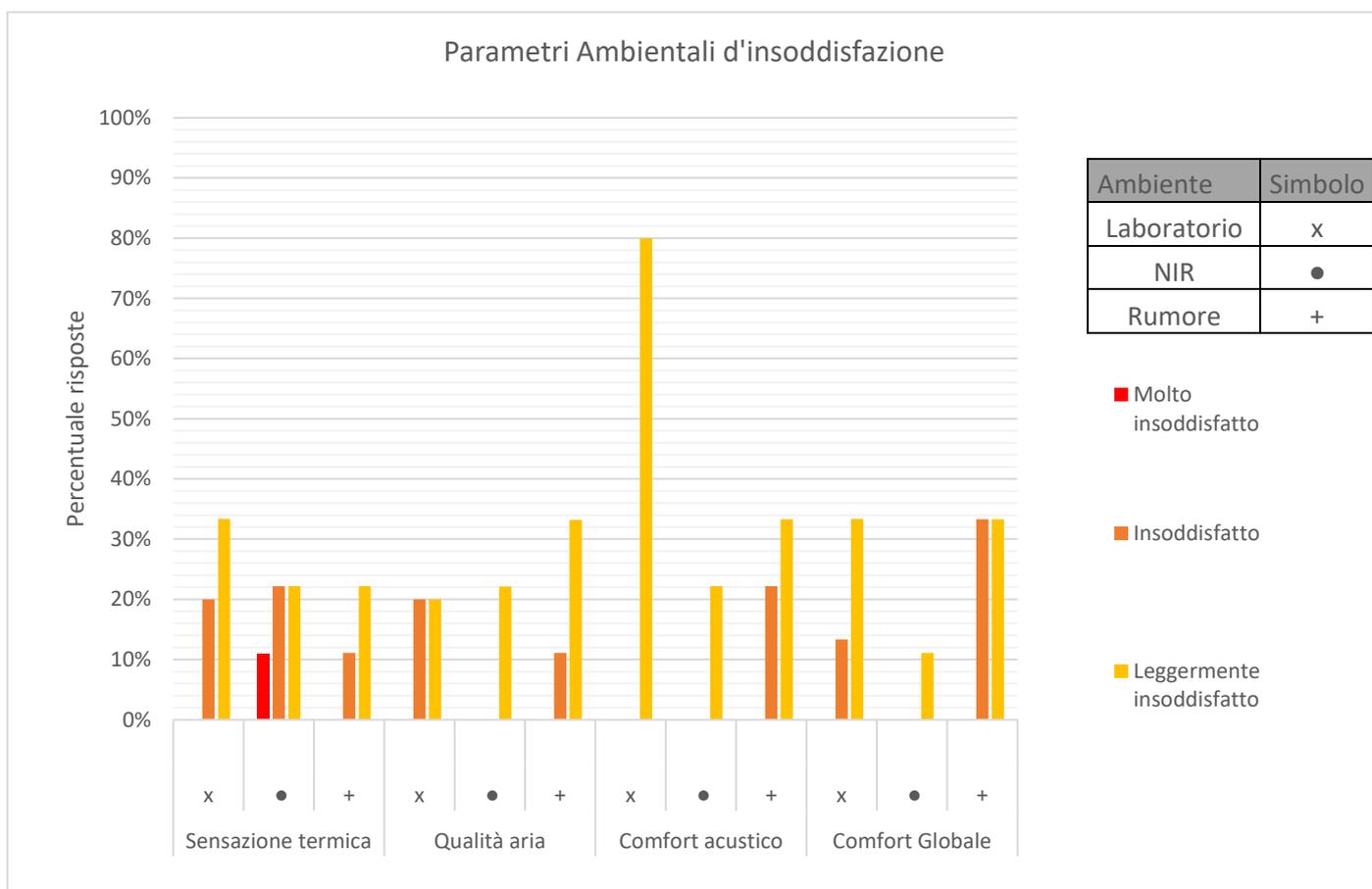


Figura 3.4.1 Parametri ambientali d'insoddisfazione

Domande sul grado di soddisfazione con codice da **T1 a T8** del questionario trasversale.

Nell'ottica di individuare quali parametri ambientali creassero più problematiche, il grafico 3.4.2 mostra nell'ufficio NIR come in autunno, primavera ed estate la percentuale di soddisfazione è variabile per i vari parametri ambientali. Si è deciso di non rappresentare la situazione invernale perché non vi erano percentuali di insoddisfazione rilevanti su nessuna grandezza.

L'ufficio NIR ha un percentuale d'insoddisfazione importante relativa alle condizioni di comfort termico durante la maggior parte dell' anno. Una percentuale di occupanti pari al 33% reputa non soddisfacente gli aspetti legati alla qualità dell'aria e il rumore presente nell'ambiente. Mentre Il comfort visivo relativo alla luce naturale ed artificiale risulta più che soddisfacente.

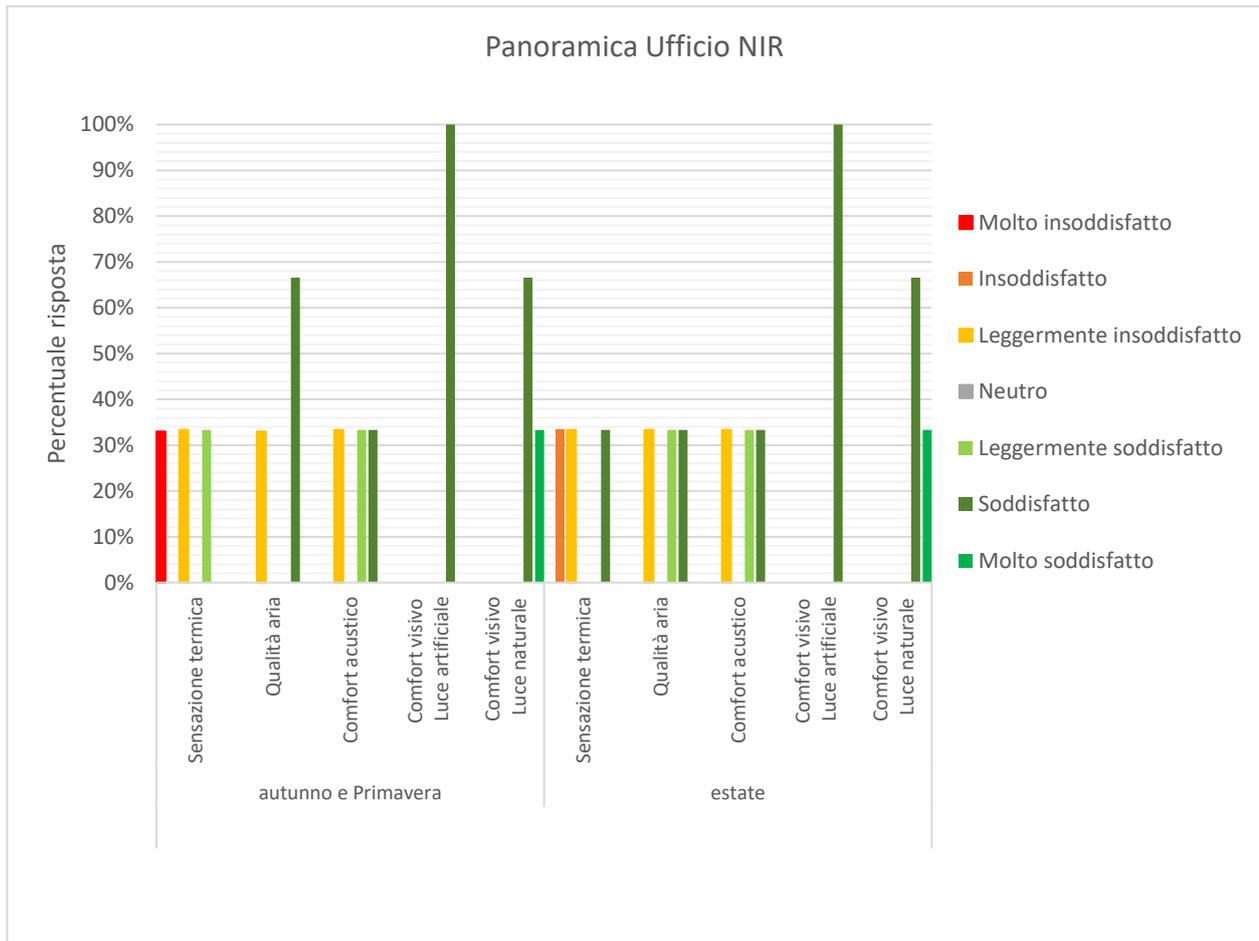


Figura 3.4.2 Panoramica estiva Ufficio NIR

Domande sul grado di soddisfazione con codice da T1 a T8 del questionario trasversale.

Il laboratorio risulta, dai dati che emergono dal questionario trasversale, l'ambiente con maggiori criticità. Il grafico 3.4.3 è basato sulla media annuale di soddisfazione in quanto fra le varie stagioni non vi sono grosse differenze di risposta.

La percentuale d'insoddisfazione generalmente emersa risulta essere più alta rispetto agli uffici. In particolare il comfort acustico risulta per l'80% degli occupanti essere leggermente insoddisfacente. Inoltre, sia la qualità dell'aria che il comfort termico hanno una percentuale d'insoddisfazione maggiore del 40%.

Complessivamente, anche considerando la domanda sul comfort globale, più del 50% degli utenti non risulta soddisfatto.

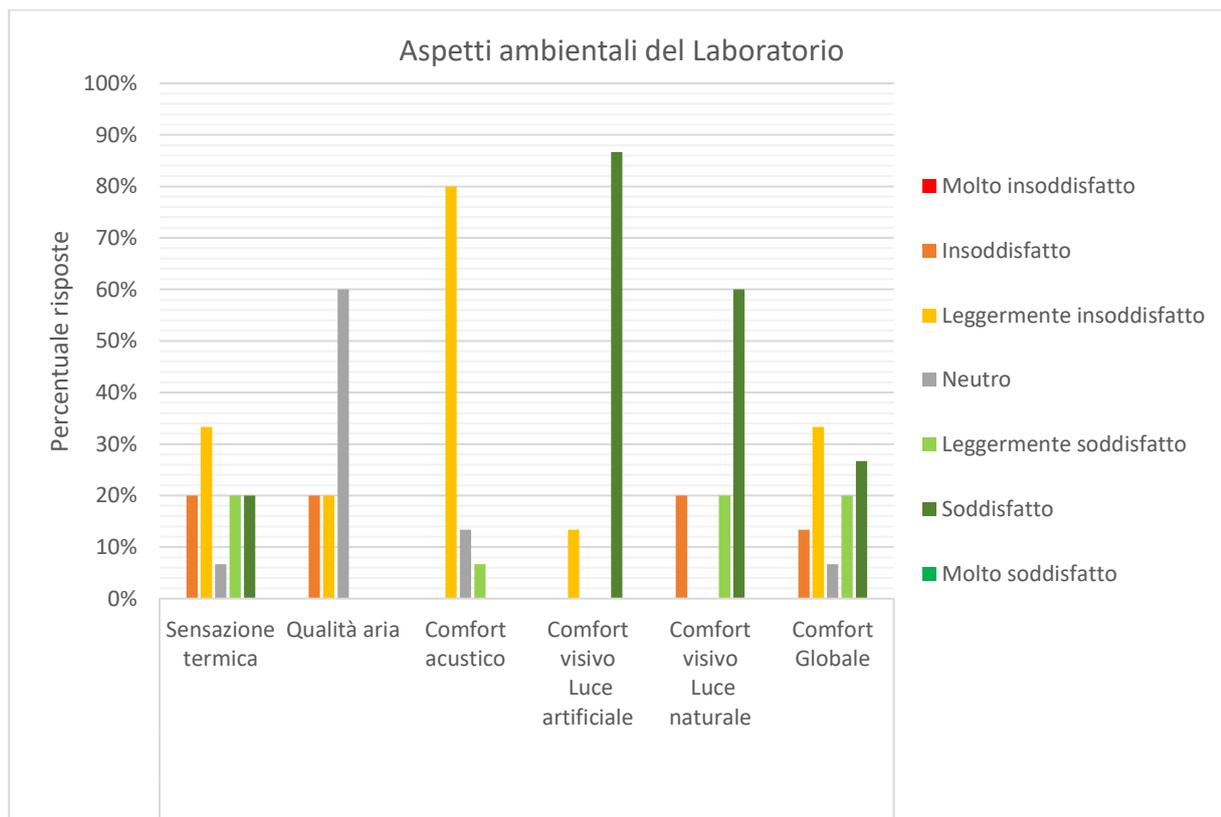


Figura 3.4.3 aspetti ambientali Laboratorio

Domande sul grado di soddisfazione con codice da T1 a T8 del questionario trasversale.

Nel Grafico 3.4.4 si è deciso di dare una rappresentazione media annuale del dato, andando a valutare tutti gli aspetti ambientali.

In generale l'Ufficio Rumore presenta delle risposte più distribuite per i vari tassi di soddisfazione, questo implica che i vari occupanti hanno una diversa percezione dell'ambiente.

Per quanto concerne gli aspetti ambientali più nello specifico, l'ufficio Rumore è l'unico ambiente in cui si individuano delle criticità relative al comfort visivo, con una percentuale superiore al 30% di utenti insoddisfatti. Il comfort termico risulta il parametro meno problematico (dato in contrasto con quanto rilevato negli altri due ambienti), con il 66% di utenti che si reputano soddisfatti o neutri.

Dalla risposta sulla soddisfazione rispetto alla qualità dell'aria vediamo che, mediamente, nell'anno vi è una percentuale pressoché uguale sia di soddisfatti che degli insoddisfatti, con una percezione dell'ambiente diversificata per gli occupanti.

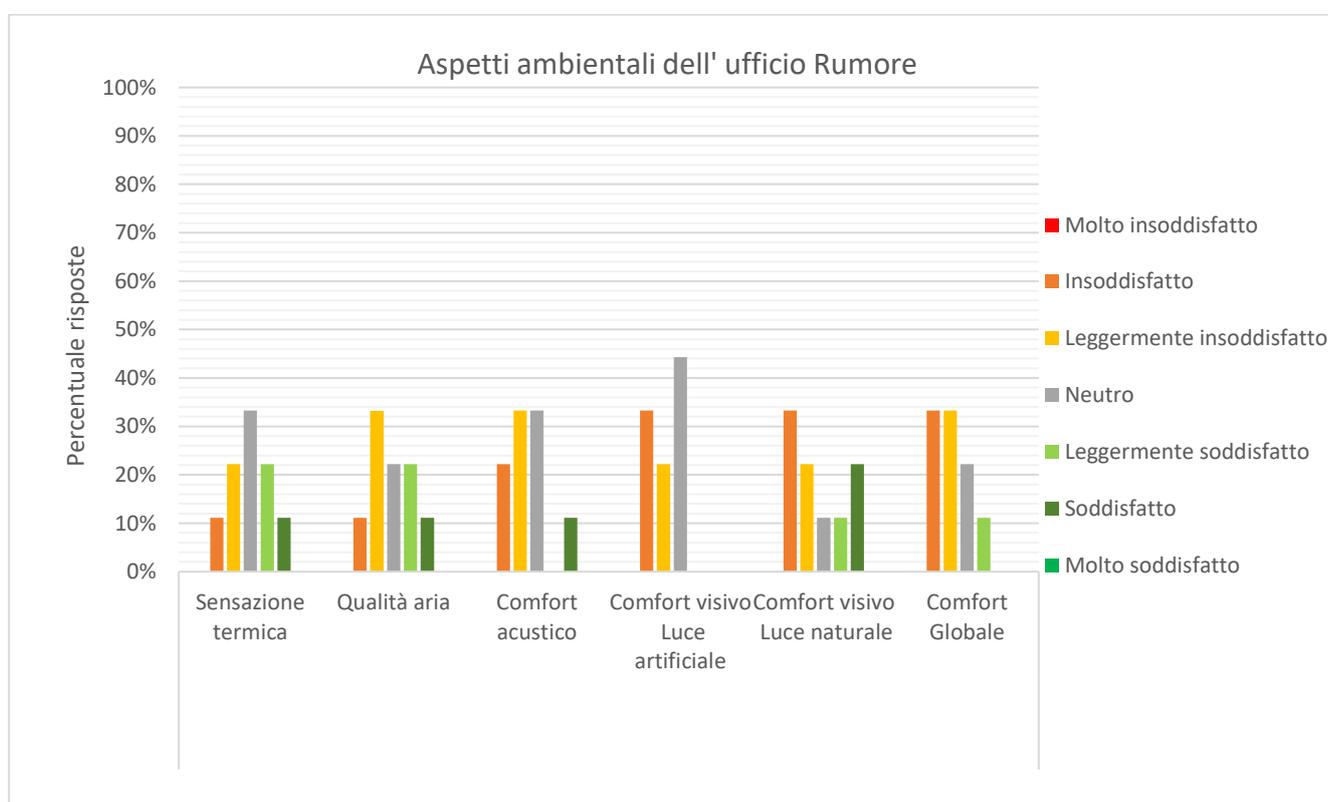


Figura 3.4.4 aspetti ambientali Laboratorio

Domande sul grado di soddisfazione con codice da T1 a T8 del questionario trasversale.

Nel Grafico 3.4.5 sono riportate le risposte alla domanda sulla differenza di soddisfazione (in termini di comfort globale) tra estate e inverno. In particolare, si può evidenziare che in tutti e tre gli ambienti è pressoché identica la percentuale di risposta degli occupanti.

Inoltre, risulta che nel Laboratorio il 40% delle persone si ritiene leggermente insoddisfatta, nell'ufficio NIR la maggior parte si ritiene soddisfatta sia in estate che in inverno e nell'ufficio Rumore il 66,6% sono insoddisfatti.

L'indice di comfort globale è il dato più indicativo delle condizioni generali dell'ambiente, possiamo quindi affermare tramite questo grafico che le differenze globali di comfort tra inverno ed estate non sono significativamente differenti.

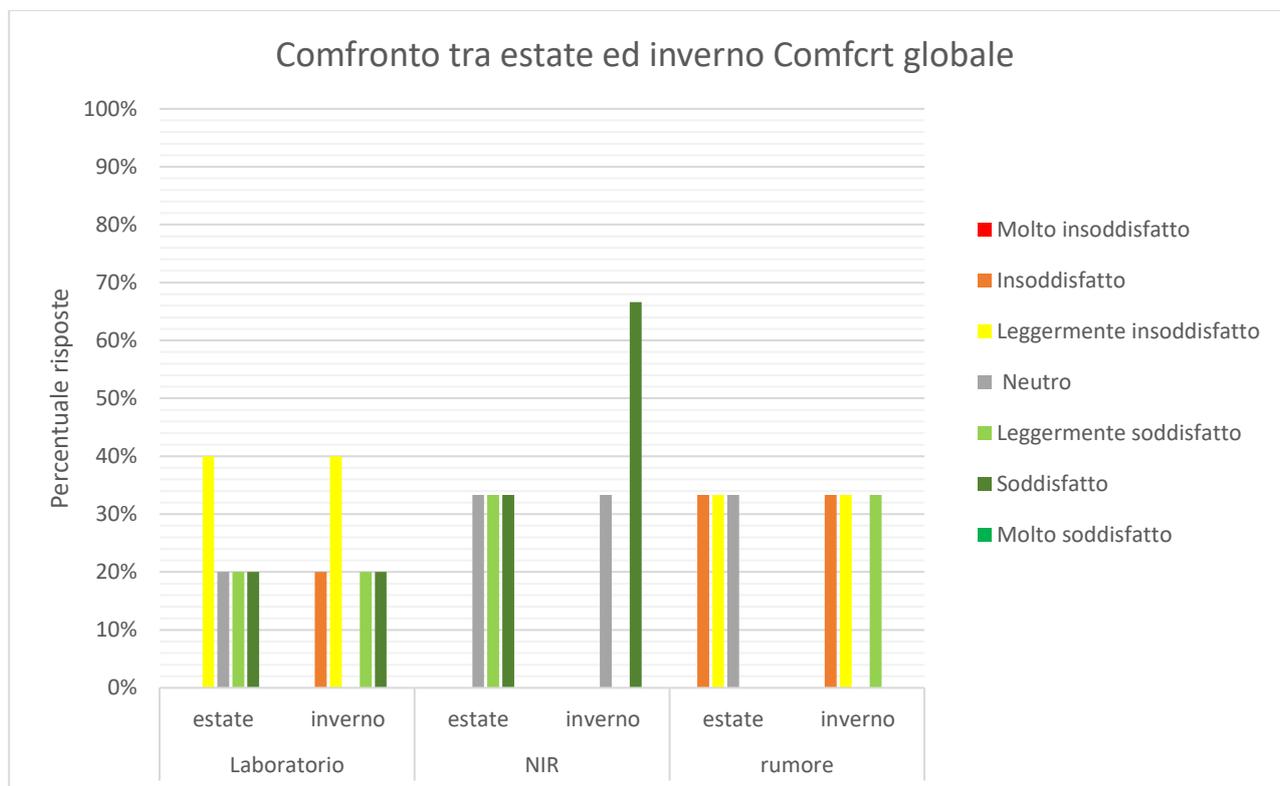


Figura 3.4.5 Confronto tra estate e Inverno del comfort globale

Domanda sul grado di soddisfazione con codice T8 del questionario trasversale.

## Questionario longitudinale

Le **Prime due sezioni** del questionario danno delle informazioni di carattere generale e le informazioni che gli utenti forniscono al momento della compilazione del questionario come, ad esempio, il loro abbigliamento.

Nella tabella 3.4.3 si riassumono per ogni questionario le informazioni delle prime due sezioni. Per semplicità, la tabella riporta dei risultati sintetici tramite percentuali e medie dei dati.

L'isolamento del vestiario medio misurato in Clo è stato calcolato andando a sommare le singole resistenze termiche d'abbigliamento indicate dagli intervistati, prendendo il valore dall'allegato della ISO 7730.

Per riassumere le informazioni relative agli oscuranti, alle luci, alle finestre e al sistema di condizionamento, è stata inserita la risposta che ha ottenuto più voti, tra parentesi è stata inserita la percentuale associata.

Non è stato inserito nella tabella il dato rispetto alla percentuale di fumatori e alla percentuale di chi soffre di problemi respiratori, in quanto è pari al 0% in entrambi i casi.

Tabella 3.4.3 dati generali al momento della compilazione

Settimana 1						
Ambienti	Ufficio Rumore		Ufficio NIR		Laboratorio	
Giorno	Lunedì 17/08/2020		Martedì 18/08/2020		Mercoledì 19/08/2020	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Numero intervistati	3	3	2	2	2	2
tasso risposta	100%	100%	100%	100%	100%	100%
età media	51	51	50	50	50	47
% maschile	100%	100%	100%	100%	50%	50%
Isolamento medio vestiario [clo]	0,25	0,25	0,21	0,21	0,39	0,38
Le luci nell'ambiente sono accese?	Si (100%)	No (100%)	Si (100%)	No (100%)	Si (100%)	Si (100%)
Le finestre sono aperte?	Si (100%)	No (100%)	Si (100%)	Si (100%)	Si (67%)	No (100%)
Le finestre degli schermi (tende, tapparelle, ecc.) abbassati?	No (100%)	No (100%)	No (100%)	No (100%)	Si (100%)	Si (100%)
Il sistema di condizionamento è in funzione?	No (100%)	No (100%)	No (100%)	No (100%)	Si (100%)	Si (100%)
Settimana 2						
Ambienti	Ufficio NIR		Laboratorio		Ufficio Rumore	
Giorno	Lunedì 24/08/2020		Martedì 25/08/2020		Mercoledì 26/08/2020	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Numero intervistati	2	2	3	2	3	2

tasso risposta	100%	100%	100%	100%	100%	100%
età media	50	50	47	50	51	52
% maschile	100%	100%	33%	50%	100%	100%
Isolamento medio vestiario [clo]	0,21	0,21	0,42	0,42	0,25	0,2
Le luci nell'ambiente sono accese?	Si (100%)	No (100%)	Si (100%)	Si (100%)	Si (100%)	No (100%)
Le finestre sono aperte?	Si (100%)	Si (100%)	No (67%)	No (100%)	Si (100%)	Si (100%)
Le finestre hanno degli schermi (tende, tapparelle, ecc.) abbassati?	No (100%)	No (100%)	No (67%)	No (50%)	No (100%)	No(100%)
Il sistema di condizionamento è in funzione?	No (100%)	No (100%)	Si (100 %)	Si (100 %)	No (100%)	No (100%)
	<b>Settimana 3</b>					
Ambienti	<b>Laboratorio</b>		<b>Ufficio Rumore</b>		<b>Ufficio NIR</b>	
Giorno	<b>Lunedì 31/08/2020</b>		<b>Martedì 01/09/2020</b>		<b>Martedì 01/09/2020</b>	
	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Pomeriggio</b>	<b>Mattino</b>	<b>Pomeriggio</b>
Numero intervistati	3	3	3	3	2	2
tasso risposta	100%	100%	100%	100%	100%	100%
età media	45	45	51	51	50	50
% maschile	33%	33%	100%	100%	50%	50%
Isolamento medio vestiario [clo]	0,46	0,46	0,25	0,25	0,41	0,41
Le luci nell'ambiente sono accese?	Si(100%)	Si (100%)	Si (100%)	No (100%)	Si (100%)	No (100%)
Le finestre sono aperte?	No (100%)	No(100%)	Si (100%)	No (100%)	Si (100%)	Si (100%)
Le finestre hanno degli schermi (tende, tapparelle, ecc.) abbassati?	Si (66%)	Si (66%)	No (100%)	No (100%)	No (100%)	No (100%)
Il sistema di condizionamento è in funzione?	Si (100%)	Si (100%)	No (100%)	No (100%)	No (100%)	No (100%)

Di seguito sono riportate le risposte alle domande relative alle **sezioni di sintesi** che nel questionario sono posizionate in fondo con i rispettivi codici **L13** e **L14**.

Il seguente grafico 3.4.5 fornisce un'informazione riassuntiva sulle condizioni di comfort ambientale durante le 3 settimane di misure puntuali, andando a valutare cosa emerge dai questionari rispetto alla condizione generale sul Comfort termico, acustico, visivo, globale e la qualità dell'aria.

Il grafico rappresenta la domanda sulla **percezione** (codice **L13**) esprimendo la valutazione media soggettiva degli aspetti legati al comfort e alla qualità dell'aria, con la seguente scala di valutazione a 5 punti:

- 1. Molto bassa
- 2
- 3
- 4
- 5. Molto elevata

Il Laboratorio presenta una valutazione legata alla qualità dell'aria, al comfort acustico ed a quello globale non raggiungendo la valutazione 3 che molti studi hanno ritenuto essere una considerazione discreta [14].

L'ufficio NIR invece in tutte le grandezze ha la media voto più alta. Il dato che colpisce maggiormente è quello relativo al comfort globale considerato che risulta l'unico ambiente a raggiungere una buona valutazione (vicina al voto 4).

L'ufficio Rumore risulta quello con i voti medi meglio distribuiti dove per ogni parametro si registra un voto pari a circa 3, si evidenziano essere leggermente sotto la media gli aspetti legati al comfort visivo ed acustico.

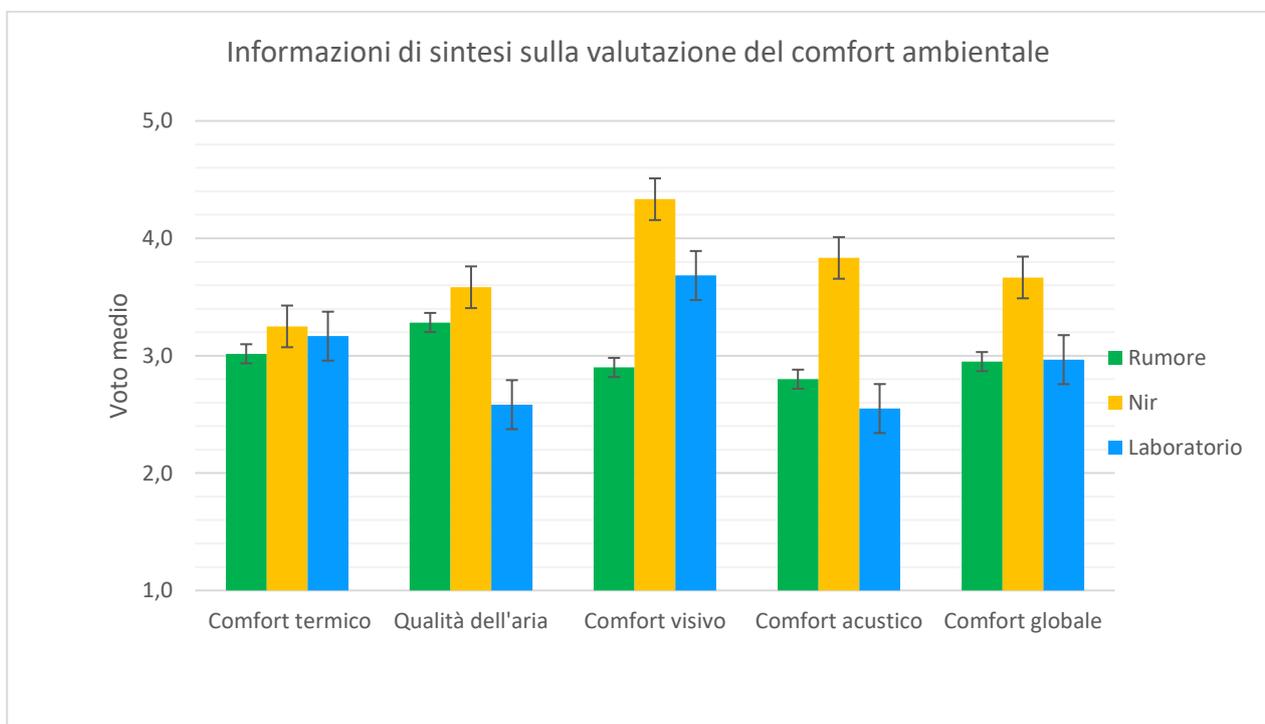


Figura 3.4.6 Informazioni di sintesi sulla valutazione del comfort ambientale

Domanda: Come consideri il comfort ambientale nell'ambiente di lavoro?

Codice **L13**

La risposta alla seconda domanda sulla **sezione di sintesi** viene riportata nel grafico 3.4.7. Anche qui si vuole dare un'informazione riassuntiva sull' **Importanza** (codice **L14**) che si attribuisce a ogni aspetto ambientale valutato in precedenza, rappresentando il dato tramite un valor medio riferito alla seguente scala di valutazione a 5 punti:

- 1. Molto bassa
- 2
- 3
- 4
- 5. Molto elevata

Generalmente dai questionari emerge che ogni aspetto del comfort globale risulta importante per gli occupanti di ogni ufficio e che la grandezza a cui si dà più rilevanza è il comfort visivo.

Il Laboratorio è l'ambiente in cui a tutti gli aspetti del comfort viene conferita una grande importanza in particolare la qualità dell'aria raggiunge un voto medio pari a 4,8 su 5. Nell' ufficio NIR invece risulta essere il comfort termico l'aspetto più importante per gli occupanti, inoltre tutti gli altri aspetti ricevono un voto medio superiore a 4 punti su 5.

L'ufficio Rumore infine risulta essere l'ambiente nel quale gli occupanti danno meno rilevanza ai vari aspetti del comfort ambientale. Per la qualità dell'aria si registra il voto più basso pari a 3 su 5.

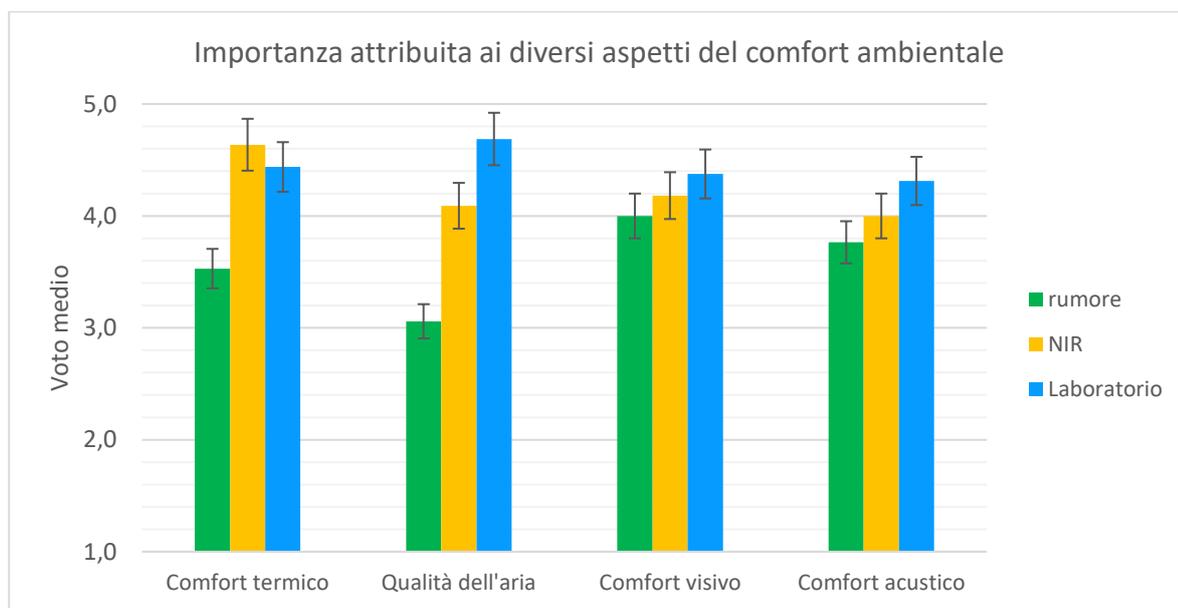


Figura 3.4.7 Importanza attribuita ai diversi aspetti del comfort ambientale

Domanda: Quale importanza che attribuisce ai diversi aspetti del comfort ambientale?

Codice **L14**

## Comfort termico

Le prime domande della sezione termica sono state poste agli intervistati per conoscere se percepiscono discomfort locale dovuto alle correnti d'aria fastidiose **codice L4** nella loro postazione di lavoro e se reputano le pareti dell'ambiente particolarmente calde o fredde **codice L6**.

Si riporta in seguito la percentuale totale delle risposte:

Gli utenti hanno percepito pareti particolarmente calde o fredde solo nel 5 % dei casi mentre la presenza di correnti d'aria fastidiose si è registrata nell' 11% delle risposte.

Dal grafico 3.4.8 si vuole evincere le condizioni di tollerabilità riferita alla domanda sull' **Accettabilità termica L1** per evidenziare le mattine ed i pomeriggi delle giornate che sono risultate non accettabili per alcuni occupanti. Sono quindi stati rappresentati i soli giorni delle misure puntuali e i soli ambienti che hanno generato una criticità.

Quindi di seguito è solo rappresentato l'ufficio Rumore in quanto gli utenti dell' ufficio NIR e del Laboratorio si sono sempre trovati in condizioni tollerabili, con un dato dell'accettabilità termica pari al 100%.

Nell'ufficio Rumore un individuo su tre ha ritenuto che in tutti i pomeriggi durante le misure puntuali la condizione ambientale non fosse accettabile.

Inoltre, questo grafico evidenzia l'importanza della soggettività di ogni individuo in quanto nelle condizioni di medesimo spazio occupato, un utente può sentirsi completamente a proprio agio mentre un altro può considerare non accettabile quella condizione della temperatura e non essere a proprio agio nell'ambiente di lavoro.

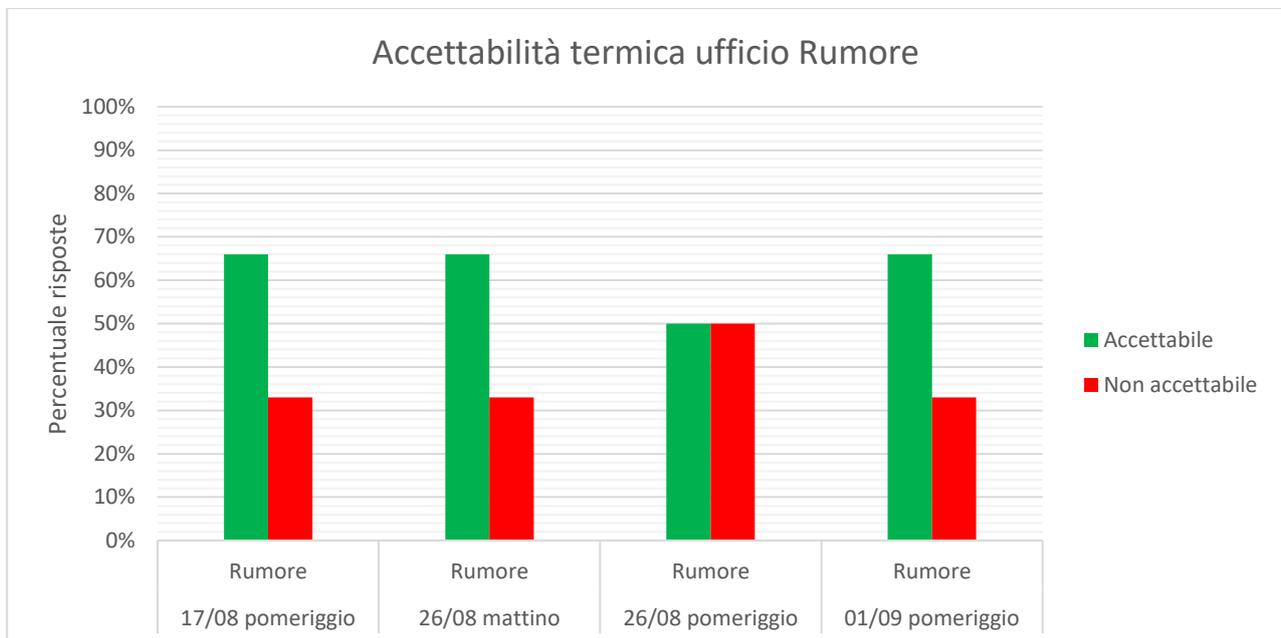


Figura 3.4.8 Criticità termica Ufficio Rumore

Domanda: Consideri la condizione termica dell'ambiente accettabile o no?

Codice L1

Il grafico 3.4.9 raffigura le risposte pervenute dalla domanda **L2** sulla **preferenza** espressa dagli utenti sulla condizione ambientale. Si sono rappresentate le percentuali di risposta rispetto all'intera giornata di misure, confrontando così i vari ambienti.

In generale si può evincere che la maggior parte degli utenti non avrebbe apportato nessun tipo di cambiamento termico.

Nel Laboratorio il giorno 19/08 gli utenti prediligono un ambiente più freddo mentre i giorni restanti sono in condizioni di neutralità termica.

L'ufficio Rumore, per ogni giorno, ha valutato una buona percentuale di utenti che preferirebbero un ambiente più freddo. Questo trova riscontro nel grafico 3.4.8.

La maggioranza degli occupanti l'ufficio NIR non apporterebbe nessun cambiamento all'ambiente per ogni giorno valutato. Inoltre, per ogni giorno, dal 25% delle risposte emerge che si preferirebbe un locale più fresco.

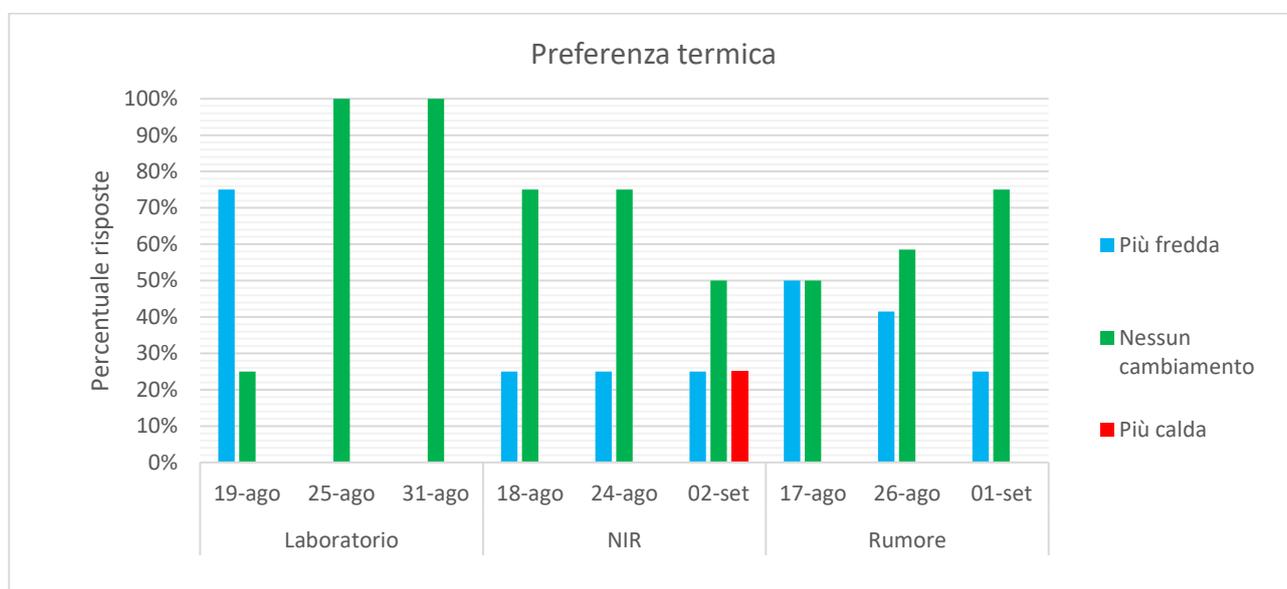


Figura 3.4.9 Preferenza termica

Domanda: Preferiresti una condizione termica dell'ambiente più calda, più fredda o nessun cambiamento?

Codice **L2**

Anche nel grafico 3.4.10 si rappresenta il dato giornaliero dei vari ambienti, in questo caso si riportano le risposte alla domanda sulla **percezione codice L5** di umidità dell'aria.

In tutti gli ambienti gli occupanti hanno percepito principalmente un'umidità dell'aria ragionevole quindi né secca né umida.

Nel Laboratorio un terzo degli occupanti nelle prime due settimane ha ritenuto che l'aria fosse troppo secca. Mentre nell'ufficio NIR e Rumore la prima settimana alcuni utenti percepiscono un ambiente piuttosto umido.

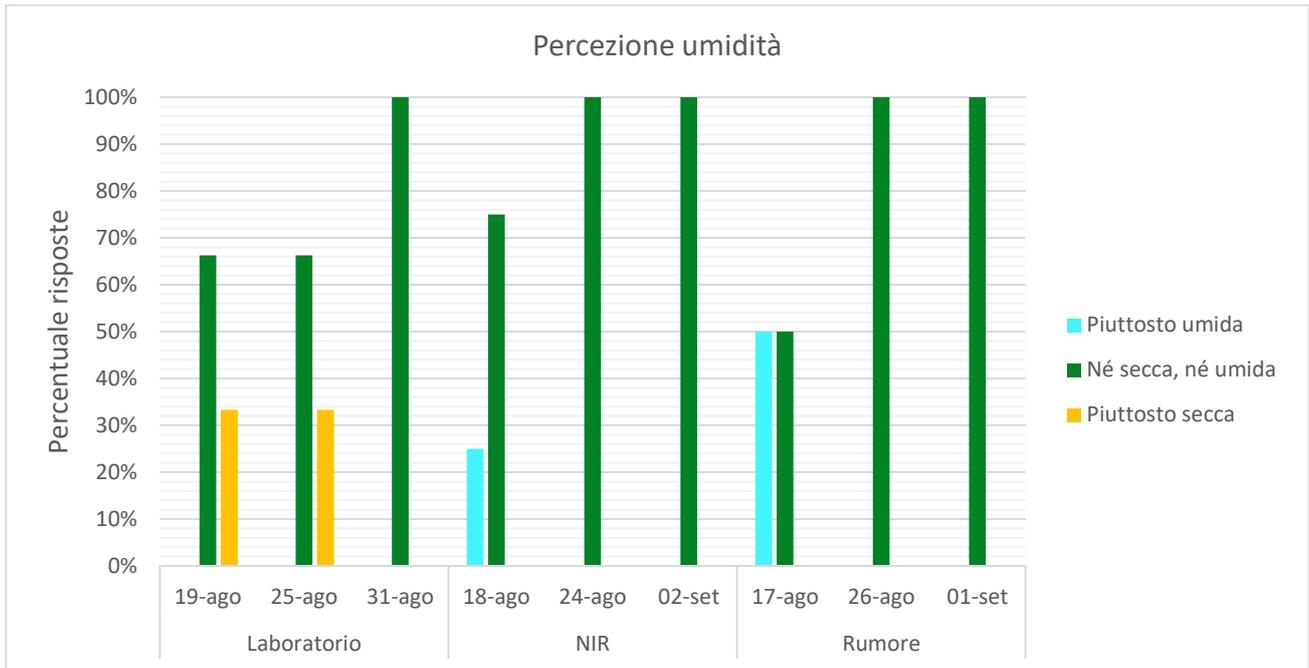


Figura 3.4.10 Percezione umidità

Domanda: Come percepisci l'aria in relazione alla sua umidità?

Codice L5

Nell'ambito della valutazione soggettiva della sensazione termica, si vuole dare una rappresentazione dettagliata sulla **percezione** termica per ogni ambiente.

La domanda a cui si riferiscono i grafici è la domanda sulla percezione termica con **codice L3**. Il dato è rappresentato tramite un voto basato sulla scala cromatica di riferimento a 7 punti.

A differenza degli altri grafici proposti nel capitolo dei risultati, dove si esprime il dato a livello dell'intera giornata, nei grafici 3.4.11-13 i dati sono espressi a rispetto alle mattine ed ai pomeriggi delle rispettive giornate di misure puntuali.

La sensazione percepita dagli occupanti è risultata complessivamente diversa tra i vari ambienti e fortemente dipendente dallo specifico momento della giornata.

Inoltre sia l'Ufficio NIR che l'Ufficio Rumore possiedono due analogie: la prima è che non vi è un impianto di condizionamento attivo e quindi, questo aspetto, influenza la sensazione termica percepita dagli occupanti, la seconda è che i grafici di percezione seguono un profilo simile durante le 3 settimane. Quest'ultima analogia a mio avviso è legata all'andamento delle condizioni termiche interne di entrambi gli uffici con le condizioni climatiche esterne. Infatti nel pomeriggio dove l'ambiente è risultato più caldo i valori di sensazione termica percepita espressa come voto medio sono aumentati oltre il +1.

### Ufficio NIR

L'ufficio NIR presenta nel Grafico 3.4.11 una situazione strettamente dipendente dallo specifico momento della giornata. Il giorno 18/08 e il 24/08, al mattino, tutti gli utenti hanno percepito un ambiente neutro, mentre nei pomeriggi gli utenti si sono divisi sul fatto che l'ambiente risultasse Leggermente caldo o Troppo caldo, percependo probabilmente una situazione totale di discomfort. L'ultima settimana è risultata meno calda delle prime due sia al mattino che al pomeriggio.

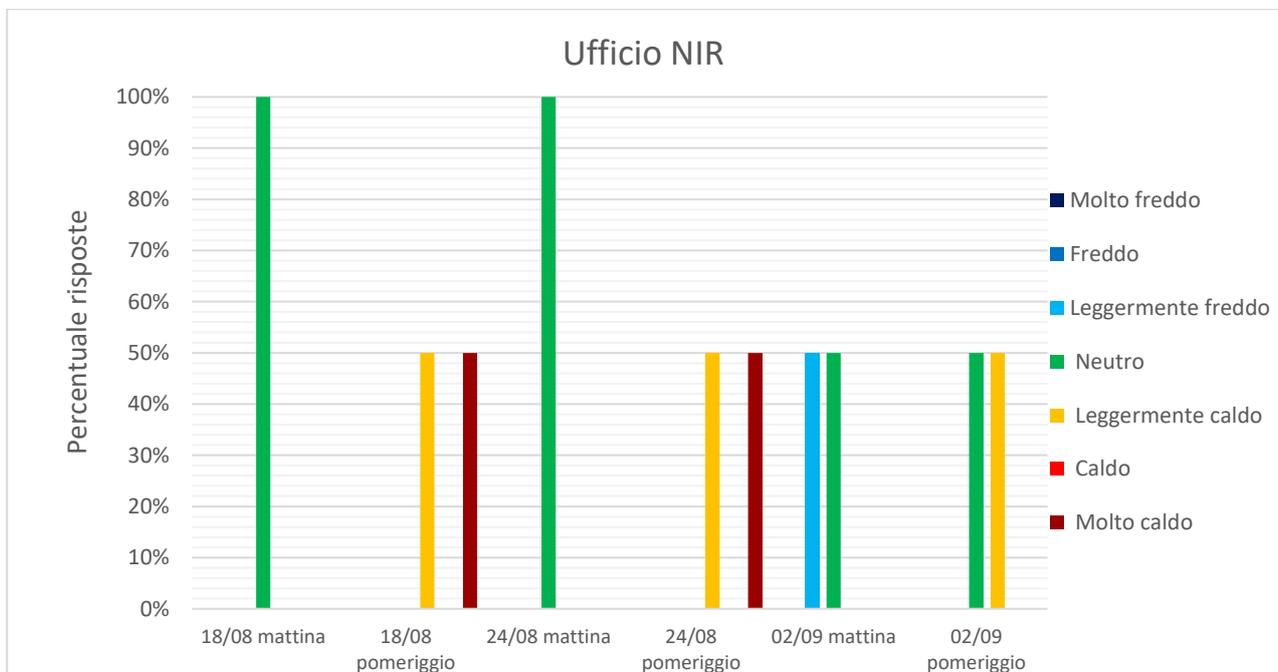


Figura 3.4.11 Percezione termica Ufficio NIR

Codice L3

## Ufficio Rumore

La percezione termica dell'Ufficio Rumore è rappresentata nel Grafico 3.4.12. Come per l'ufficio NIR la sensazione termica percepita dipende fortemente dalla settimana e dal momento della giornata a cui ci si riferisce.

Le mattine risultano meno calde del pomeriggio dove in quest' ultimo nelle prime 2 settimane abbiamo sempre almeno il 50% degli occupanti che ritiene l'ambiente caldo o Leggermente caldo.

Da questo grafico inoltre emerge il peso del fattore soggettivo, in quanto all'interno dello stesso ufficio il giorno 17/08, sia al mattino che nel pomeriggio, e il giorno 26/08, nella mattina, la percezione varia molto tra gli occupanti. In particolare, abbiamo 2 utenti che, pur essendo soggetti alle medesime condizioni termiche, percepiscono una sensazione termica fortemente contrastante.

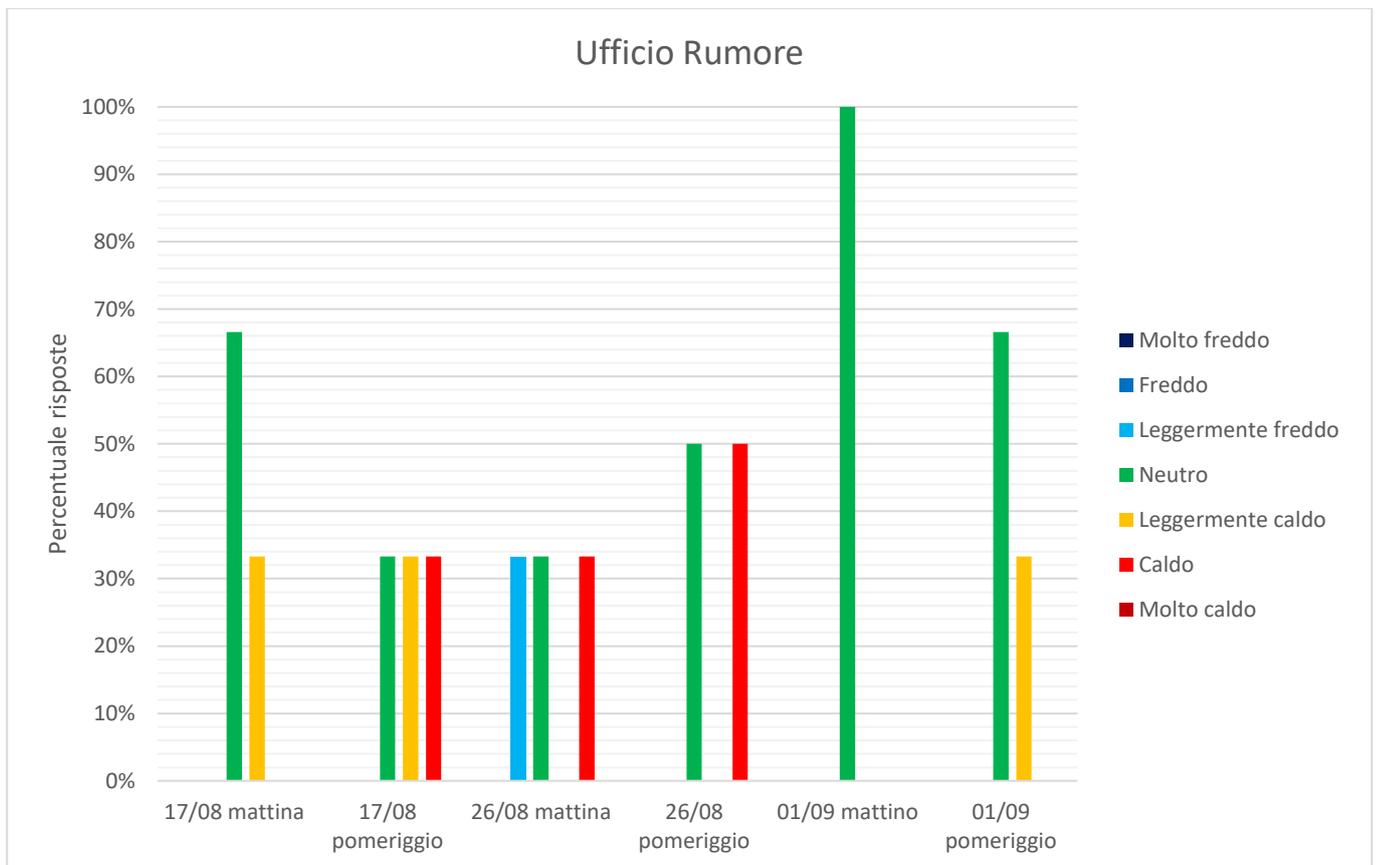


Figura 3.4.12 Percezione termica Ufficio Rumore

Codice L3

## Laboratorio

Il laboratorio presenta un sistema di condizionamento attivo durante tutta la durata della campagna misure.

Nel Grafico 3.4.13 risulta che l'ambiente è leggermente differente rispetto ai primi due: la percezione dell'ambiente risulta mediamente meno calda in tutte le 3 settimane. Il giorno 19/08 risulta generalmente Leggermente Caldo per la maggior parte degli occupanti, il giorno 25/08 si registra una condizione totale di neutralità termica sia al mattino che al pomeriggio mentre il giorno 31/08 è l'unico dove la maggioranza degli utenti ritiene l'ambiente Leggermente freddo. Anche qui si constata l'andamento decrescente di sensazione termica nelle 3 settimane.

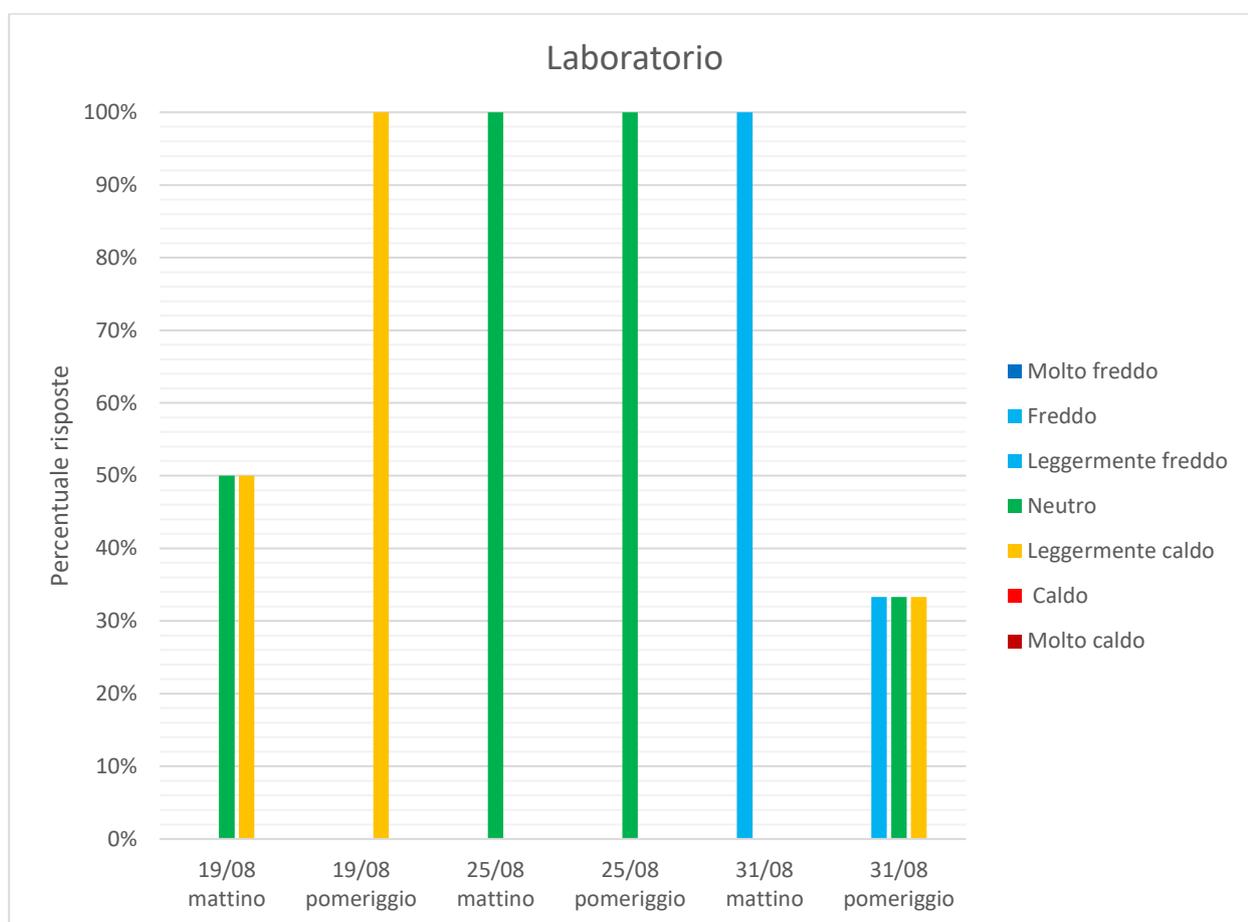


Figura 3.4.13 Percezione termica Laboratorio

Codice L3

## Comfort Acustico

In questa sezione si riassume in 2 grafici l'aspetto soggettivo legato al rumore percepito dagli occupanti. Il primo grafico 3.4.14 rappresenta la percentuale giornaliera registrata dai vari occupanti rispetto al livello di disturbo percepito. Nel secondo grafico 3.4.15 si rappresentano, negli stessi ambienti, i livelli d'intensità percepiti dalle diverse sorgenti. Questi due grafici sono confrontabili in quanto si può determinare mediamente nella giornata il livello di disturbo associandolo all'intensità di una sorgente.

Il Grafico 3.4.14 si riferisce alla domanda con **codice L12** con una scala d'intensità a 5 punti dove per un disturbo di tipo irrilevante si associa il valore 1 mentre il valore 5 quando il livello risulta essere forte.

Il grafico presenta un livello di disturbo parecchio variabile tra vari ambienti.

Nell'ufficio NIR abbiamo un disturbo che in tutti e tre i giorni risulta pressoché irrilevante, rendendo questo ambiente il meno disturbato.

L'ufficio Rumore risulta più disturbato per una parte degli occupanti, infatti il 17/08 e il 26/08 il 18% di risposte afferma che il disturbo è pari a 4 su 5.

Il Laboratorio risulta l'ambiente complessivamente più disturbato. Il 25/08 e il 31/08 più dell'80% degli occupanti reputa il livello di disturbo pari ad almeno 3 su 5 evidenziando, a livello soggettivo, una evidente presenza di un disturbo nell'ambiente.

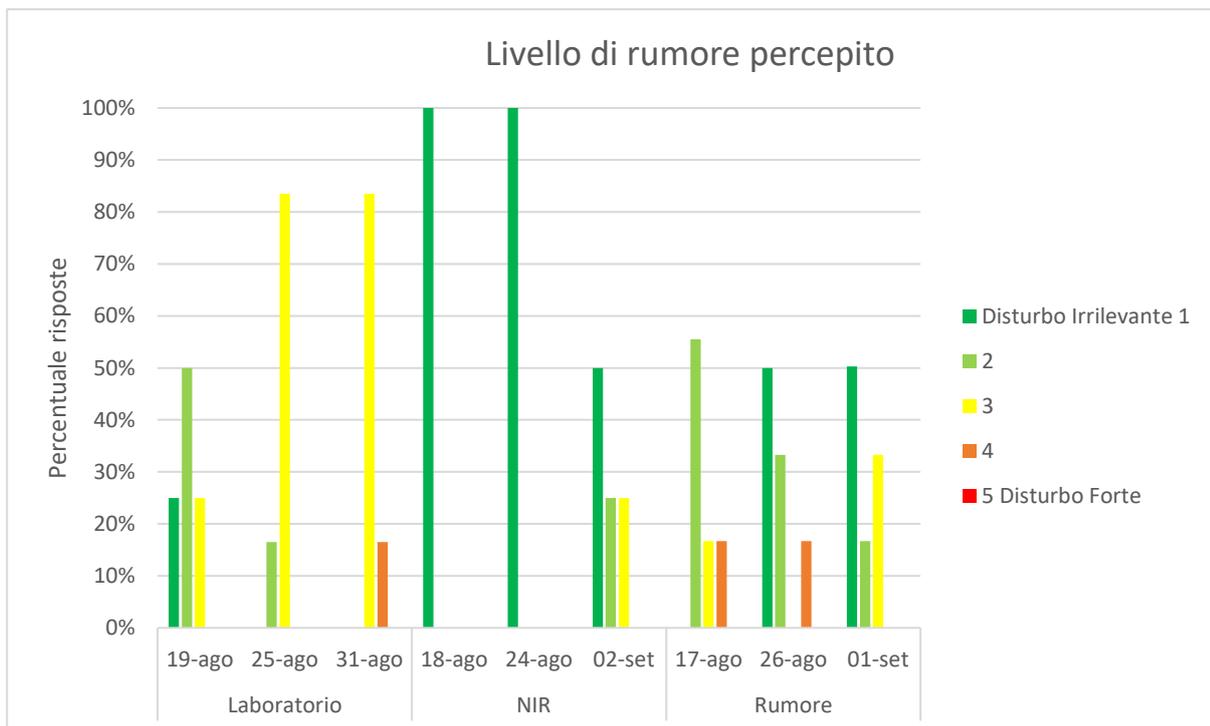


Figura 3.4.14 Livello di rumore percepito associato ad un disturbo

Domanda: Che disturbo ha causato il rumore presente nell'ambiente?

**Codice L12**

Nel Grafico 3.4.15 sono mostrati gli andamenti delle intensità associate ad una fonte rumorosa percepita dagli occupanti. Il dato è espresso dal voto medio giornaliero a cui sono associate delle barre di errore. La scala d'Intensità anche in questo caso è a 5 punti ed è così rappresentata:

1. Intensità Irrilevante

2

3

4

5. Intensità molto elevata

Il Laboratorio si conferma, anche in questo grafico, l'ambiente più rumoroso con livelli d'intensità nettamente superiori. La fonte di rumore principale risulta essere la strumentazione ed i macchinari presenti nell'ambiente lavorativo. Anche l'impianto di climatizzazione raggiunge notevoli valori d'intensità percepita.

L'Ufficio NIR, nei giorni 18/08 e 24/08 è associato per tutte le fonti ad un'intensità irrilevante, con un lieve crescita di intensità il 02/09.

Osserviamo, invece, che nell'Ufficio Rumore le fonti di disturbo sono rappresentate principalmente dalle persone che si muovono e parlano in corridoio.

In tutti gli ambienti le persone che parlano e si muovono negli uffici adiacenti non risultano generare una forte Intensità rumorosa come nel caso dal rumore dei computer, delle stampanti e dai rumori provenienti dall'esterno non dovuti al traffico automobilistico.

### **Correlazione**

I grafici mostrati in precedenza, il 3.4.14 e il 3.4.15, sono correlati fra loro ed è possibile estrapolare per ogni livello di intensità il relativo livello di disturbo che ne è derivato.

Andando a sintetizzare le più evidenti correlazioni emerse per entrambi gli ambienti, notiamo che nell'Ufficio NIR risulta che ai livelli di disturbo soggettivo pervenuti sia associato un basso livello d'intensità. Anche nell'ufficio Rumore si evince questa correlazione generale delle varie sorgenti di disturbo. Circa il 20% degli utenti nei giorni 17/08 e 26/08 hanno ritenuto che le persone che parlano nel corridoio generino un disturbo pari a 4 su 5 (dove a 5 è associato un disturbo forte).

Per il laboratorio, invece, la correlazione emersa è differente in quanto per livelli d'intensità molto elevati dovuti al funzionamento dei macchinari, il livello di disturbo risultante è stato pari a 3 su 5 (dove a 5 è associato un disturbo forte) per più dell'80% degli utenti. A livello d'intensità maggiore quindi è associato un disturbo minore rispetto a quello che accade nell'ufficio NIR e nell'ufficio Rumore.

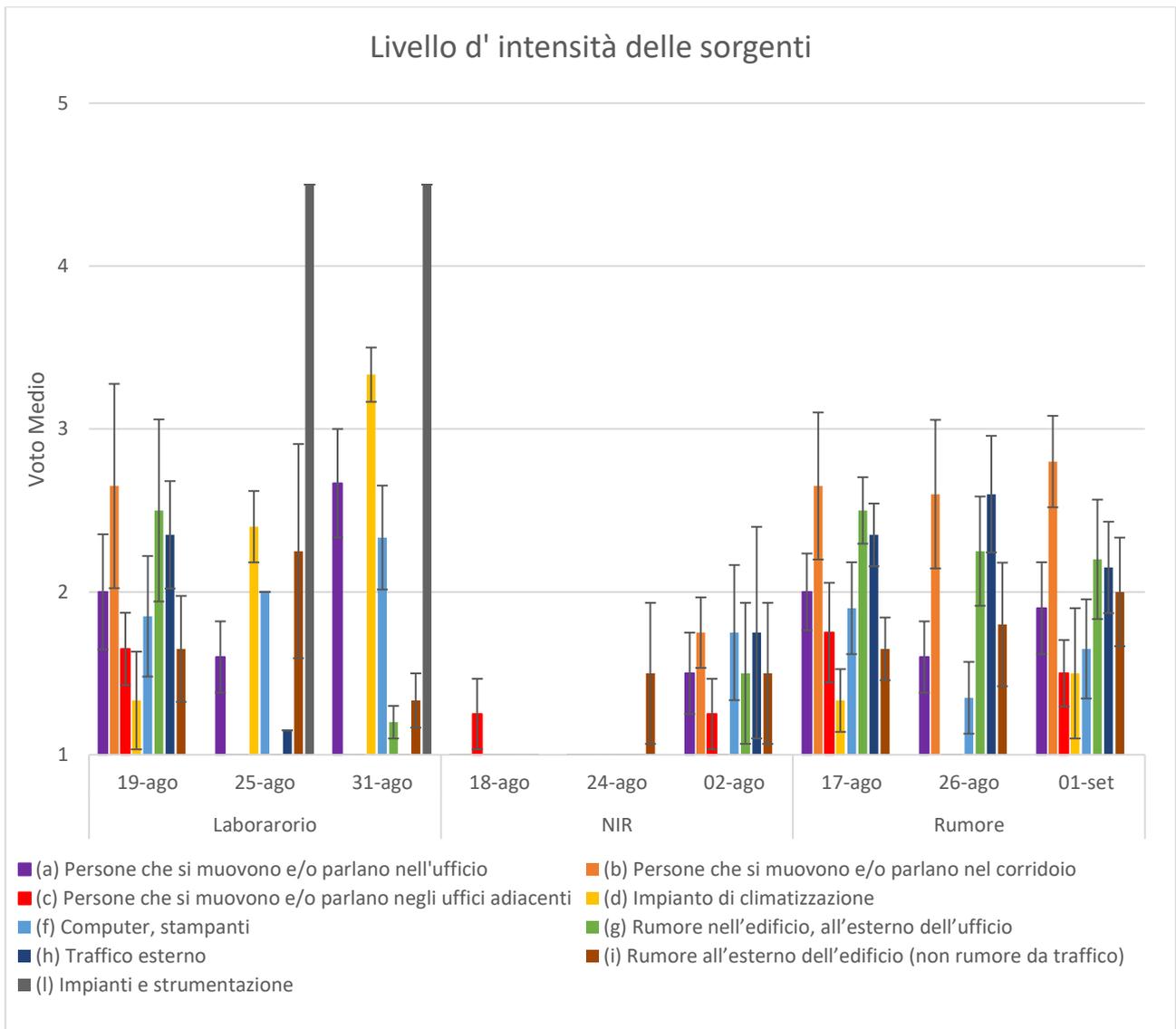


Figura 3.4.15 Livello d'intensità delle sorgenti:

Domanda: Valuta il livello di intensità dei rumori presenti nell'ambiente:

Codice L11

## Qualità dell'aria

Nella figura 3.4.16 viene rappresentato il dato relativo alla domanda sulla percezione olfattiva nei tre ambienti monitorati.

Tutti gli ambienti in generale non presentano alcuna criticità e si percepisce una qualità dell'aria più che buona.

L'ufficio NIR risulta avere il punteggio medio maggiore, infatti per tutti e tre i giorni delle analisi tutti gli utenti hanno espresso un voto pari a 4 su 5 (dove 5 risulta essere una percezione molto gradevole dell'aria).

IL Laboratorio non ha mai ricevuto voti inferiori a 3 su 5 con una valutazione media dei tre giorni pari a circa 3,4.

L'ufficio Rumore, infine, nei giorni del 17/08 e del 01/09 quasi il 20% delle risposte pervenute assegna un voto di 2 su 5 dove 1 è una percezione molto sgradevole dell'aria. Sui tre giorni si può dire che l'ambiente ha una valutazione media più che alta con un valore medio che si attesta intorno al 3,8 su 5.

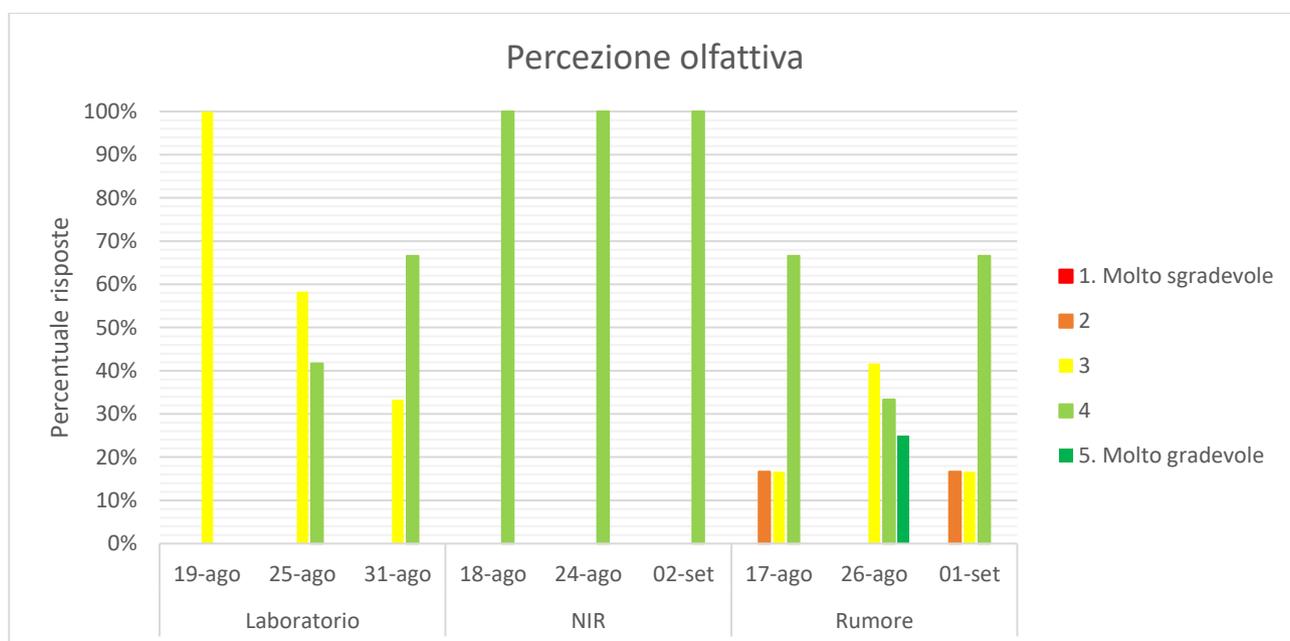


Figura 3.4.16 Percezione olfattiva

Domanda: Come percepisci l'odore dell'aria all'interni dell'ambiente?

Codice L7

Correliamo ora la percezione olfattiva con il fastidio che ne è risultato. Agli occupanti che nella domanda di percezione con **codice L7** hanno risposto con un voto inferiore o uguale a 3 su 5, si è chiesto di individuare l'origine della fonte di odore che ha portato a valutare negativamente la percezione olfattiva attraverso la domanda con **codice L8**. I grafici sono presentati separatamente ma sono strettamente collegati.

L'ufficio NIR non presenta dati in quanto viene sempre percepita una buona qualità dell'aria.

Negli altri due ambienti si sono identificate le seguenti fonti:

nel Laboratorio, il giorno 19/08 gli occupanti hanno percepito un fastidio molto elevato per gli odori di origine chimica (codice A) con un 50% di risposte superiori al voto 4 su 5, mentre il 25% degli utenti ha ritenuto fastidioso l'odore legato al corpo umano (codice B).

Il 25/08, sempre nel Laboratorio, oltre il 70% degli occupanti ha ritenuto che gli odori legati al corpo umano fossero molto sgradevoli, mentre il 31/08 sempre il 70% delle risposte ha valutato per gli odori di origine chimica generassero un fastidio molto elevato.

Nell' ufficio Rumore, invece, le percezioni olfattive emerse nel grafico 3.4.16 nel giorno 17/08 e nel giorno 26/08 non sono risultate delle fonti di odore particolarmente fastidiose, mentre per il 01/08 è emerso che il 100% degli occupanti ha valutato un fastidio pari a 3 su 5.

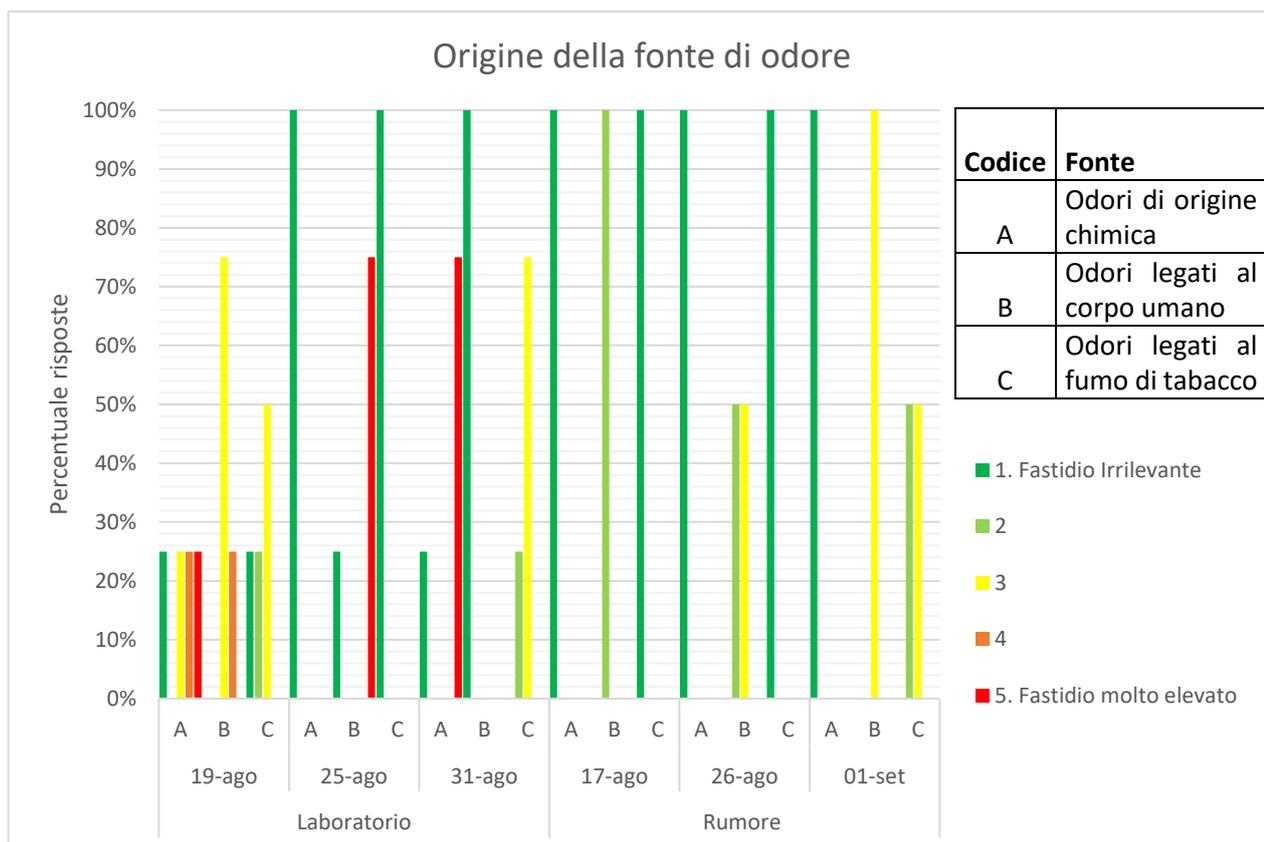


Figura 3.4.17 Origine della fonte di odore:

Domanda: Valutare l'origine della fonte di odore

**Codice L8**

## Comfort Luminoso

Di seguito è riportato il grafico riferito alla percezione delle sorgenti di luce che provocano un disturbo attraverso la domanda con **codice L10**.

Anche in questo caso nell'ufficio NIR non si rappresentano i dati in quanto per tutte e tre le sorgenti e per tutti e tre i giorni non risultano variazioni con un valore di disturbo pari a 3 su 5 nel 100% dei casi.

Nel Laboratorio abbiamo in più giorni più sorgenti che creano disturbi: Il 19/08 tutte e tre le sorgenti indicate nella legenda del grafico, creano un disturbo pari a 4 su 5 per almeno il 50% delle risposte, inoltre le superfici vetrate con schermi (codice C) sono ritenute disturbanti per il 25% degli occupanti. Il 25/08 il 50% delle persone ritiene che le superfici vetrate senza schermi sono disturbanti. Infine il 31/08 oltre il 60% delle risposte pervenute ritiene tutte e tre le sorgenti disturbanti.

Nell'ufficio Rumore il 40% delle risposte evidenziano che le superfici vetrate con schermi (codice C) arrecano un disturbo pari a 4 punti su 5, la percentuale massima viene raggiunta il 02/09 con il 66% delle risposte pervenute. Le apparecchiature di illuminazione artificiale (codice B) e le superfici vetrate senza schermi (codice A) arrecano in tutti i giorni monitorati un disturbo pari a 4 su 5 per il 40% delle risposte pervenute.

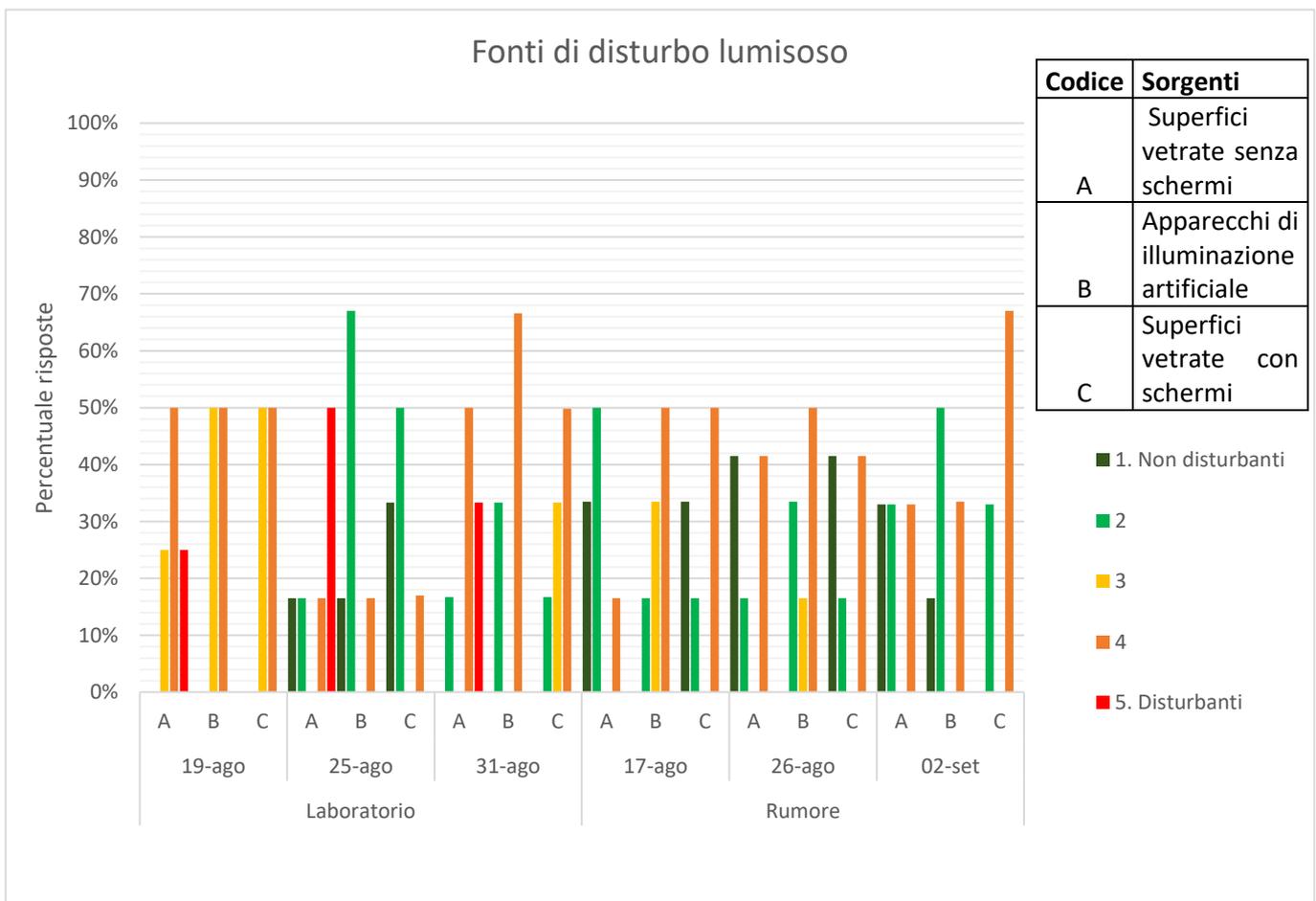


Figura 3.4.18 fonti di disturbo luminoso

Domanda: Come giudichi la luminosità delle seguenti sorgenti di luce e superfici presenti nell'ambiente in relazione al disturbo provocato?

**Codice L10**

Nella Figura 3.4.19 si fa riferimento alla domanda di percezione con **codice L9** sulla quantità di luce presente sul piano di lavoro.

In generale, in nessun ambiente viene mai percepita a livello soggettivo una quantità d'illuminamento insufficiente.

Nell'Ufficio NIR, per la maggior parte delle risposte, l'ambiente risulta con una luminosità leggermente eccessiva.

Nell'Ufficio Rumore si sono riscontrate delle percezioni diverse di valutazione luminosa dove il 17/08 e il 01/09 il 17% delle risposte pervenute indicano una scarsa luminosità (2 su 5) mentre negli stessi giorni si è registrata per almeno il 30% delle risposte una valutazione pari a 4 su 5.

Nel Laboratorio il giorno 31/08 l'illuminamento è risultato eccessivo per il 50% degli utenti, mentre gli altri giorni si è rilevato un valore pari a 3 su 5 nel 100% delle risposte.

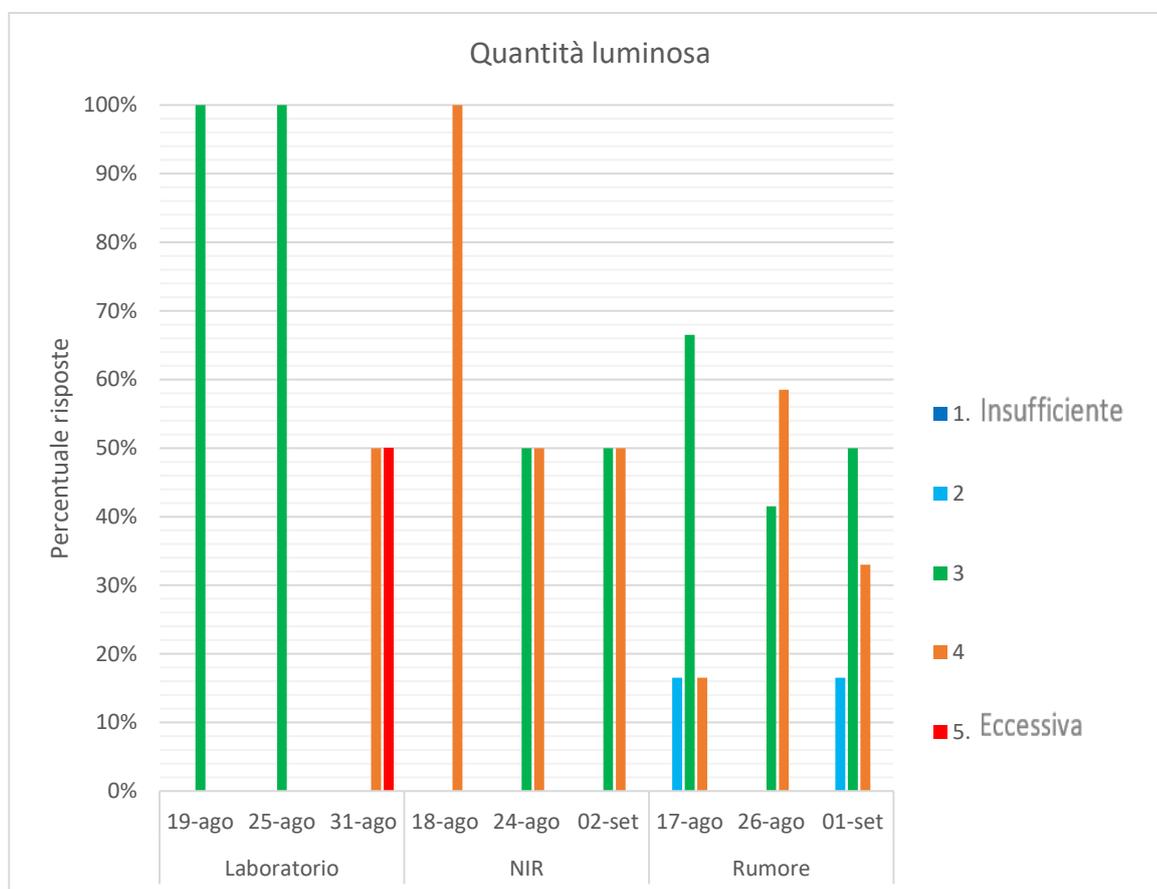


Figura 3.4.19 Quantità luminosa:

Domanda: Come giudichi la quantità di luce presente nel tuo tavolo di lavoro?

**Codice L9**

### 3.5 Correlazione Oggettivo Soggettivo

#### Comfort termico:

I seguenti grafici vogliono confrontare il dato sulla sensazione termica emersa dai questionari e la sensazione termica associata a due grandezze fisiche oggettive Temperatura e PMV.

Cerchiamo quindi una correlazione tra il **Voto medio** fornito dal questionario alla domanda sulla percezione **Codice L6** per ogni dato del mattino e del pomeriggio rapportato al **PMV** medio e alla **Temperatura** media misurati nelle mattine e nei pomeriggi delle giornate di misure puntuali.

Si ricorda che per visualizzare i due valori registrati corrispondenti allo stesso periodo temporale, ad ogni **voto medio** e ad ogni valore di **PMV** è stata associata la **Temperatura** interna media dell'ambiente. I due valori sono indicati sull'asse delle ordinate ed entrambe le grandezze si esprimono su una scala a 7 punti.

Inoltre, si è deciso di dividere i risultati in base al sistema di controllo della temperatura presente nei diversi ambienti. I laboratori, durante le misure puntuali, erano dotati di un sistema di raffrescamento attivo ed avevano inoltre la possibilità di aprire e di chiudere le finestre, mentre gli uffici non erano dotati di un sistema di controllo della temperatura attivo, andando esclusivamente ad agire sull'apertura delle finestre.

Se si va a tracciare una linea di tendenza per entrambi gli ambienti si può notare che per gli uffici c'è una notevole differenza tra il valore misurato tramite il PMV e il voto medio soggettivo, in particolare per temperature superiori ai 25°C.

Il PMV risulta essere molto conservativo ad alte temperature indicando un voto medio pari a +0,5 a 28,5°C mentre gli occupanti percepiscono una sensazione media pari a +1,5 alla medesima temperatura. A basse temperature la differenza tra le due rette di interpolazione diminuisce progressivamente, con il voto medio soggettivo che registra un valore medio pari a circa 0 tra i 25°C e i 23,5°C e il PMV che, per queste temperature, predice una sensazione termica che oscilla tra il -0,5 e il -1.

Il PMV in generale non risulta quindi adatto alla valutazione soggettiva negli uffici del nostro caso studio soprattutto a temperature superiori a 26°C.

In questo grafico per gli uffici risulta che il coefficiente di correlazione tra la temperatura interna e il voto medio soggettivo è pari  $r=0,87$  indice di una forte correlazione che è verificata dal fatto che il valore del Pvalue è approssimabile al valore di zero. Vi è quindi una forte correlazione statistica tra il voto medio soggettivo e la temperatura interna. Essa risulta essere quindi un buon indicatore da poter confrontare con il parametro soggettivo percepito negli uffici.

Sia per gli uffici che per i laboratori, come ci si poteva attendere, il PMV e la temperatura hanno un valore dell'indice  $R^2$  vicino 1 indicando una correlazione quasi perfetta.

Per il laboratorio, invece, la situazione è diversa: La differenza misurata tra il PMV e il voto medio soggettivo per ciascuna temperatura interna è al massimo di 0,6 °C quando nell'ambiente si registrano 21,5 °C.

L'indice PMV è quindi per i Laboratori un indicatore predittivo che rispecchia l'andamento della percezione degli occupanti, in particolare per temperature comprese tra i 24°C e i 25°C dove le linee di andamento si incrociano. Per temperature non comprese nell'intervallo precedente il PMV risulta essere troppo conservativo del comfort percepito in quanto a temperature superiori ai 25°C esso indica un voto pari a +0,5 mentre gli occupanti percepiscono un voto pari a +1. Stesso ragionamento per temperature inferiori ai 24°C dove il PMV predice un voto medio pari a -0,5 rispetto al voto -1 indicato dagli occupanti.

Anche qui la grandezza che meglio rispecchia l'andamento della percezione soggettiva risulta essere la temperatura che, come mostrato nel grafico 3.5.2, cresce linearmente con la percezione in quasi tutte le

misure effettuate. Inoltre, il coefficiente di correlazione tra il voto medio percepito e la temperatura è pari a  $r = 0,77$  risultando una correlazione meno forte rispetto agli uffici ma pur sempre ritenuta valida in quanto il Pvalue è pari a 0,026.

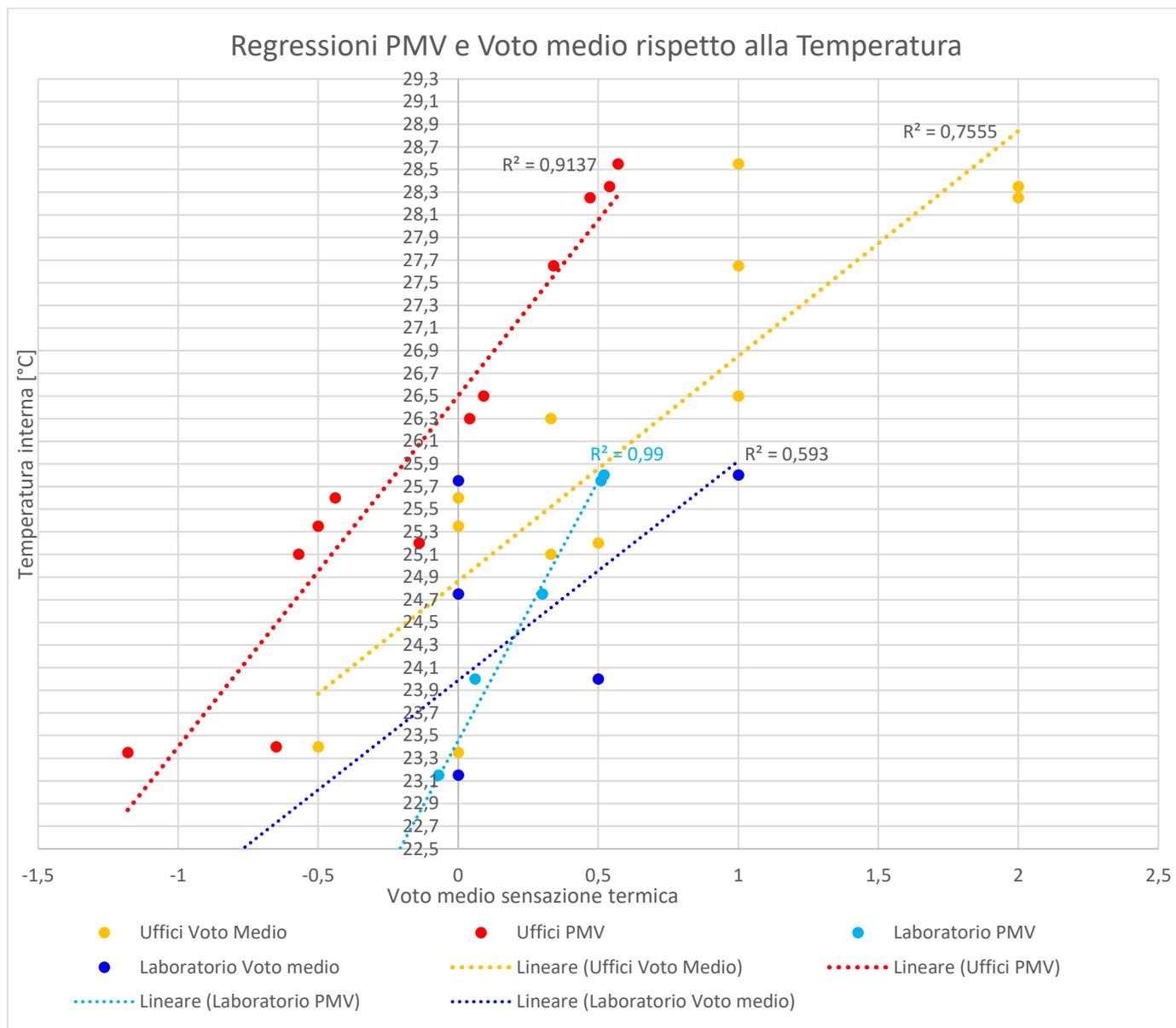


Figura 3.5.1 regressione negli uffici e nei Laboratori di PMV e Voto medio al variare della temperatura interna

Coefficiente di correlazione: per gli uffici  $r=0,87$  e per i laboratori  $r=0,77$

P value: per gli uffici  $p=0,00$  e per il laboratorio e per i laboratori  $p=0,026$

Nel grafico 3.5.2 si rappresenta la correlazione diretta tra il PMV e il voto medio soggettivo, distinguendo anche in questo caso gli uffici dai Laboratori. In questo caso il coefficiente  $R^2$  di correlazione risulta essere per entrambi gli ambienti inferiore rispetto a quelli valutati precedentemente con la temperatura.

Per gli uffici la retta di tendenza che inizia nel terzo quadrante del grafico e termina nel primo è spostata ben al di sotto dell'origine e attraversa il secondo quadrante. Questa posizione della retta conferma quello che è già stato detto nel grafico precedente in cui negli uffici per sensazioni percepite, che vanno da 0 a +0,8, dagli occupanti il PMV fa corrispondere sensazioni termiche predittive tra -0,5 a 0. Il PMV non risulta quindi rappresentare correttamente le sensazioni termiche percepite.

Per il Laboratorio la retta passa vicino all'origine, ma con un indice di determinazione pari a solo 0,53. Il PMV non rappresentano correttamente il voto medio soggettivo per i valori estremi di sensazione termica, come visto nel grafico precedente.

Il coefficiente di correlazione  $r$  per gli uffici è pari a 0,83 e 0,73 per i Laboratori, risultando comunque una buona correlazione tra i dati misurati

La Temperatura sia negli uffici che nel Laboratorio risulta quindi essere il parametro che meglio rappresenta il voto medio soggettivo, in quanto il coefficiente di correlazione è più forte sia per gli uffici che per i Laboratori.

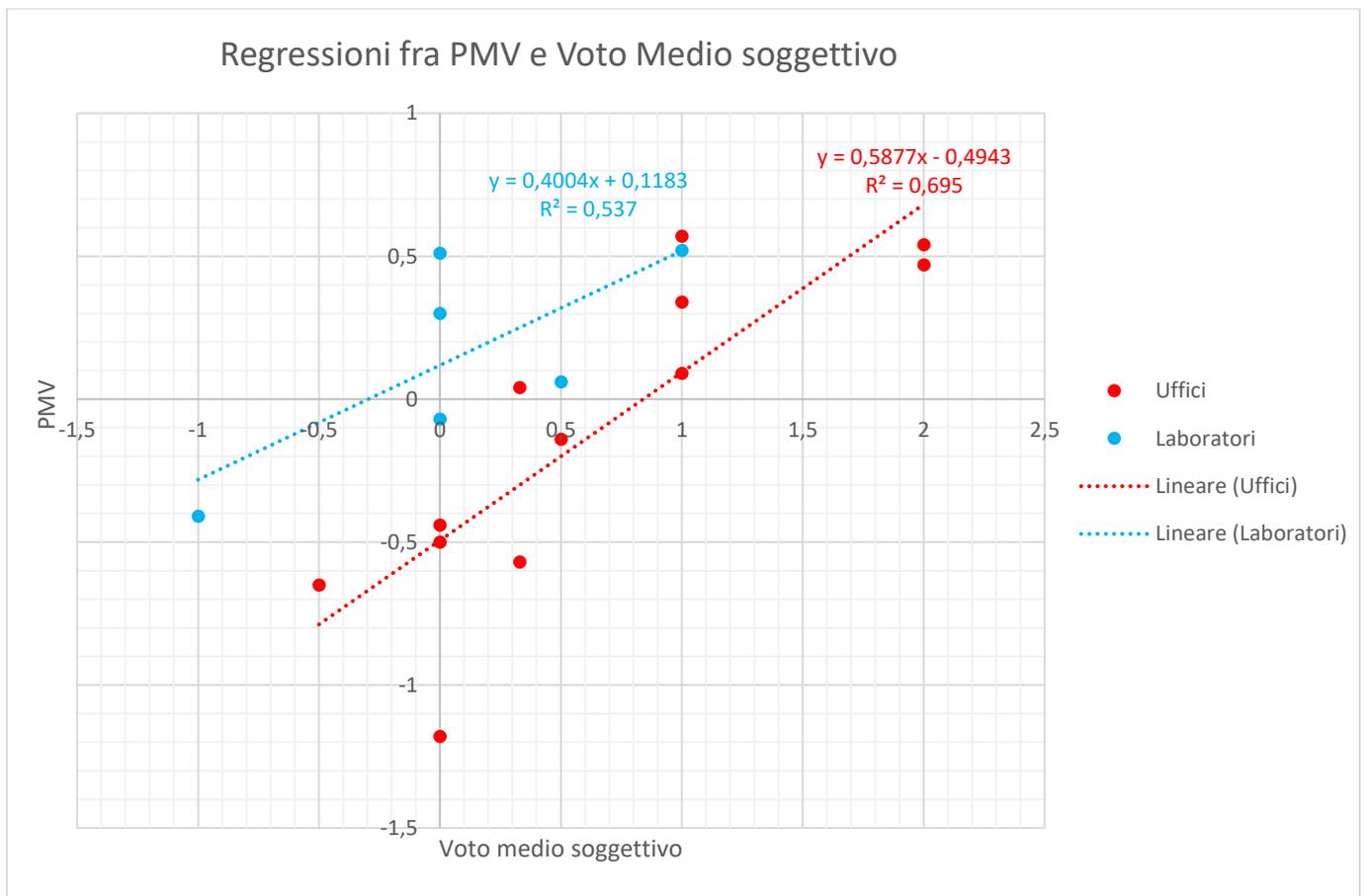


Figura 3.5.2 regressione nel Laboratorio PMV e PPD al variare della temperatura interna

Coefficiente di correlazione: per gli uffici  $r=0,83$  e per i laboratori  $r=0,73$

P value: per gli uffici  $p=0,00$  e per il laboratorio e per i laboratori  $p=0,028$

## metodo adattativo

Nel Grafico 3.5.3 sono rappresentati i **Voti medi** dei questionari con **codice L6** precedentemente valutati con il PMV ed ora correlati attraverso il metodo adattativo. Ogni voto medio soggettivo è stato inserito, per ogni valore del mattino e del pomeriggio, all'interno del grafico con la rispettiva temperatura operativa e la rispettiva Outdoor running mean temperature misurata in ambiente. Si mostra così in quali condizioni ci pone l'indice di comfort adattativo rispetto alla sensazione termica soggettiva.

Inoltre, come nei grafici precedenti, si sono divisi i dati degli uffici rispetto ai dati del Laboratorio. Dove per i primi risulta che tra l' Outdoor running mean temperature e il voto medio soggettivo vi sia un indice di correlazione  $r = 0,52$  con rispettivo P value  $p = 0,079$  e per i Laboratori un  $r = 0,53$  e  $p = 0,14$ . Questi ultimi valori del valore p indicano che la correlazione che si va a mostrare non è significativa per nessuno dei due ambienti.

Possiamo notare che le sensazioni termiche con voto medio pari a +2 e +1 sono principalmente nella parte alta del grafico, vicino al limite superiore della categoria 1, senza però mai di fatto superarlo.

Il Laboratorio, invece, presenta voti soggettivi mediamente inferiori rispetto a quelli degli uffici ed infatti presenta una linea di tendenza più vicina ai limiti inferiori.

Il comfort adattativo sembra non rappresentare bene la correlazione delle sensazioni termiche soggettive in quanto, per voti medi soggettivi pari a +1 e +2, il metodo pone l'ambiente in una condizione di comfort rientrando a livello grafico nel limite della prima categoria.

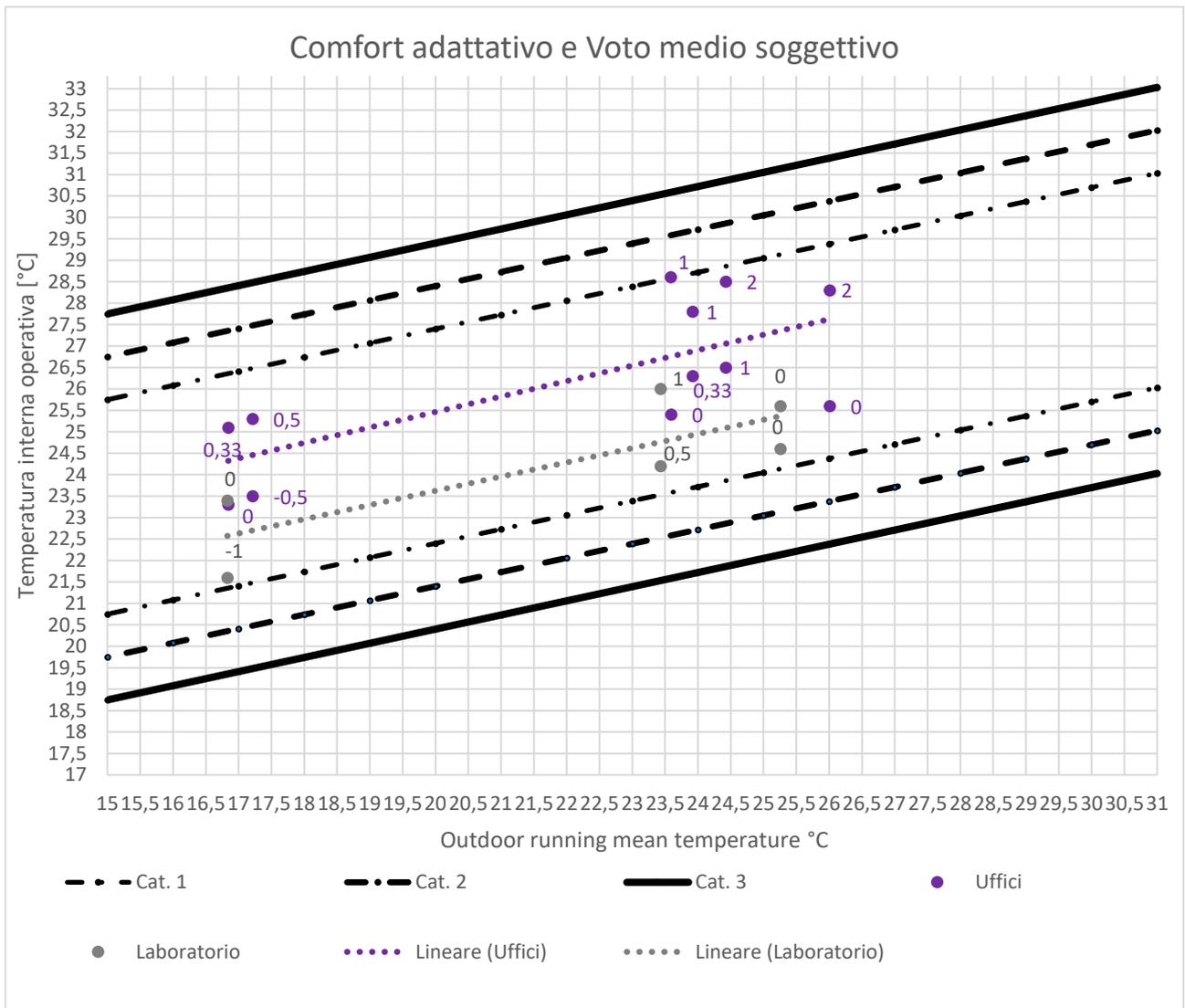


Figura 3.5.3 confronto tra il Comfort Adattativo e il Voto medio soggettivo

Coefficiente di correlazione: per gli uffici  $r=0,52$  e per i laboratori  $r=0,53$

P value: per gli uffici  $p=0,0079$  e per il laboratorio e per i laboratori  $p=0,14$

Nella tabella 3.5.1 si riassumono i dati mostrati nei grafici precedenti dal 3.5.1 al 3.5.3, dove viene proposta un'analisi di categoria che si basa sulla normativa EN 16798-1 confrontando all'indicatore del PMV, alla temperatura media, al metodo adattativo e al voto soggettivo la categoria corrispondente ad ogni valore.

Come si può notare nella tabella 3.5.1 il PMV, il comfort adattativo e il voto medio soggettivo negli uffici propongono, soprattutto a temperature elevate, categorie diverse per quasi tutte le mattinate ed i pomeriggi delle giornate di misure puntuali.

L'indice adattativo indica sempre dei valori medi compresi nella prima categoria, questo non permette di correlarlo nel modo corretto con il voto medio soggettivo. L'indice adattativo quindi sembra rappresentare meglio una fascia di accettabilità termica rispetto alla sensazione percepita dall'utente.

Infine la Temperatura risulta essere la grandezza più rappresentativa del comfort soggettivo in quanto tutti i suoi valori rappresentano la stessa categoria indicata dagli occupanti, discostandosi sempre al massimo di solo una categoria.

Tabella 3.5.1 analisi di categoria uffici ventilati naturalmente

Ufficio Rumore							
		Lunedì 17/08/2020		Mercoledì 26/08/2020		Martedì 01/09/2020	
		Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Categoria di PMV		1	2	1	3	4	3
Ti °C		26,0	27,4	26,3	28,0	22,9	24,6
Categoria di Ti °C		2	4	3	4	1	1
Categoria dell' Indice Adattativo		1	1	1	1	1	1
Categoria Voto Medio soggettivo		2	4	2	4	1	2
Ufficio NIR							
		Martedì 18/08/2020		Lunedì 24/08/2020		Mercoledì 02/09/2020	
		Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Categoria di PMV		3	3	2	2	3	1
Ti °C		25,2	27,7	25,9	28,1	23,3	24,7
Categoria di Ti °C		1	4	2	>4	1	1
Categoria dell' Indice Adattativo		1	1	1	1	1	1
Categoria Voto Medio soggettivo		1	>4	1	>4	2	2

Nella tabella 3.5.2, invece, il PMV e il voto medio soggettivo risultano avere dei parametri che ricadono, per i vari giorni di misura puntuale, in categorie con valori pressoché uguali. Il PMV risulta quindi essere un indice che rispecchia la sensazione termica del laboratorio differenziandosi da esso, al massimo, di una categoria.

Anche nel Laboratorio il comfort adattativo non rappresenta in maniera corretta il dato soggettivo in nessun giorno di misurazione.

La Temperatura, anche in questo caso, risulta essere la più rappresentativa in quanto tutti i valori ricadono nella medesima categoria indicata dagli occupanti, discostandosi sempre, al massimo, di una.

Nella rappresentazione finale all'utente la Temperatura sarà quindi utilizzata come grandezza che indica correttamente la percezione del comfort termico.

Tabella 3.5.2 analisi di categoria ambienti controllo misto (Laboratorio)

	Laboratorio					
	Mercoledì 19/08/2020		Martedì 25/08/2020		Lunedì 31/08/2020	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
<b>Categoria di PMV</b>	1	3	1	2	3	2
<b>Ti °C</b>	25,0	26,4	25,3	25,4	23,0	24,0
<b>Categoria di Ti °C</b>	1	3	1	1	2	1
<b>Categoria dell' Indice Adattativo</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Categoria Voto Medio soggettivo</b>	2	4	1	1	3	1

## Comfort acustico

Nel grafico seguente si analizza lo studio di correlazione tra il voto soggettivo, che ogni utente ha espresso alla domanda sul disturbo del rumore percepito con **codice L12**, e il livello continuo di pressione sonora medio misurato dal fonometro 15 minuti prima della consegna di ciascun questionario.

Il grafico seguente serve per andare a valutare successivamente che il valore di livello equivalente da correlare con il disturbo percepito, viene presentato la regressione lineare suddividendo i valori misurati per gli uffici e i Laboratori.

I livelli equivalenti continui, associati a voti medi di disturbo percepito, che sono misurati nei Laboratori sono significativamente superiori rispetto a quelli misurati negli uffici. L'indice di correlazione degli uffici  $r = 0,52$  con un valore del Pvalue  $p = 0,005$ , mentre per i Laboratori  $r = 0,43$  e  $p = 0,034$ . Rendendo significative le analisi statistiche.

Il Livello equivalente continuo non presente in nessuno dei due ambienti un indice di determinazione elevato, il Livello equivalente non è forse l'indice più adatto per indicare il disturbo percepito dall'utente.

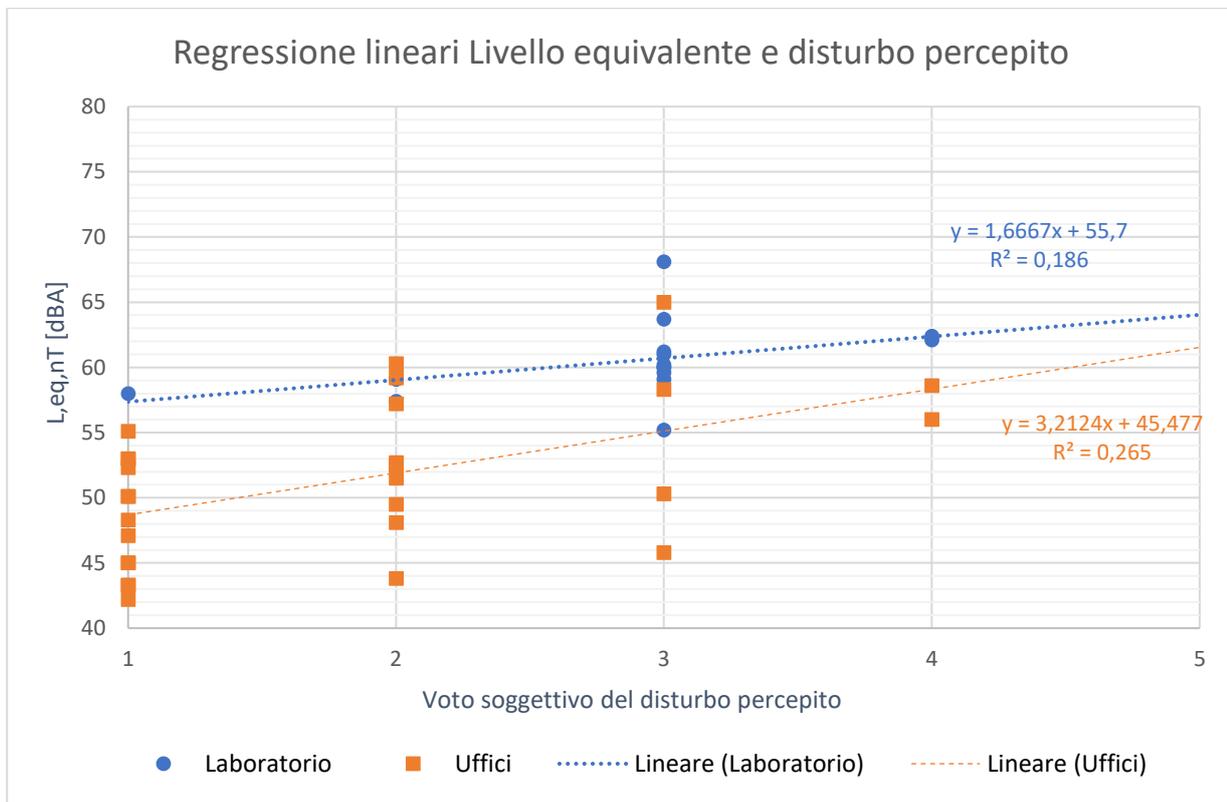


Figura 3.5.4 regressione lineare tra livello equivalente e disturbo percepito

Coefficiente di correlazione: per gli uffici  $r=0,52$  e per i laboratori  $r=0,43$

Pvalue: per gli uffici  $p=0,005$  e per il laboratorio e per i laboratori  $p=0,034$

Nei grafici seguenti si analizza il confronto tra il voto soggettivo, che ogni utente ha espresso alla domanda sul disturbo del rumore percepito con **codice L12**, e il livello continuo di pressione sonora medio misurato dal fonometro 15 minuti prima della consegna di ciascun questionario.

Ogni barra del grafico rappresenta la media di tutti i livelli di pressione sonora corrispondenti allo stesso gruppo di voti presenti nel grafico delle regressioni, quindi per ogni voto soggettivo vi sarà presente sul grafico il rispettivo valore di livello equivalente frutto della media dei livelli dei vari gruppi.

Inoltre si è deciso di considerare separatamente gli uffici dai Laboratori in quanto oltre ad essere due locali diversi sono soggetti a due fonti di rumore differenti. Si evidenzia che gli intervistati delle due diverse tipologie di ambiente sono abituati a livelli di pressione sonora differenti e quindi hanno una percezione del rumore disuguale.

Dalla figura 3.5.4 si può affermare che negli uffici per disturbi ritenuti non rilevanti o poco rilevanti dagli occupanti, il fonometro ha misurato un livello medio pari a 53 dBA. Quando invece è stato espresso un voto pari a 4 su 5 della scala di disturbo i livelli medi misurati sono stati superiori ai 57 dBA. Non è mai stata espressa nessuna percezione relativa ad un disturbo forte.

Possiamo quindi affermare che per gli uffici un rumore ritenuto mediamente disturbante risulta essere pari a 55 dBA.

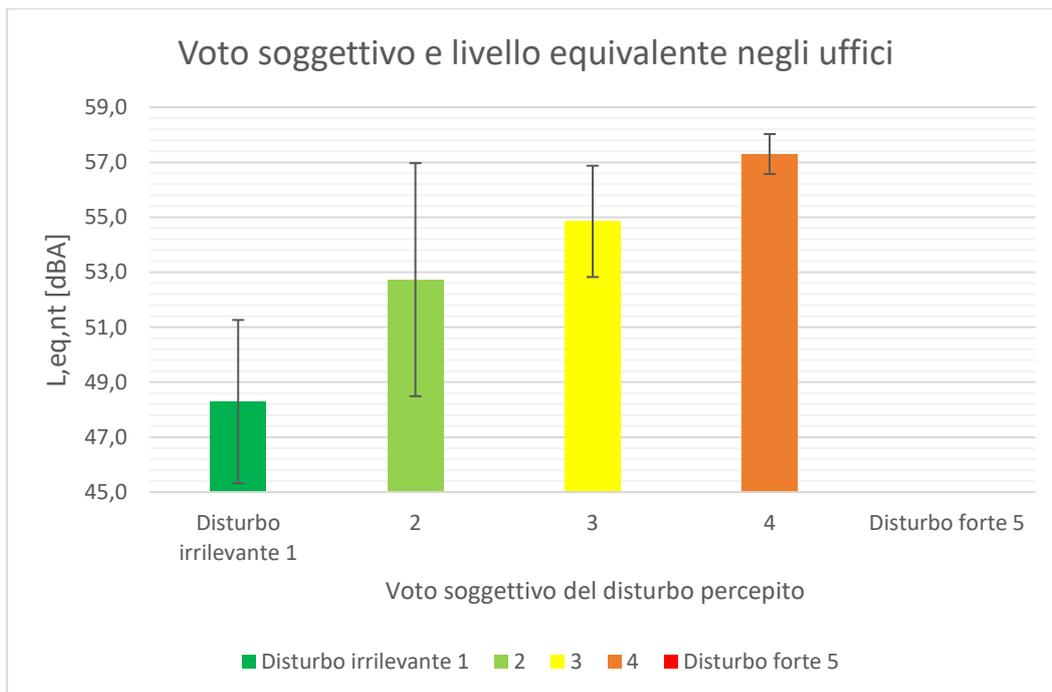


Figura 3.5.5  $L_{eq,nt}$  medio misurato con il fonometro e correlato con il voto espresso nei questionari per gli uffici

Nella tabella 3.5.3 si riportano le correlazioni riferite alle due grandezze sopra indicate, cioè il voto medio soggettivo che ogni utente ha espresso alla domanda sul disturbo del rumore percepito con **codice L12** e il livello continuo di pressione sonora medio per ogni mattina e pomeriggio delle giornate di misura puntuale.

In media i livelli misurati nell'ufficio Rumore sono intorno ai 50 dBA e gli utenti non reputano che esso causi un disturbo rilevante in quanto, in media, associano un valore di 2 su 5. Per valori pari a 54 dBA nella mattinata del 17/08 gli occupanti associano un voto medio pari a 3 su 5. Possiamo verificare quello che è già stato affermato in precedenza, dove per valori di pressione sonora vicini ai 55 dBA gli occupanti iniziano a percepire un disturbo abbastanza rilevante.

Tabella 3.5.3 Voto medio misurato per ogni giorno associato al livello equivalente medio per gli uffici

Ufficio Rumore							
		Lunedì 17/08/2020		Mercoledì 26/08/2020		Martedì 01/09/2020	
		Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Valor medio L <sub>eq,nT</sub> [dBA]		53,8	51,1	47,6	49,9	51,4	48,2
Voto medio soggettivo del rumore percepito		3,0	2,0	2,7	2	2	1,7
Ufficio Radiazioni							
		Martedì 18/08/2020		Lunedì 24/08/2020		Mercoledì 02/09/2020	
		Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
Valor medio L <sub>eq,nT</sub> [dBA]		46,4	41,0	50,2	39,9	44,1	47,3
Voto medio soggettivo del rumore percepito		1	1	1	1	1,5	2

Dall'analisi dei profili sonori del Laboratorio emerge che i livelli di fondo sono molto superiori rispetto a quelli visti negli uffici; e come visto nel grafico sulle regressioni lineari anche a livello soggettivo, dei rumori che risultano poco disturbanti nel Laboratorio sarebbero ritenuti disturbi molto forti negli uffici.

Dalla figura 3.5.6 i disturbi ritenuti non rilevanti o poco rilevanti dagli occupanti del Laboratorio sono pari a livelli massimi di 59 dB. Quando invece è stato espresso un voto pari a 4 su 5 nella scala di disturbo, i livelli medi misurati sono stati superiori ai 62 dBA. Non è mai stata espressa anche qui nessuna percezione di un disturbo forte.

Il livello di pressione sonora a cui l'utente associa un valore di 3 su 5 inizia, come già affermato, a recare un disturbo all'occupante, per il Laboratorio questo valore è pari a circa 60,5 dBA.

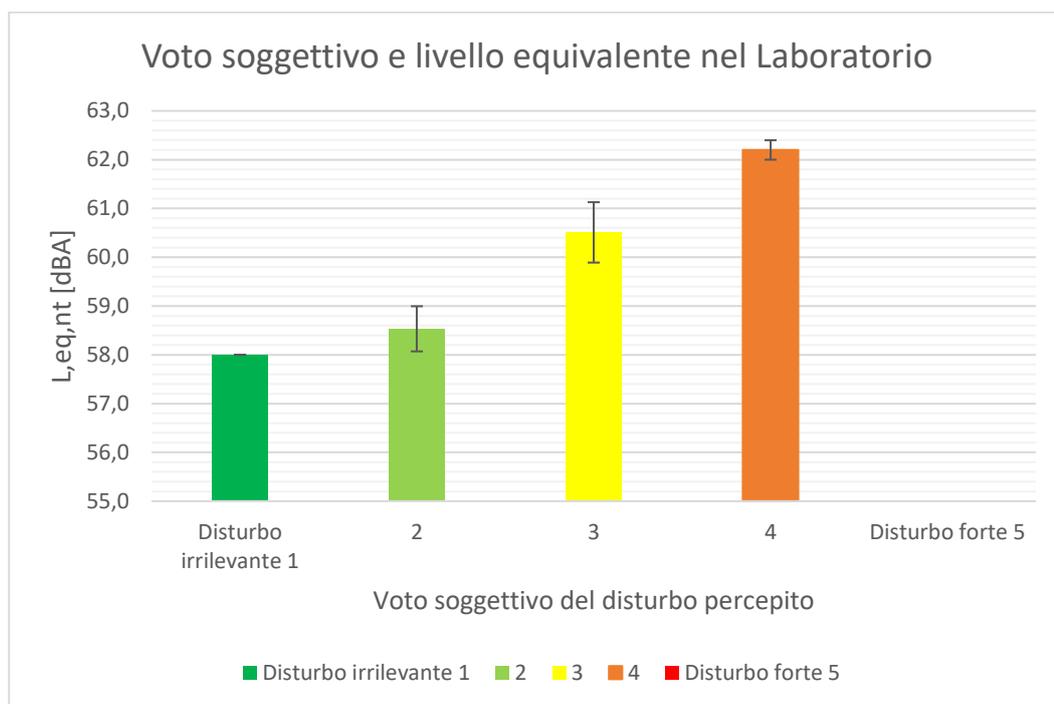


Figura 3.5.6 L<sub>eq,nt</sub> medio misurato con il fonometro e correlato con il voto espresso nei questionari per il Laboratorio

Nella tabella 3.5.4 si riportano, come per gli uffici, le correlazione riferite al voto medio soggettivo che ogni utente ha espresso alla domanda sul disturbo del rumore percepito con **codice L12** e il livello continuo di pressione sonora medio per ogni mattina e pomeriggio delle giornate di misura puntuale.

I voti medi soggettivi in questo caso, che sono intorno al voto 3 su 5, vengono associati a valori medi di pressione sonora continua paria a circa 60 dBA.

Tabella 3.5.4 Voto medio soggettivo misurato per ogni giorno associato al livello equivalente medio per il Laboratorio

	Laboratorio					
	Mercoledì 19/08/2020		Martedì 25/08/2020		Lunedì 31/08/2020	
	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio
<b>Valor medio L<sub>eq,nT</sub> [dBA]</b>	59,3	60,2	59,4	59,2	-	-
<b>Voto medio soggettivo del rumore percepito</b>	2,3	2	2,7	3	3,3	3

## Comfort visivo

Anche per il comfort luminoso vengono presentate le digressioni lineari tra il voto soggettivo espresso per ogni questionario nella domanda con **codice L9**, dove si chiede di giudicare la quantità di luce presentate nel tavolo di lavoro, e l'illuminamento medio in Lux misurato sul piano della scrivania in un arco temporale di 15 minuti rispetto all'ora di consegna del questionario.

Per il livello d'illuminamento risulta un coefficiente di correlazione  $r = 0,4$  e un Pvalue  $p = 0,06$ . La correlazione risulta essere ben rappresentativa mentre l'indice di correlazione risulta essere pari a  $R^2 = 0,16$ . Indicando un legame poco forte tra il livello di illuminamento misurato e il livello di luce percepita dall'utente.

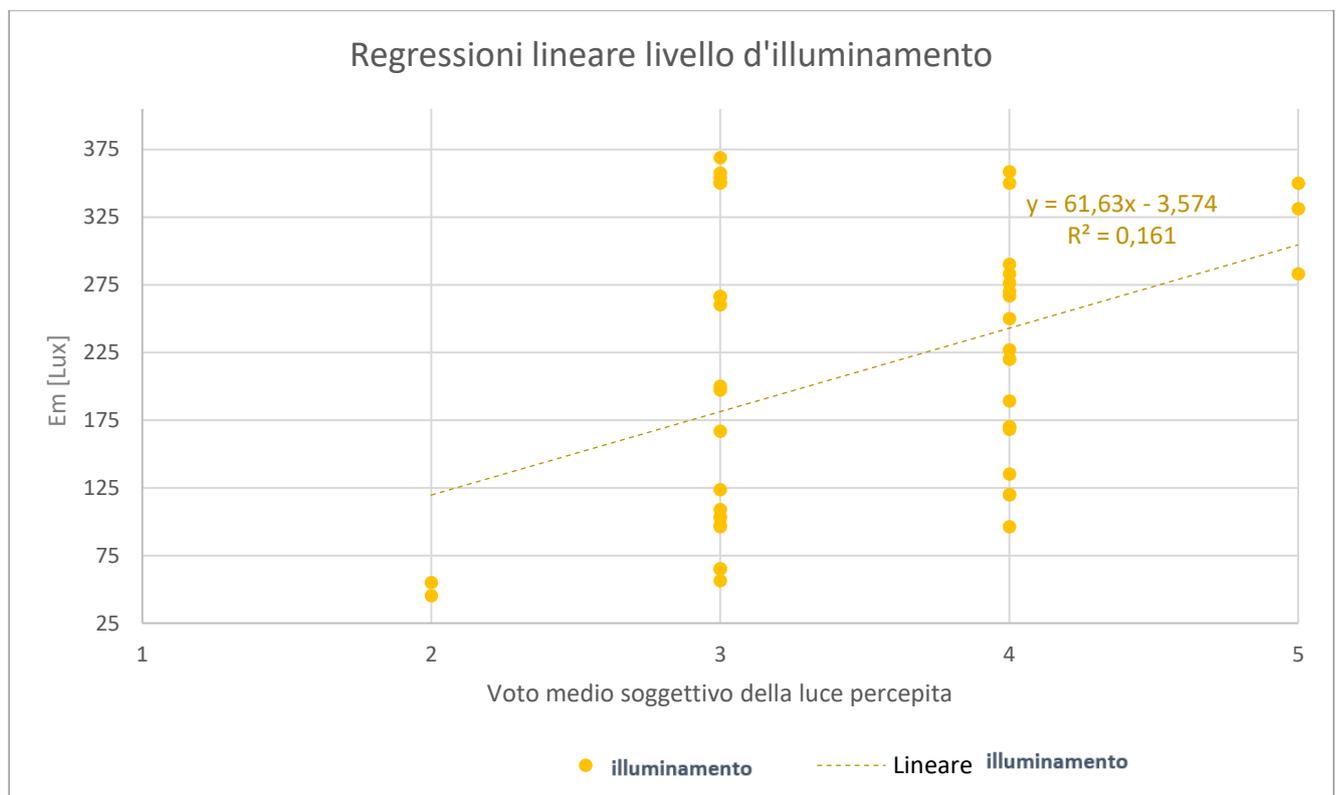


Figura 3.5.7 regressioni lineare dell'illuminamento

Coefficiente di correlazione:  $r=0,4$

Pvalue:  $p=0,006$

Nel grafico 3.5.8 sono espresse le relazioni tra voto medio soggettivo e livello d'illuminamento viste nel grafico precedente delle regressioni Infine, per ogni voto della scala si è rappresentata la media dei valori di illuminamento corrispondenti come è avvenuto precedentemente nel comfort acustico.

Inoltre, nel grafico le risposte dei vari ambienti non sono state differenziate per tipologia di ambiente come invece avvenuto nello studio del comfort acustico e del comfort termico.

Nel grafico non è rappresentata la quantità d'illuminamento medio riferito al voto soggettivo pari a 1 insufficiente perché non sono mai pervenute risposte con questo voto.

In generale dal grafico emerge che si ha un aumento del livello dell'illuminamento medio proporzionale alla percezione soggettiva della quantità di luce presente sul piano della scrivania.

Per un voto medio soggettivo pari a 2 su 5, è stato ricavato un livello poco superiore a 50 Lux che risulta essere molto basso se riferito alla normativa di riferimento della EN 16798. Per un voto medio soggettivo di 3 su 5, è stato ricavato un valore di illuminamento medio pari a 200 Lux. Per il voto medio soggettivo pari a 4 su 5 un valore di illuminamento medio pari a 230 Lux per il voto 4, ed infine per una luce ritenuta eccessiva sul piano di lavoro un valore di 300 Lux.

Possiamo quindi affermare che gli utenti ritengono che un buon livello di illuminamento sia intorno ai 200 Lux.

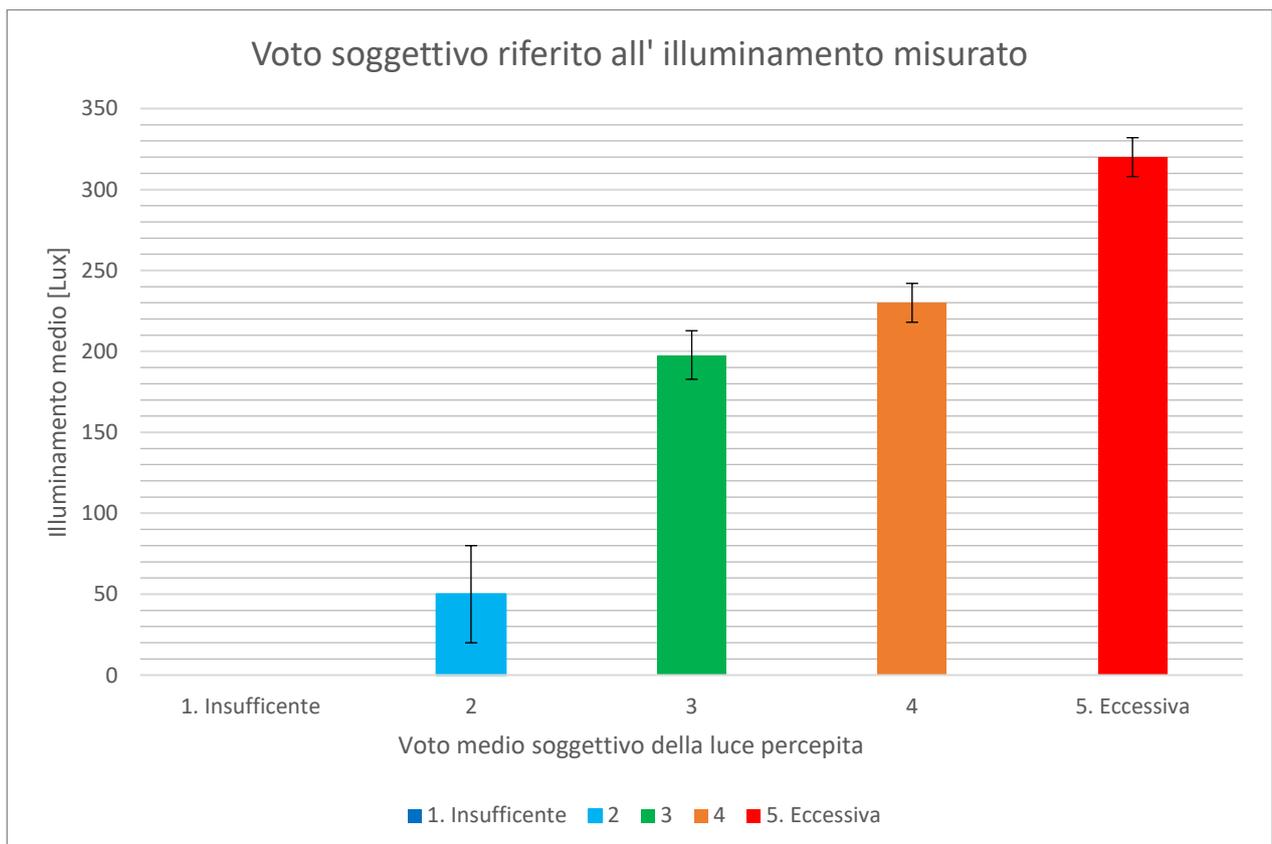


Figura 3.5.8 Voto soggettivo riferito all' illuminamento misurato

Nella tabella 3.5.5 si riporta la correlazione presentata sopra riferita al voto medio soggettivo che ogni utente ha espresso alla domanda sul quantità di luce percepita con **codice L9** e il livello di illuminazione misurato per ogni mattina e pomeriggio delle giornate di misura puntuale.

Nel Laboratorio per livelli di illuminamento che risultano, in media, di circa 300 Lux gli utenti associano un voto medio soggettivo di 3 su 5.

Negli uffici invece, in media, si percepiscono valori di illuminazione inferiori e voti medi soggettivi superiori, risulta infatti che per valori di illuminamento che vanno dai 100 a 200 Lux si ottengono voti medi soggettivi sulla quantità di luce superiori a 3 su 5.

Tabella 3.5.5 Voto medio soggettivo correlato al valor medio di illuminamento misurato

Ufficio Rumore						
Lunedì 17/08/2020		Mercoledì 26/08/2020		Martedì 01/09/2020		
Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	
Valor medio Em [lux]	301	121	318	123	163	144
Voto medio Soggettivo quantità di luce	4	3	3,7	3,5	3,3	3
Ufficio NIR						
Martedì 18/08/2020		Lunedì 24/08/2020		Mercoledì 02/09/2020		
Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	
Valor medio Em [lux]	130	86	95	73	150	143
Voto medio Soggettivo quantità di luce	4	4	3,5	3,5	3,5	3,5
Laboratorio						
Mercoledì 19/08/2020		Martedì 25/08/2020		Lunedì 31/08/2020		
Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	
Valor medio Em [lux]	334	364	286	356	267	280
Voto medio Soggettivo quantità di luce	3	3	3	3	3,7	3,3

### Qualità dell'aria interna:

Nella figura 3.5.9 è rappresentata come per i precedenti parametri l'analisi di regressione tra il voto soggettivo espresso per ogni questionario nella domanda con **codice L7**, dove si chiede come si percepisce l'odore dell'aria all'interno dell'ambiente di lavoro, e la concentrazione di CO<sub>2</sub> espressa in ppm misurata nei 15 minuti precedenti rispetto all'ora di consegna del questionario. Infine, per ogni voto della scala si è rappresentata la media dei valori di concentrazione corrispondenti.

Dal punto di vista statistico la CO<sub>2</sub> è un parametro che non sembra avere una buon legame con la percezione della qualità dell'aria interna in quanto presenta un indice di correlazione  $r = -0,21$  e un Pvalue  $p = 0,167$ . La correlazione tra questi due parametri è scarsa e poco significativo a livello statistico, inoltre, l'indice di correlazione risulta essere pari a  $R^2 = 0,023$ , indicando valori che si discostano molto dalla retta di regressione e un modello che non risulta valido.

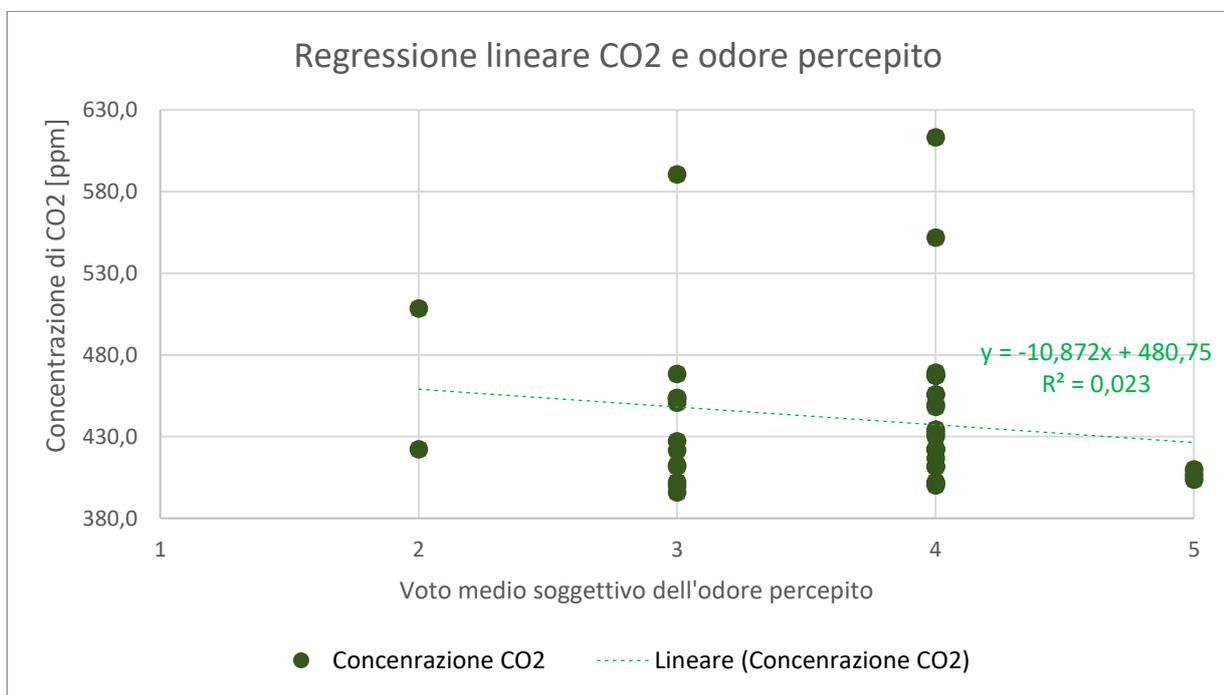


Figura 3.5.9 regressioni lineare dell'odore percepito e il livello di CO<sub>2</sub> misurato

Coefficiente di correlazione:  $r = -0,21$

Pvalue:  $p = 0,167$

Nel grafico 3.5.10 sono mostrati i risultati riferiti al grafico precedente sulle regressioni come nell'analisi del comfort luminoso le risposte dei vari ambienti sono state unite e non differenziate in quanto non ci sono concentrazioni misurate molto differenti fra loro.

Nel grafico non è rappresentato il voto medio soggettivo riferito al valore pari a 1, per cui l'odore percepito nell'aria risulta molto sgradevole, in quanto non sono mai pervenute risposte con questo voto.

Come si poteva prevedere il voto medio soggettivo decresce con l'aumentare della concentrazione di CO<sub>2</sub> misurata.

I livelli di CO<sub>2</sub> che secondo la normativa EN 16798 risulterebbero creare discomfort non vengono mai raggiunti. Gli occupanti, infatti, trovano che la qualità dell'aria sia gradevole per concentrazioni interne vicine alle concentrazioni esterne, mentre per differenze superiori a 60 ppm gli occupanti iniziano a non gradire l'aria presente nell'ambiente.

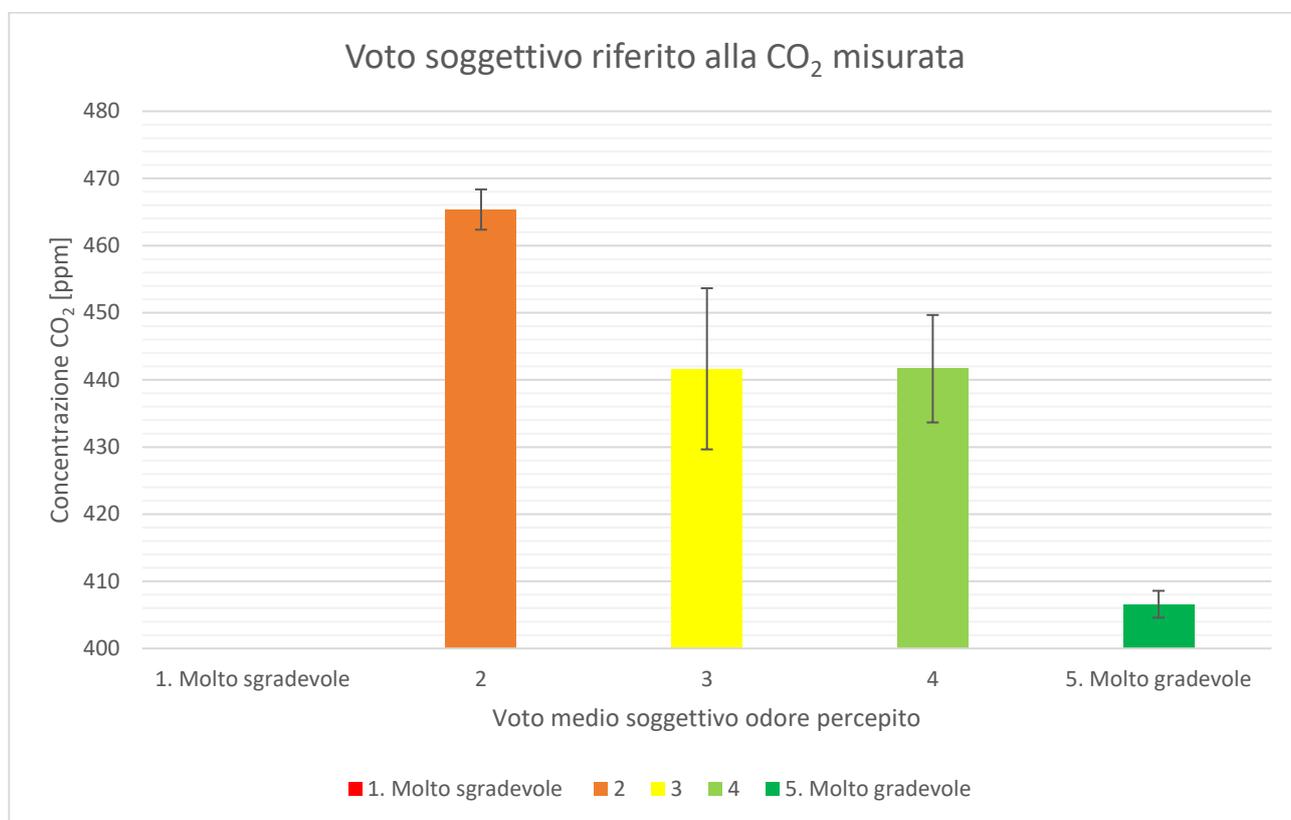


Figura 3.5.10 Voto soggettivo riferito alla Concentrazione di CO<sub>2</sub> misurata

Nella tabella 3.5.6 si riportano la stessa correlazione vista nel grafico sopra e riferita al voto medio soggettivo che ogni utente ha espresso alla domanda sull'odore percepito con **codice L7** e la concentrazione misurata di CO<sub>2</sub> per ogni mattina e pomeriggio delle giornate di misura puntuale.

Nell'ufficio Rumore il livello medio misurato risulta essere sempre compreso fra 3 e 4, inoltre si rileva che il giorno 01/09 la concentrazione media di CO<sub>2</sub> è superiore a 500 ppm.

Nell'Ufficio NIR la concentrazione misurata risulta essere sempre molto bassa e di conseguenza sono espresse valutazioni soggettive sempre pari a 4 su 5.

Il Laboratorio presenta ottimi livelli di qualità dell'aria misurata con concentrazioni sempre inferiori ai 422 ppm. A queste basse concentrazioni però vengono associate valutazioni medie soggettive ritenute non eccellenti da parte degli occupanti.

Tabella 3.5.6 Voto medio soggettivo correlato alla concentrazione di CO<sub>2</sub> misurata

Ufficio Rumore						
Lunedì 17/08/2020		Mercoledì 26/08/2020		Martedì 01/09/2020		
Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	
CO <sub>2</sub> [ppm]	439,3	433	479,4	457,8	538,7	470,6
Voto medio Soggettivo odore percepito	3,7	3,3	3,7	4	3,6	3,3
Ufficio NIR						
Martedì 18/08/2020		Lunedì 24/08/2020		Mercoledì 02/09/2020		
Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	
CO <sub>2</sub> [ppm]	427	421,5	450,9	413,8	463,4	454,2
Voto medio Soggettivo odore percepito	4	4	4	4	4	4
Laboratorio						
Mercoledì 19/08/2020		Martedì 25/08/2020		Lunedì 31/08/2020		
Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	Mattino	Pomeriggio	
CO <sub>2</sub> [ppm]	418,5	419,9	412,2	421,2	415,5	411,2
Voto medio Soggettivo odore percepito	3	3	3,3	3,5	3,7	3,7

### 3.6 Restituzione all'utente e indice sintetico IEQ

In seguito all'analisi di correlazione si presenta la restituzione all'utente per i vari aspetti del comfort globale, proponendo prima la legenda e in seguito, per ogni ambiente, la restituzione finali. Per ogni parametro è indicata la scala di percezione attraverso delle faccine colorate:

**Legenda:**

Comfort Termico: Estivo		Comfort Acustico:		Qualità dell'aria:		Comfort Luminoso:	
	Qualità termica Alta		Disturbo irrilevante		Molto gradevole		Insufficiente
	Qualità termica Media		Disturbo lieve		Gradevole		Scarso
	Qualità termica Moderata		Disturbo medio		Media		Medio
	Qualità termica Scarsa		Disturbo abbastanza forte		Abbastanza sgradevole		Abbastanza forte
	Qualità termica Molto scarsa		Disturbo forte		Molto sgradevole		Eccessivo

Legenda relativa alla qualità dell'ambiente interno frutto dell' insieme dei quattro parametri ambientali:

**IEQ**

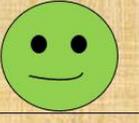
	OTTIMA
	BUONA
	DISCRETA
	SCARSA
	PESSIMA

Nel prossimo gruppo di immagini sono raffigurati per ogni valore della scala di percezione gli intervalli delle grandezze di riferimento, che sono state ricavate dal capitolo precedente sulla correlazione del dato oggettivo e soggettivo. Ad ogni intervallo sono rappresentati le corrispondenti categorie di qualità ambientale della normativa EN 16798-1 e il range di parametri a cui si riferiscono.

<b>Comfort termico Estivo</b>					
Percezione degli utenti:	Ti: 23,5-25 °C	Ti: 23-26 °C	Ti: 22-27 °C	Ti: 21-28 °C	Ti < 21 °C e Ti > 28 °C
Riferimento Normativo:	Ti: 23,5-25,5 °C Categoria 1	Ti: 23-26 °C Categoria 2	Ti: 22-27 °C Categoria 3	Ti: 21-28 °C Categoria 4	Ti < 21 °C e Ti > 28 °C Sopra categoria 4

<b>Comfort termico Invernale</b>					
Percezione degli utenti:	-	-	-	-	-
Riferimento Normativo:	Ti: 21,0-25,0 °C Categoria 1	Ti: 20-25 °C Categoria 2	Ti: 18-25 °C Categoria 3	Ti: 17-25 °C Categoria 4	Ti < 17 °C Sopra categoria 4

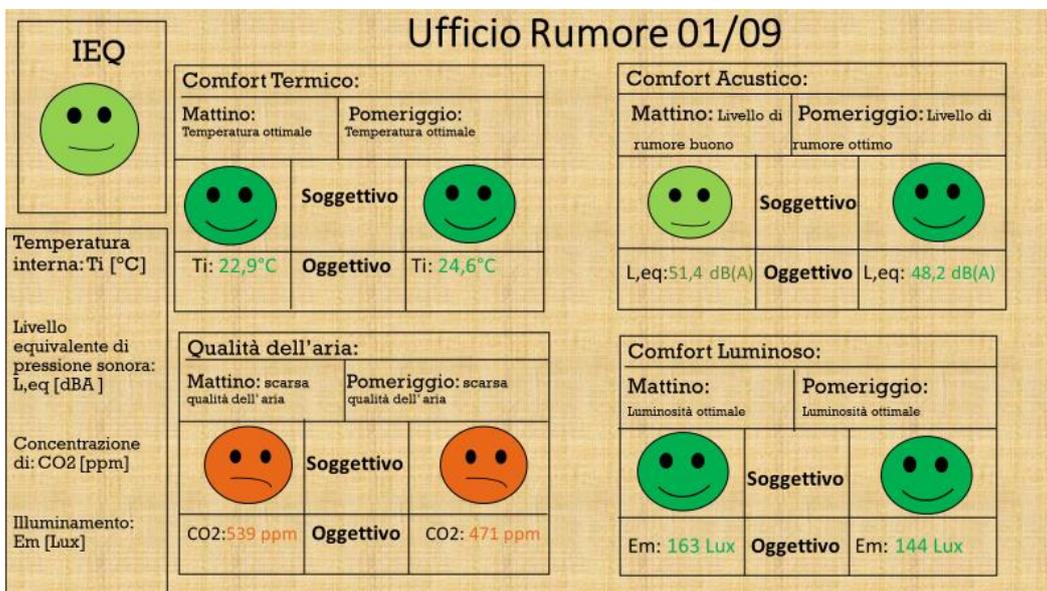
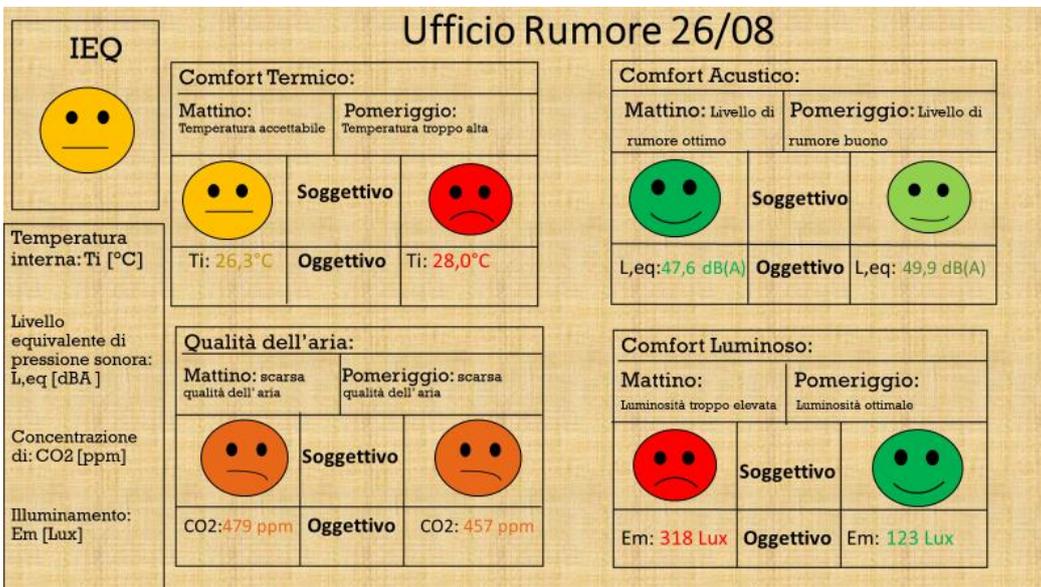
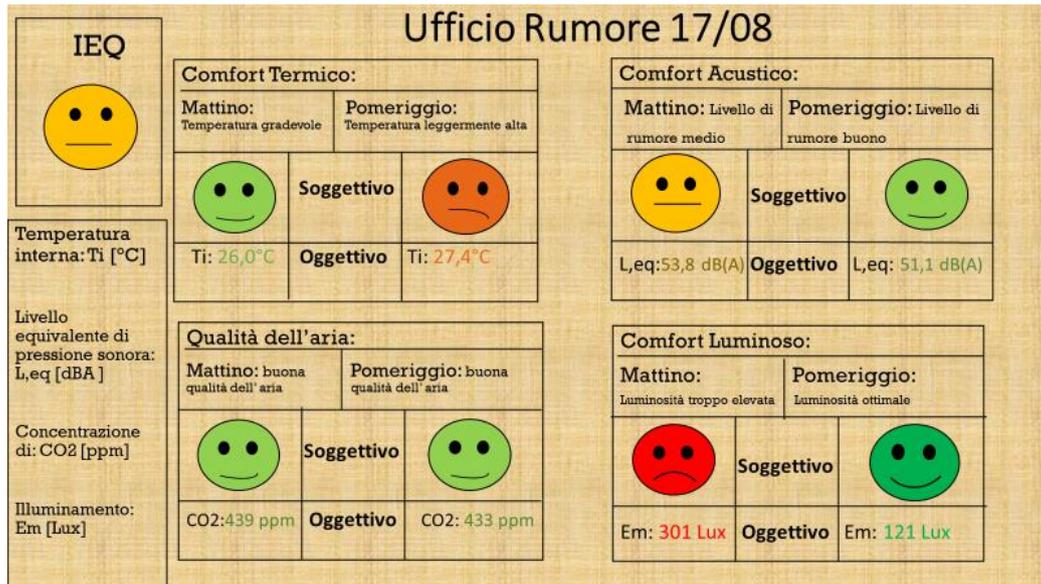
<b>Qualità dell'aria</b>					
Percezione degli utenti :	CO2 < 410 ppm	410 ppm < CO2 < 440 ppm	440 ppm < CO2 < 460 ppm	460 ppm < CO2	-
Riferimento Normativo:	CO2 < 550 ppm Categoria 1	550 ppm < CO2 < 800 ppm Categoria 2	800 ppm < CO2 < 1350 ppm Categoria 3 Categoria 4		1350 ppm > CO2 Sopra categoria 4

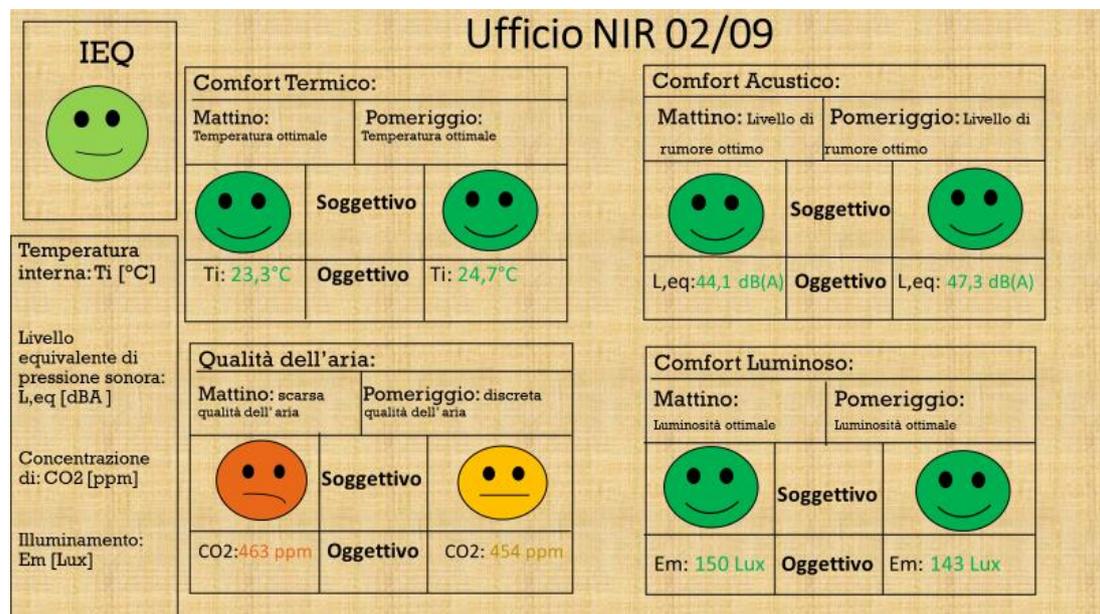
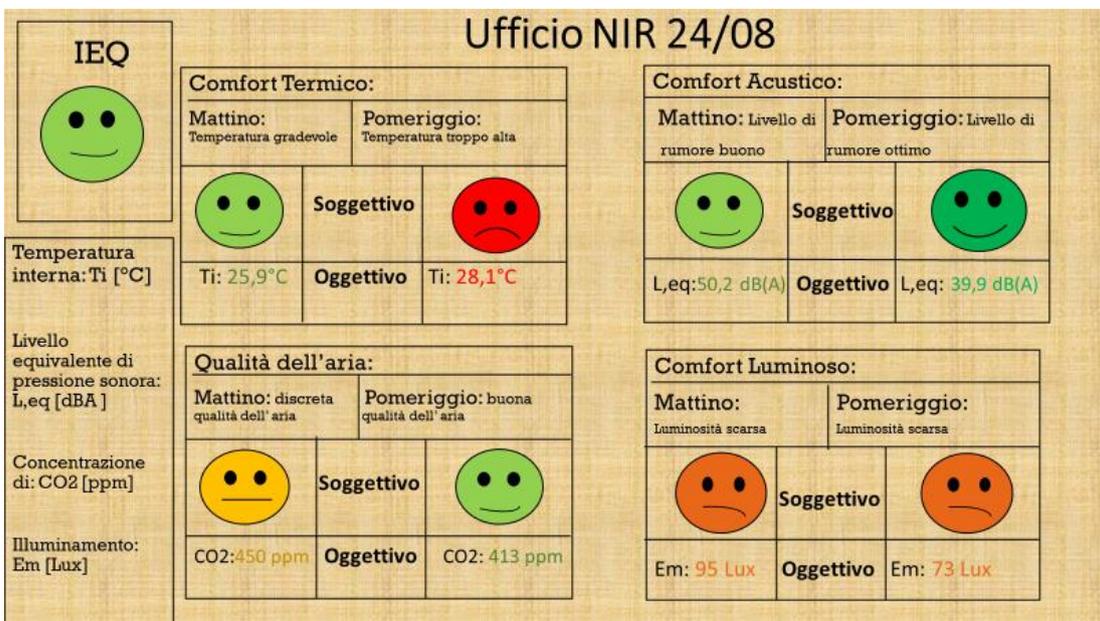
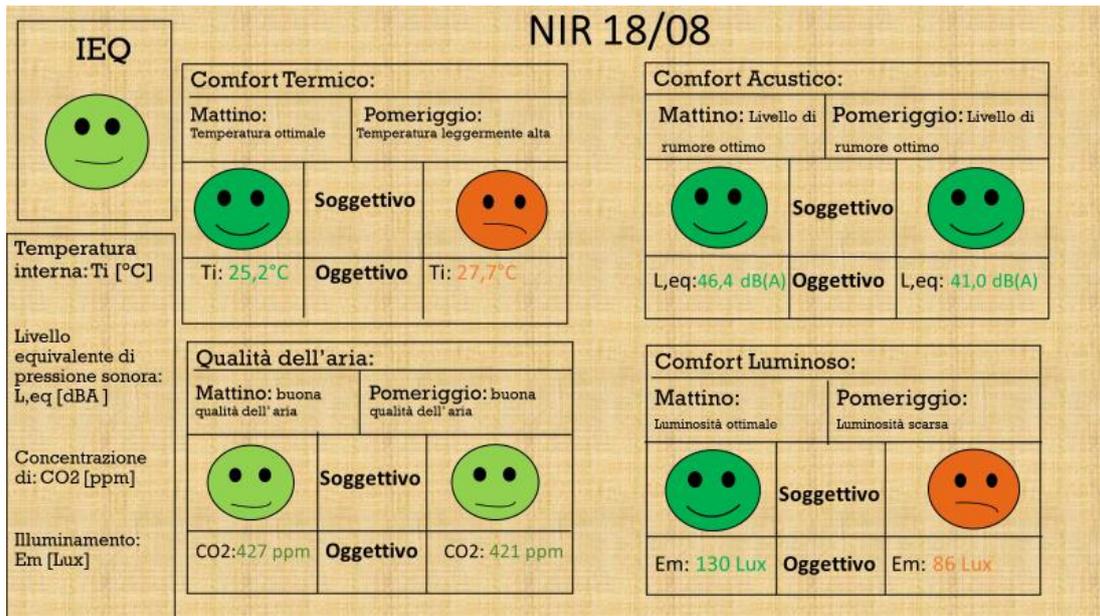
<b>Comfort acustico Uffici</b>					
Percezione degli utenti:	Leq,nt < 49 dB(A)	49 dB(A) < Leq,nt < 53 dB(A)	53 dB(A) < Leq,nt < 55 dB(A)	55 dB(A) < Leq,nt < 57 dB(A)	Leq,nt > 57 dB(A)
Riferimento Normativo:	Leq,nt < 30 dB(A) Categoria 1	Leq,nt < 35 dB(A) Categoria 2	Leq,nt < 40 dB(A) Categoria 3	Leq,nt > 40 dB(A) Sopra Categoria 3	

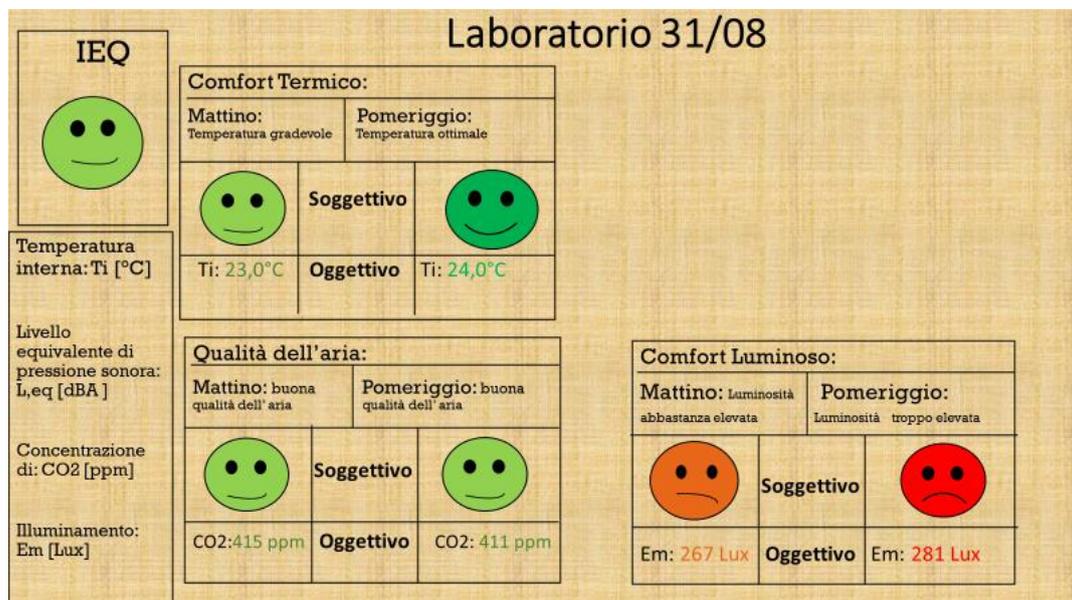
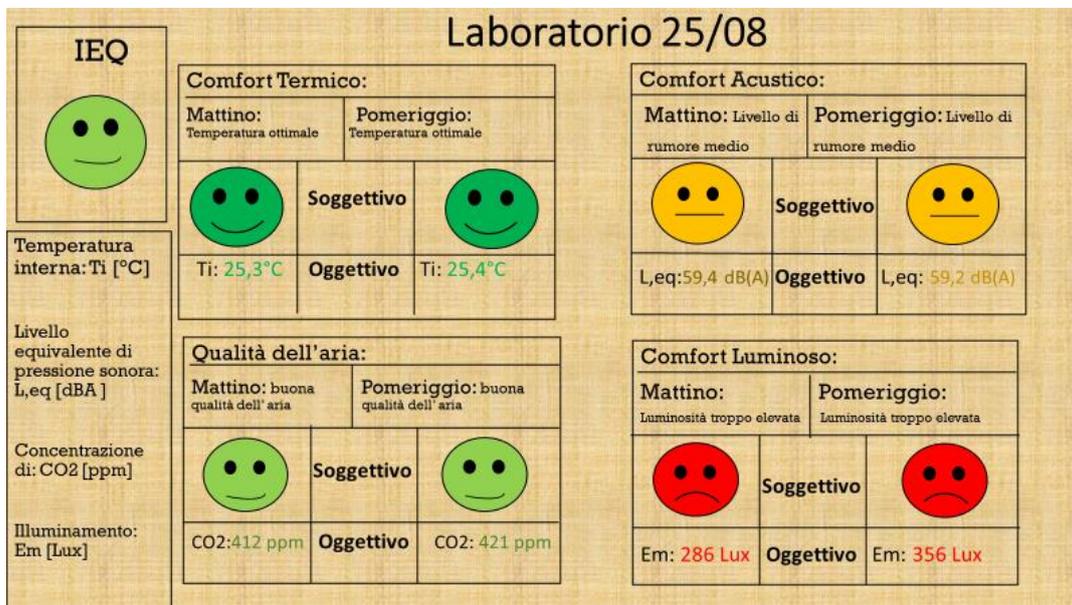
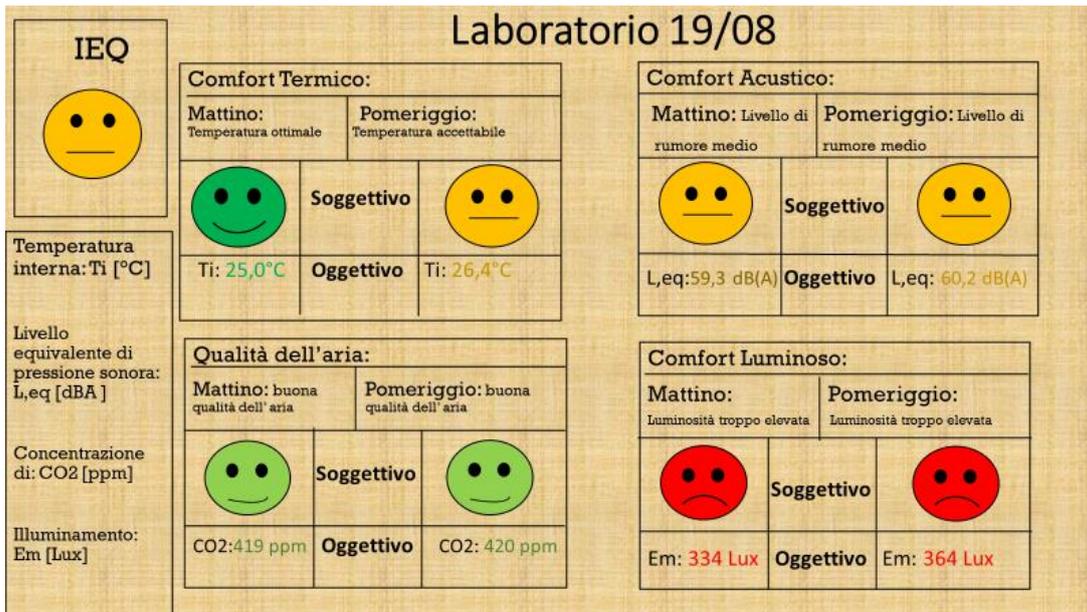
<b>Comfort acustico Laboratorio</b>					
<b>Percezione degli utenti:</b>	$Leq,nt < 58 \text{ dB(A)}$	$58 \text{ dB(A)} < Leq,nt < 59 \text{ dB(A)}$	$59 \text{ dB(A)} < Leq,nt < 61 \text{ dB(A)}$	$61 \text{ dB(A)} < Leq,nt < 63 \text{ dB(A)}$	$Leq,nt > 63 \text{ dB(A)}$
<b>Riferimento Normativo:</b>	$Leq,nt < 30 \text{ dB(A)}$ Categoria 1	$Leq,nt < 35 \text{ dB(A)}$ Categoria 2	$Leq,nt < 40 \text{ dB(A)}$ Categoria 3	$Leq,nt > 40 \text{ dB(A)}$ Sopra Categoria 3	

<b>Comfort Luminoso</b>					
<b>Percezione degli utenti:</b>	$Em < 50 \text{ Lux}$	$50 \text{ Lux} < Em < 150 \text{ Lux}$	$150 \text{ Lux} < Em < 230 \text{ Lux}$	$230 \text{ Lux} < Em < 300 \text{ Lux}$	$Em > 300 \text{ Lux}$
<b>Riferimento Normativo:</b>			$Em: 500 \text{ Lux}$		

Restituzione all'utente:







## 4 Discussioni

In questo capitolo si discutono e si valutano i risultati ottenuti dalle analisi che si sono affrontate nel capitolo precedente. Si è deciso di strutturare la discussione rispetto all'ordine delle varie grandezze del comfort globale monitorate. Principalmente si vanno a valutare se le indicazioni presenti nella normativa sono coerenti con le valutazioni soggettive percepite dagli utenti e, in caso di una discordanza, se le correlazioni proposte in questa tesi possono permettere di valutare correttamente le percezioni soggettive degli occupanti. Inoltre, si vuole mostrare al lettore le limitazioni presenti nel caso studio e le sue eventuali conseguenze.

Si può affermare che la normativa EN16798 non ha previsto correttamente le percentuali di soddisfazione per alcuni aspetti del comfort globale quali il comfort acustico, la qualità dell'aria e il comfort luminoso. Al contrario per il comfort termico la normativa è riuscita a valutarle correttamente la percezione da parte dell'utente.

Le limitazioni che hanno caratterizzato la tesi sono molte e di rilevanza. In primo luogo l'emergenza sanitaria dovuta al Covid-19 ha condizionato due aspetti importanti: in primis ha causato la diminuzione del numero di persone presenti nel Laboratorio, dove non si sono mai registrate più di tre lavoratori nelle giornate di misura a fronte dei cinque che lo occupano normalmente; inoltre, per motivi dovuti al rischio di circolazione in ambiente del virus, si è deciso, solo negli uffici, di spegnere i termo ventilanti così come previsto dalle Linee Guida nazionali [33]. Questo fattore ha influito sulle temperature misurate e di conseguenza sulla sensazione termica percepita dagli occupanti che non rispecchiano le condizioni reali che si sarebbero percepite ad impianto acceso. Infine gli utenti, al fine di ridurre la trasmissione del virus per via aerea, hanno sovente tenuto le finestre aperte condizionando positivamente la qualità dell'ambiente interno.

Pertanto questo studio è caratterizzato da una casistica ristretta a causa del numero limitato di persone che hanno partecipato all'indagine se si considera che per molti degli studi effettuati nel campo del comfort globale sono stati somministrati migliaia di questionari [22] e che si sono presi in considerazione solamente tre ambienti. Analizzare un numero limitato di risposte ai questionari fa prevalere il fattore di soggettività del singolo utente che può con la sua diversa percezione influenzare fortemente lo studio.

Ad esempio, in un ufficio occupato da tre persone se un utente risulta essere particolarmente freddoloso e due persone risultano essere neutrali, il singolo influenza fortemente l'analisi soggettiva dell'ambiente; mentre su un campione di 100 persone la soggettività del singolo viene compensata dall'elevato campione di soggetti analizzati [20].

Un altro aspetto limitante del caso studio, che è opportuno evidenziare, è stato quello di effettuare le rilevazioni dei dati solamente durante tre settimane della stagione estiva e non interessare tutto l'arco dell'anno. Questo aspetto ha determinato un minor numero di dati registrati ed un numero limitato di giorni a disposizione per perfezionare le metodologie di misura. Inoltre, il breve lasso di tempo ha determinato la mancata presenza dei valori di COV misurati con i radielli in quanto le analisi non sono state restituite in tempo utile per la presentazione della tesi. La mancata misurazione dei dati nel periodo invernale non ha permesso di valutare i vari aspetti del comfort ambientale a temperature inferiori e poterle così confrontare con la normativa di riferimento.

Nella EN16798, inoltre, non vi è una valutazione globale della qualità dell'ambiente interno, ma ci si sofferma sui singoli aspetti. Lo studio qui presentato si è prefisso, invece, di ottenere una valutazione globale del comfort tramite l'analisi di correlazione tra dato oggettivo e dato soggettivo e l'unione dell'informazione dei vari parametri riconducibili ad un unico punteggio così come presentato nel capitolo precedente della restituzione all'utente finale.

Queste analisi di correlazione presentano a livello statistico delle limitazioni molto forti, soprattutto per il comfort acustico, la qualità dell'aria e il comfort luminoso. Il comfort termico, invece, risulta essere l'analisi con il modello più valido. La restituzione all'utente finale è condizionata da una rappresentazione dei dati che presenta dei limiti in quanto si prende in considerazione solamente un' unica grandezza fisica per ciascun aspetto del comfort globale. Questa restituzione non pretende di individuare una scala di percezione in cui i valori delle grandezze oggettive ad essa correlata possano essere validate e utilizzate in altri studi simili, rappresenta bensì un metodo che potrà essere utilizzato per un eventuale sviluppo di un multi sensore ambientale.

### **Comfort termico**

La normativa EN16798 indica tre parametri per la valutazione della qualità ambientale del comfort termico: l'indice PMV, il metodo del comfort adattativo e la temperatura dell'aria interna. Il PMV non ha valutato correttamente la percezione soggettiva negli uffici mentre nei Laboratori, che sono termicamente controllati, ha restituito con un buon successo la valutazione soggettiva degli occupanti per tutte le giornate di misura puntuale, discostandosi al più di una categoria termica. Questo studio conferma che l'indice PMV risulta essere adatto alla previsione della sensazione termica nei soli ambienti climaticamente controllati come viene specificato nella ISO 7730.

Il metodo adattativo, invece, non è risultato particolarmente adatto alla valutazione del comfort termico in quanto ha sempre sovrastimato la percezione positiva dell'ambiente da parte degli occupanti. Il metodo pone i vari ambienti sempre all'interno della prima categoria di qualità ambientale dove si prevede un numero di soddisfazione termica superiore al 90% mentre, mediamente, i soggetti intervistati sono risultati meno soddisfatti della percentuale corrispondente alla normativa.

Il parametro che ha meglio rappresentato il comfort termico rispetto alla normativa EN16798 è la temperatura dell'aria interna che, sia negli uffici che nel Laboratorio, ha valutato correttamente la sensazione percepita dagli intervistati. Si è scelta dunque questa grandezza da utilizzare nella rappresentazione finale all'utente in modo da avere una giusta correlazione tra il dato soggettivo e la normativa.

Sia la temperatura che il PMV a livello statistico sono due parametri che rappresentano correttamente la percezione soggettiva dell'occupante, come si è potuto valutare nel capitolo precedente, l' indice di determinazione infatti era molto vicino al valore 1. Come già spiegato la Temperatura interna confrontata con la percezione percepita rispecchiava quasi sempre i valori indicati nella normativa. Inoltre, i soggetti intervistati nei locali dell'ARPA Valle d'Aosta sono risultati particolarmente condizionati dalla variazione della temperatura interna, analogamente a come è stato registrato in altri studi simili [21].

### **Comfort acustico**

La EN16798-1 definisce lo standard di dimensionamento delle fonti di rumore dei sistemi meccanici, il parametro di valutazione utilizzato è il Livello continuo equivalente percepito nell'ambiente interno misurato. Questo criterio di qualità ambientale tiene conto solamente del rumore generato dai sistemi meccanici e non dalle altre sorgenti rumorose presenti nell'ambiente come, ad esempio, la voce delle persone, il traffico esterno, ecc. Di conseguenza i livelli presenti nell'allegato L della normativa non sono idonei a valutare il rumore percepito dagli occupanti.

Nel capitolo relativo alle correlazioni tra il dato oggettivo e il dato soggettivo si sono confrontati i livelli di pressione sonora misurati e il disturbo percepito dagli occupanti, in questo modo è stato possibile associare ad ogni disturbo un relativo livello equivalente. Grazie a questa analisi si è potuto determinare per quali livelli

di pressione sonora si percepisce un determinato disturbo e poter così restituire all'utente finale la sensazione provata dall'occupante correlata al rispettivo dato oggettivo.

Dall'analisi di regressione si è potuto evincere che non esiste una perfetta relazione lineare tra il livello equivalente misurato e il disturbo percepito. Il livello di pressione sonora non è l'unico aspetto che influisce la percezione del rumore. Altri parametri acustici possono rappresentare meglio la percezione soggettiva del rumore e si può effettuare un'analisi più approfondita sulle singole fonti di rumore presenti nell'ambiente e il disturbo che recano all'occupante.

Dall'analisi svolta abbiamo potuto comunque constatare che si è valutato per valori di livello continuo equivalente superiore ai 55 dBA gli occupanti degli uffici iniziano a non essere più a loro agio nell'ambiente di lavoro mentre per i soggetti occupanti il Laboratorio questo disturbo inizia ad essere percepito per valori superiori ai 60,5 dBA.

Per quanto concerne il confronto tra i SEM ed il fonometro possiamo affermare che i primi hanno mostrato una buona attitudine a rilevare i livelli mediamente presenti negli uffici. Per livelli di pressione sonora relativamente bassi (inferiori ai 40 dBA) non sono invece riusciti a misurare correttamente il dato, in quanto il loro funzionamento prevede un leggero rumore di fondo che pregiudica la misurazione.

### **Comfort Luminoso**

La EN 16798-1 si rifà alla normativa relativa alla progettazione dell'illuminazione dei luoghi di lavoro, la UNI EN 12464-1, dove si stabilisce che per gli uffici siano garantiti un livello d'illuminamento medio mantenuto pari a 500 Lux.

I valori registrati tramite il luxmetro del testo 480 hanno registrato valori medi massimi intorno ai 350 Lux, riferendosi quindi alla normativa gli ambienti risultano essere poco illuminati. Alla domanda del questionario longitudinale sulla percezione della quantità di luce presente sul piano di lavoro gli utenti, in media, hanno ritenuto che per livelli superiori ai 300 Lux l'ambiente fosse eccessivamente illuminato e che per valori intorno 200 Lux l'ambiente risultasse ben illuminato.

Possiamo quindi affermare che i valori di riferimento del dimensionamento degli impianti d'illuminazione della UNI EN 16798-1 non rappresentano il livello di comfort percepito dall'utente.

Lo studio di correlazione tra il dato oggettivo di illuminamento misurato ed il voto soggettivo rispetto alla domanda sull'illuminazione presente sul piano di lavoro è stato utilizzato nella restituzione finale per rappresentare ad un determinato valore di illuminamento la sensazione provata dall'utente.

Questo studio di correlazione rispetto a quello effettuato per la qualità dell'aria e per il comfort acustico risulta essere piuttosto limitativo perché il comfort luminoso percepito è strettamente collegato all'attività svolta dall'utente [23]. Ad esempio, lavorando al computer l'utente predilige un livello d'illuminazione minore rispetto a quello necessario per leggere un manuale d'istruzioni. Questo aspetto pregiudica lo studio di correlazione che è avvenuto nel capitolo precedente.

Nel nostro caso studio, ad esempio, nell'ufficio NIR per valori di illuminamento inferiori ai 100 Lux alcuni soggetti hanno ritenuto che il livello di illuminamento fosse ottimale, mentre nei Laboratori per alcuni utenti il valore di 250 Lux non era sempre sufficiente a generare una situazione di illuminazione ideale.

Ritengo quindi che lo studio di correlazione e la restituzione all'utente per il comfort luminoso sia molto limitativo in quanto non si riesce a valutare coerentemente in tutti gli ambienti un livello di illuminamento ritenuto ottimale. Questo aspetto è stato inoltre evidenziato dall'analisi di regressione, dove è risultato un indice di determinazione  $R^2$  che indica una non perfetta relazione lineare tra il livello d'illuminamento e la

luce percepita dall'occupante. Si propone la possibilità di effettuare uno studio più approfondito andando a valutare più grandezze come ad esempio il fattore di luce diurna.

### **Qualità dell'aria**

I valori di CO<sub>2</sub> misurati all'interno degli ambienti sono sempre stati molto vicini al valore di 400 ppm che sono tipici delle concentrazioni medie presenti di norma nell'ambiente esterno. Questa bassa concentrazione misurata è dovuta anche alla scarsa densità di occupazione dei vari ambienti e dal fatto che le finestre fossero aperte durante la giornata permettendo così un maggiore ricambio dell'aria interna.

Per questi valori di concentrazione misurati secondo la normativa EN16798-1 gli ambienti monitorati rientrano sempre nella categoria più alta di qualità ambientale con valori di soddisfazione della qualità dell'aria percepita da parte degli utenti pari al 95%.

Anche in questo caso, come per il comfort acustico e il comfort luminoso, la normativa non rispecchia le percezioni soggettive provate dagli utenti. Infatti, in determinate giornate di misure puntuali per valori di concentrazioni di CO<sub>2</sub> interni vicini a quelli esterni si ha una sgradevole percezione dell'odore presente in ambiente.

Per la qualità dell'aria è stato effettuato uno studio di correlazione tra la concentrazione di CO<sub>2</sub> misurata e il voto soggettivo espresso dall'utente rispetto alla domanda sulla percezione dell'odore in ambiente. Si ottiene così, per ogni valore di concentrazione di CO<sub>2</sub>, una restituzione all'utente rispetto alla percezione della qualità ambientale. Come già abbiamo visto la CO<sub>2</sub> a livello statistico non è ben correlata con la percezione degli odori e il modello a cui abbiamo fatto affidamento per la restituzione all'utente finale non è significativa a livello statistico. Oltre al livello di CO<sub>2</sub> si potrebbe andare a investigare su altri inquinanti presente nell'ambiente interno che comportano una cattiva percezione olfattiva.

I valori numerici associati ad ogni indicatore di percezione non sono utilizzabili in questo caso specifico, in quanto le condizioni in cui si è svolto il monitoraggio possono essere differenti rispetto ad altri studi. Ad esempio, gli intervistati dell'ARPA hanno ritenuto una scarsa qualità dell'aria superati i 500 ppm; riproponendo, per contro, lo stesso studio in centro a Torino ci aspetteremmo una percezione diversa a pari concentrazioni di CO<sub>2</sub>.

## 5 Conclusioni

In questo studio, partendo dall'analisi dei dati oggettivi e dalle risposte dei questionari, si è fornita una restituzione del comfort percepito negli ambienti della sede dell'ARPA Valle d'Aosta. Questa restituzione è frutto dell'analisi di dati oggettivi misurati e di dati soggettivi (ottenuti tramite questionari) che si sono confrontati con la normativa di riferimento per la valutazione della qualità dell'ambiente interno (EN16798-1:2019). Grazie ad un'analisi dapprima svolta separatamente, poi correlando i dati soggettivi ed oggettivi, è stata effettuata un'analisi critica delle variabili che la normativa di riferimento propone per la valutazione della qualità dell'ambiente interno. Infatti, mentre per alcuni domini (come nel caso del comfort termico) le variabili misurate risultano effettivamente predittive della sensazione soggettiva degli utenti, in altri casi le variabili proposte dalla normativa non sono risultate predittive della valutazione soggettiva. È stato questo il caso del comfort acustico, luminoso e della qualità dell'aria.

Dallo studio di confronto fra dato soggettivo e dato oggettivo, si è potuto quindi associare ad ogni valore della scala di percezione soggettiva degli intervalli corrispondenti delle grandezze misurate di riferimento. A partire da tale analisi, inoltre, è stato possibile concepire un sistema di restituzione della qualità ambientale all'utente finale, tenendo conto anche delle proprie specificità percettive. Tuttavia, questo studio dovrebbe essere interpretato come un primo passo metodologico che non pretende di offrire una rappresentatività statistica dei risultati forniti. Infatti, va specificato che il monitoraggio effettuato ed i risultati finali sono stati fortemente limitati dalla scarsa quantità di dati analizzati per costruire un modello valido (la campagna di misure si è limitata a poche settimane nel periodo estivo) e dal fatto di aver utilizzato solo le variabili contenute all'interno dello standard EN 16798:2019, spesso limitate ad un'unica grandezza fisica (concentrazione di CO<sub>2</sub>, livello equivalente continuo, ecc.) per rappresentare ciascun dominio della qualità dell'ambiente interno. A questo proposito, l'utilizzo di modelli di comfort come il PMV per il comfort termico, potrebbe essere proposto anche per gli altri tre domini, in modo da riuscire a rappresentare in maniera più corretta la percezione soggettiva dell'occupante.

Nonostante i limiti sopra citati, il modello di correlazione tra il dato oggettivo e il dato soggettivo e la relativa restituzione agli utenti può essere arricchito e reso ancor più predittivo in futuri studi in cui si disponga di una mole più adeguata di dati, eventualmente andando anche ad integrare altre grandezze fisiche. Inoltre, attraverso l'utilizzo di un sistema di acquisizioni di informazioni basato sul Machine Learning, il modello proposto in questa tesi potrebbe essere consolidato automaticamente.

La restituzione finale della qualità ambientale all'utente è stata pensata per essere di facile lettura. Al suo interno è stato inserito, oltre l'informazione soggettiva percepita per ogni parametro, l'indice di comfort globale, che dà un'indicazione su come l'utente percepisce l'ambiente nel suo complesso.

Questa restituzione non pretende di individuare una scala di percezione in cui i valori delle grandezze oggettive ad essa correlata possano essere validate e riutilizzate. Rappresenta bensì una eventuale dashboard che potrà essere utilizzata all'interno dello sviluppo di un multi-sensore ambientale per fornire, oltre l'informazione soggettiva dei parametri del comfort ricavate dalle grandezze misurate presenti in ambiente, la percezione del comfort globale all'interno del locale in cui è posto il multi-sensore.

## **Bibliografia:**

- [1] Thomas Parkinsona,b , Alex Parkinsonc. 2019. Continuous IEQ monitoring system: Context and development
- [2] Maedot S. Andargie. 2019. An applied framework to evaluate the impact of indoor office environmental factors on occupants' comfort and working conditions
- [3] Akira Tiele , Siavash Esfahani , and James Covington. 2017. Design Development of a Low-Cost, Portable Monitoring Device for Indoor Environment Quality
- [4] Arianna Astolfi, Franco Pellerey. 2007. Subjective and objective assessment of acoustical and overall environmental quality in secondary school classrooms
- [5] Marcel Schweiker, Eleni Ampatzi b , Maedot S. Andargie. 2020. Review of multi-domain approaches to indoor environmental perception and behaviour
- [6] Christhina Candido, Jungsoo Kim, Richard de Dear & Leena Thomas: BOSSA. 2016. A multidimensional post-occupancy evaluation tool Christhina Candido, Jungsoo Kim, Richard de Dear & Leena Thomas
- [7] U.S Environmental Protection agency. 2003. A standardized EPA Protocol for Characterizing indoor air quality in large office building
- [8] Corgnati,Filippi,Viazzo. 2005 .Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort Corgnati,Filippi,Viazzo,
- [9] Amman, Jordan. 2018. Adaptive thermal comfort and personal control over office indoor environment in a Mediterranean hot summer climate
- [10] Stefano Schiavon, Tom Webster. 2013. Indoor environmental quality assesment models: A litterature review and proposed weighthing and classification
- [11] Dott. Sonja Di Blasio, Prof. Valtteri Hongisto, PsD. Jenni Radun. 2019. OFFICE NOISE STUDY
- [12] Guy R. Newsham , Benjamin J. Birt , Chantal Arsenault. 2013. Do 'green' buildings have better indoor environments? New evidence
- [13] Maedot S. Andargie. 2010. Valutazione della rumorosità degli impianti a funzionamento discontinuo secondo la norma UNI11367
- [14] Akram Syed Ali, Zachary Zanzinger, Deion Debose. 2016 .Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection
- [15] Platform JunHo Jo , ByungWan Jo , JungHoon Kim , SungJun Kim, and WoonYong Han. 2020. Development of an IoT-Based Indoor Air Quality Monitoring
- [16] Mehmet Ta,stan and Hayrettin Gökozan. 2019. Real-Time Monitoring of Indoor Air Quality with Internet of Things-Based E-Nose
- [17] Sonia Sgavicchia, Alessia Buggea, Giulia Bezzini. 2020. IL CAMBIAMENTO È NELL'ARIA Gaetana Iacobone Sonia Sgavicchia Alessia Buggea Giulia Bezzini
- [18] Max Paul Deuble. 2102. Green Occupants for Green Buildings
- [19] Gonçalo Marques. 2019. mHealth: Indoor Environmental Quality Measuring System for Enhanced Health and Well-Being Based on Internet of Things

- [20] Leah Zagreus, Charlie Huizenga, Edward Arens and David Lehrer. 2004. Listening to the occupants: a Web-based indoor environmental quality survey
- [21] Claude-Alain Roulet, Florentzos Florentzou, Flavio Philo Bluysen. 2006. Multicriteria analysis of health, comfort and energy efficiency in buildings
- [22] M. Frontczak, S. Schiavon, J. Goins, E. Arens, H. Zhang, P. Wargocki . 2011. Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design
- [23] Gabriel Sorin Fotache. 2019. Qualità dell'ambiente interno e comportamento energetico di un edificio adibito ad uffici
- [24] Peretti, Clara Schiavon, Stefano. 2011. Indoor Environmental Quality (IEQ)
- [25] Mark Allen and Mauro Overend. 2019. Can a building read your mind? Results from a small trial in facial action unit detection
- [26] Luna-Navarro A., Allen M., Meizoso M., Overend M. 2019. BIT – Building Impulse Toolkit: a novel digital toolkit for productive, healthy and resource efficient buildings
- [27] Jennifer A. Veitch, Kate E. Charles, Kelly M.J. Farley, Guy R. Newsham. 2007. A model of satisfaction with open-plan office conditions: COPE field findings
- [28] Philomena M. Bluysen, Myriam Aries, Paula van Dommelen. 2010 Comfort of workers in office buildings: The European HOPE project
- [29] Ioannis A. Sakellaris, Dikaia E. Saraga, Corinne Mandin, Céline Roda. 2016. Perceived Indoor Environment and Occupants' Comfort in European "Modern" Office Buildings: The OFFICAIR Study
- [30] David Simula. 2019. Qualità dell'aria e comfort termico in un edificio NZEB

**Sitografia:**

- [31] <http://www.arpa.vda.it/it>
- [32] <https://www.wellcertified.com>
- [33] <http://www.salute.gov.it/portale/home.html>
- [34] <https://www.portaleagentifisici.it>
- [35] <https://www.mise.gov.it>
- [36] [www.climatecontrolnews.com](http://www.climatecontrolnews.com)

**Normative:**

- [37] FprEN 16798-1:2018 – Energy performance of buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Module M1- 6
- [38] FprCEN/TR 16798-2:2018 – Energy performance of buildings – Part 2: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Module M1-6 – Technical report – Interpretation of the requirements in EN 16798-1
- [39] FprCEN16798-3:2018 - Energy performance of buildings - Part 3: Ventilation for non-residential buildings - Modules M5-1, M5-4 - Performance requirements for ventilation and roomconditioning systems

- [40] EN16798-4: 2018 Energy performance of buildings - Part 4: Ventilation for non-residential buildings - Performance requirements for ventilation, air conditioning and room-conditioning systems - Technical Report - Interpretation of the requirements in EN 16798-3
- [41] ISO 1996-2: 2017 - Acoustics — Description, measurement and assessment of environmental noise
- [42] UNI EN 15251:2008 – Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica
- [43] ASHRE ST55: 2017 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
- [44] UNI EN ISO 7730:2006 – Ergonomia degli ambienti termici – Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale
- [45] UNI EN 12464-1:2011 – Luce e illuminazione – Illuminazione dei posti di lavoro – Parte 1: Posti di lavoro in interni
- [46] UNI 10840:2007 – Luce e illuminazione – Locali scolastici – Criteri generali per l'illuminazione artificiale e naturale
- [47] UNI EN ISO 10052:2010 - Acustica - Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea, del rumore da calpestio e della rumorosità degli impianti - Metodo di controllo
- [48] UNI EN 13779:2008 - Ventilazione degli edifici non residenziali - Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione
- [49] UNI 10530-1997: Principi di ergonomia della visione. Sistemi di lavoro e illuminazione
- [50] UNI EN 12665 – 2004: Luce e illuminazione. Termini fondamentali e criteri per i requisiti illuminotecnici
- [51] UNI EN ISO 8996 – 2005: Ergonomia dell' ambiente termico - Determinazione del metabolismo energetico