



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi del comfort microclimatico degli edifici pubblici storici costituenti l'area Grande Miniera di Serbariu.

F. Poggi , S. Pili, E. Loria, C. Frau

ANALISI DEL COMFORT MICROCLIMATICO DEGLI EDIFICI PUBBLICI STORICI COSTITUENTI L'AREA GRANDE MINIERA DI SERBARIU

Francesca POGGI, Stefano PILI, Eusebio LORIA, Caterina FRAU

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Progetto: *Tecnologie e metodologie low carbon e Edifici a energia quasi zero (nZEB)*

Parte B: Edifici ad energia quasi zero (nZEB)

Tema A: Riqualificazione energetica di edifici con interventi di efficientamento

Obiettivo: a.2 Analisi del comfort microclimatico

Responsabile del Progetto: dott.ssa Franca Rita Picchia, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Tecnologie e metodologie Low Carbon e Edifici ad energia quasi zero (nZEB)*"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Paolo Deiana

Responsabile scientifico SOTACARBO: ing. Enrico Maggio

Si ringrazia il Comune di Carbonia per la condivisione di informazioni e per il permesso allo svolgimento delle attività.

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA PER L'ANALISI DELLA QUALITÀ DEGLI AMBIENTI INTERNI	7
3 ANALISI DI EDIFICI	12
4 ANALISI DELL'EDIFICIO SEDE DEL MUSEO DEI PALEO AMBIENTI SULCITANI.....	13
4.1 IL MUSEO DEI PALEO AMBIENTI SULCITANI	13
4.2 MONITORAGGIO INVERNALE	17
4.3 ESITO DEL MONITORAGGIO	29
4.4 MONITORAGGIO ESTIVO	32
4.5 ESITO DEL MONITORAGGIO	43
4.6 QUALITÀ PERCEPITA DEGLI AMBIENTI INTERNI – ANALISI SOGGETTIVA	46
4.7 COMFORT ILLUMINOTECNICO	47
4.8 VALUTAZIONE DEL COMFORT TERMICO: UN CASO SPECIFICO	49
5 ANALISI DEL MUSEO DEL CARBONE	57
5.1 IL MUSEO DEL CARBONE.....	57
5.2 IL SISTEMA IMPIANTISTICO.....	61
5.3 MONITORAGGIO INVERNALE	62
5.4 ESITO DEL MONITORAGGIO	76
5.5 MONITORAGGIO ESTIVO	78
5.6 ESITO DEL MONITORAGGIO	89
5.7 QUALITÀ PERCEPITA DEGLI AMBIENTI INTERNI – ANALISI SOGGETTIVA	92
5.8 COMFORT ILLUMINOTECNICO	93
6 CONCLUSIONI.....	94
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	97

Sommario

Il presente lavoro approfondisce l'attività già avviata nelle precedenti annualità [1,2] relativa alla qualità globale degli ambienti interni negli edifici. Diversi sono gli obiettivi: studiare i parametri che definiscono la qualità di un ambiente interno, studiare le metodologie di indagine in funzione degli obiettivi delle analisi ed infine analizzare l'influenza degli occupanti nella gestione dei parametri indoor.

Nel presente lavoro è presentata l'analisi del monitoraggio microclimatico in due edifici pubblici storici facenti parte del plesso della Grande Miniera di Serbariu, in Sardegna caratterizzati dallo stesso periodo di costruzione e aventi differenti destinazioni d'uso. Le misure sono state condotte durante la stagione invernale ed estiva del 2018 in diversi ambienti selezionati e rappresentativi delle diverse tipologie presenti nell'edificio. Sono state misurate le principali grandezze termo-igrometriche e ambientali ai fini della determinazione degli indici di comfort ambientale (PPD e PMV), in conformità alle norme UNI 7730, e UNI 15251. E' stata inoltre analizzata la concentrazione di CO₂ quale indicatore della qualità dell'aria (IAQ analysis). I risultati del monitoraggio consentiranno di avere un quadro completo del microclima indoor e andranno ad integrare quanto emerso dalla diagnosi energetica degli edifici, per la definizione di interventi di energy saving e di miglioramento del comfort interno.

1 Introduzione

Il Ministero dello Sviluppo Economico e l'ENEA hanno stipulato in data 21 Aprile 2016 l'Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2015-2017 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale. Questo lavoro si inserisce negli studi svolti in seno all'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Sotacarbo rivolto allo sviluppo di una ricerca dal titolo "PARTE B: Edifici ad energia quasi-zero" facente capo al piano annuale di realizzazione 2016 dell'Accordo di Programma MISE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, ed in particolare agli ambiti attinenti il Tema di Ricerca "Edifici a energia quasi zero (nZEB)", Progetto A "Riqualificazione energetica di edifici con interventi di efficientamento", Obiettivo a.2 "Analisi del comfort climatico".

Il lavoro, di prosecuzione dell'attività già avviata nelle precedenti annualità [1,2], persegue gli stessi obiettivi generali rivolti all'efficientamento del patrimonio pubblico. Lo sviluppo delle tecnologie per l'efficienza energetica, l'uso di tecnologie e la conoscenza di dati tipologici e dei consumi energetici degli edifici pubblici sono le principali azioni con le quali è possibile far fronte alla riduzione dei consumi termici e alla diminuzione della richiesta di energia elettrica nel settore. Le attività previste costituiscono una base finalizzata alla caratterizzazione del patrimonio edilizio pubblico insistente sulla Regione Sardegna, e allo sviluppo di una metodologia per interventi di efficienza energetica in edifici vincolati nel territorio del Sulcis.

Sulla base dei dati di Eurostat per il 2015 il comparto edilizio è responsabile del 39% del consumo finale di energia in Europa, mentre i trasporti, l'industria, l'agricoltura e gli altri settori rappresentano rispettivamente il 33,1%, 25,4%, 2% e 0,4% [3].

Considerando il patrimonio edilizio esistente ed il tasso di costruzione significativo, specialmente negli ultimi quarant'anni, si esplica in modo evidente il motivo per il quale venga data molta enfasi alla riduzione dell'energia con l'implementazione di misure, relative al risparmio energetico, attraverso l'uso di fonti energetiche rinnovabili, la progettazione integrata, la costruzione e la gestione degli edifici [4].

A livello europeo sono state favorite azioni comunitarie per la promozione della riduzione dei consumi in edilizia miranti ad accelerare le azioni di risparmio energetico e a ridurre le differenze tra i vari stati membri, attraverso la definizione di un quadro normativo di riferimento, in modo da coordinare gli interventi nel settore edilizio. Tali strategie sono culminate con l'introduzione obbligatoria del target di edifici ad energia quasi zero (nZEB) entro il 2021 [5,6], mirando, oltre al raggiungimento dell'ambizioso obiettivo energetico, a garantire condizioni di comfort elevato per gli occupanti tendente al miglioramento delle condizioni generali dell'ambiente [7,8].

La sostenibilità ambientale del patrimonio costruito risulta strettamente connessa al tema dell'efficienza energetica e del comfort microclimatico. Tuttavia spesso accade che il soddisfacimento di esigenze di comfort visivo, termico, acustico e di qualità dell'aria abbia implicazioni negative sulla domanda energetica per la climatizzazione e l'illuminazione artificiale. Risulta quindi indispensabile trovare un compromesso tra risparmio energetico e qualità dell'ambiente interno.

Realizzare interventi volti al miglioramento dell'efficienza energetica e delle condizioni di comfort risulta più complicato nel caso di edifici storici, ove vincoli di tipo architettonico ne possono impedire l'attuazione, incidendo sulla fattibilità tecnica ed economica delle misure individuate.

Il monitoraggio ambientale indoor può rappresentare dunque un valido strumento nell'individuazione di criticità nei consumi energetici legati al sistema edificio-impianto e secondariamente può essere utile al controllo dell'efficacia delle soluzioni messe in atto per la risoluzione di tali insufficienze. Può essere

considerato uno strumento a supporto della diagnosi energetica, della gestione efficiente degli impianti, dell'individuazione di comportamenti anomali e dell'informazione e sensibilizzazione dell'utente.

Sulla base di tali considerazioni si sono attrezzati alcuni edifici pubblici - ubicati nell'area della Grande Miniera di Serbariu, a Carbonia, risalenti alla prima metà del 900 ed attualmente adibiti a museo - con centraline di misura dotate di sensori di microclima interno (in termini di temperatura, umidità, concentrazione di CO₂), del tipo acquisito nel corso delle precedenti annualità, per la valutazione del comfort microclimatico. Tale studio, d'integrazione alla diagnosi energetica, stabilisce una baseline in vista della riqualificazione energetica degli edifici oggetto di studio.

In questo tipo di strutture accade molto spesso che le condizioni interne di comfort richieste per gli occupanti non siano adeguate per il mantenimento delle condizioni ottimali per la conservazione dei beni esposti e viceversa. A completamento dell'attività di studio prevista nell'estensione di contratto (ott.-dic 2018), si è proceduto ad attrezzare, durante la stagione estiva, uno dei due edifici con sensori di misura della temperatura e dell'umidità relativa all'interno delle teche e delle vetrine museali. L'elaborazione dei dati raccolti sarà trattata in un report dedicato.

2 Metodologia e strumentazione utilizzata per l'analisi della qualità degli ambienti interni

Gli argomenti che stanno alla base della qualità globale degli ambienti interni sono stati ampiamente descritti ed analizzati nei report delle precedenti annualità. Si riporta pertanto una trattazione sintetica delle metodologie e delle strumentazioni utilizzate per l'analisi.

Prendendo in considerazione le caratteristiche del sistema edificio-impianto e gli usi attuali osservati è stata definita un'attività di misura volta a determinare le condizioni di comfort interno delle aree utilizzate in maniera continuativa negli edifici indagati.

Ogni giornata di misurazione è stata preceduta da un approfondito sopralluogo conoscitivo di tutti gli ambienti di lavoro. Durante lo stesso, sono stati scelti solo gli spazi di lavoro maggiormente rappresentativi, dando priorità agli ambienti dove erano state segnalate o rilevate, nel corso della stagione di riferimento, delle possibili criticità correlate al comfort termico e/o alla qualità dell'aria indoor. La raccolta dati è avvenuta sia attraverso misurazioni termofisiche, con la determinazione di parametri diretti come temperatura dell'aria, umidità relativa, concentrazione di CO₂, illuminamento, sia attraverso indagini soggettive tramite questionari, consentendo in quest'ultimo caso la determinazione di parametri e caratteristiche indirette, come la percezione dell'ambiente termico negli spazi utilizzati.

Per la misura del comfort interno sono state adoperate le stazioni microclimatiche Grillo MMTS (Fig.1) equipaggiate dei seguenti sensori: *termo-igrometro* per la misura della temperatura e dell'umidità dell'aria; *globo-termometro* per il rilievo della temperatura media radiante delle pareti, *anemometro* per la misura della velocità e direzione dell'aria e un rilevatore della concentrazione di CO₂. La strumentazione è inoltre dotata di un sistema di acquisizione dati, alimentato a batteria, in grado di registrare le misure e di trasmetterle mediante collegamento di rete GSM/GPRS, consentendo la lettura ed il controllo dei dati in corso mediante accesso remoto via web.



Figura 2.1. Centralina Grillo MMTS



Figura 2.2. Sonda termoigrometrica

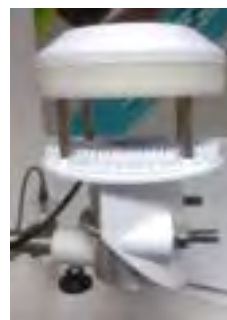


Figura 2.3. Sonda anemometrica

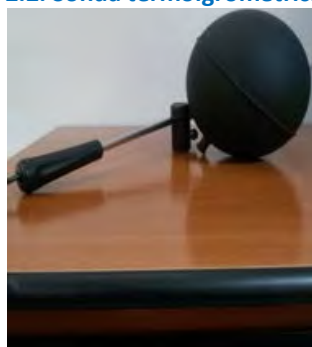


Figura 2.4. Sonda globotermometrica



Figura 2.5. Sensore CO₂

Una sensoristica più semplice è stata adoperata per monitorare le grandezze termo-igrometriche (T, UR) in esterno ed in interno.



Figura 2.6. Sensori utilizzati per misure di temperatura e umidità all'interno ed all'esterno.

Per il posizionamento delle centraline negli ambienti monitorati si è tenuto conto dei seguenti fattori:

- Disposizione dei dipendenti negli spazi di lavoro;
- Presenza di superfici verticali fredde o calde quali le aperture;
- Facilità di collocazione della strumentazione.

Le misurazioni sono state effettuate in alcune settimane rappresentative della stagione invernale ed estiva. La stazione ha registrato 24/24 h in modo da rilevare il variare dei parametri climatici interni.

La combinazione tra i parametri ambientali, ricavati con la stazione microclimatica (temperatura dell'aria, temperatura radiante, umidità relativa e velocità dell'aria), e i due parametri soggettivi (coefficiente di attività metabolica (Met), coefficiente di resistenza termica dovuta all'abbigliamento (CLO)) ha consentito il calcolo degli indici di Fanger, Voto medio Previsto (PMV) e la Percentuale di insoddisfatti (PPD) (Fanger P.O., "Moderate Thermal Enviroments Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort", 1984).

Tenendo conto dei diversi periodi in cui è stato condotto il monitoraggio, in tabella 2.1. sono riportati i valori dei parametri fisiologici (metabolismo e resistenza termica dell'abbigliamento) assunti per i calcoli effettuati:

Tabella 2.1. Valori del coefficiente di attività metabolica e della resistenza termica all'abbigliamento utilizzati a seconda della stagione di riferimento.

Stagione	CLO	Met (attività sedentaria – ufficio)	Met (attività leggera)
Inverno	1	1,2	1,6
Primavera	0,7	1,2	1,6
Estate	0,5	1,2	1,6

Questi indici, basati sulla teoria del bilancio termico del corpo umano, e supportati da studi statistici rappresentano un approccio consolidato e ad essi si rifanno le principali normative tecniche in materia quali la UNI 7730, UNI 15251.

Secondo la Normativa ISO 7730, che recepisce il criterio di qualificazione di un ambiente mediante la percentuale di insoddisfatti, le condizioni di comfort sono quelle riportate nelle tabelle 2.2.-2.3. – una volta fissate le condizioni di attività e di abbigliamento delle persone.

Tabella 2.2. Condizioni di comfort invernale

Inverno (1 clo, 1,2 met)	
Variabile	Condizione
Temperatura operativa	20-24 °C
Gradiente verticale temperatura aria	Max 3°C tra 0,1 e 1,1 m
Asimmetria temperatura radiante	Max 10°C orizzontali Max 5°C verticali
Velocità dell'aria	Max 0,15 m/s
Temperatura del pavimento	19-29

Tabella 2.3. Condizioni di comfort estivo

Estate (0,5 clo, 1,2 met)	
Variabile	Condizione
Temperatura operativa	23-25 °C (con UR 50%)
Gradiente verticale temperatura aria	Max 3°C tra 0,1 e 1,1 m
Velocità dell'aria	Max 0,25 m/s

In base ai valori degli indicatori PMV e PPD ottenuti, è possibile dare una valutazione sul benessere termigrometrico dell'ambiente monitorato, mediante la scala di sensazione termica percepita dagli occupanti (UNI 7730) (Tab. 2.4.):

Tabella 2.4. Scala di valutazione dell'ambiente termico

PMV	PPD %	VALUTAZIONE AMBIENTE TERMICO
3	100	Molto caldo
2	75,7	Caldo
1	26,4	Leggermente caldo
0,85	20	Ambiente termicamente accettabile
+0,5 < PMV < -0,5	<10	Benessere termico
-0,85	20	Ambiente termicamente accettabile
-1	26,8	Leggermente freddo
-2	76,4	Freddo
-3	100	Molto freddo

La norma UNI 15251 si rifà al metodo PMV/PPD ed ai fattori di discomfort locale della UNI 7730:2006, introducendo una quarta categoria alle tre già previste dalla classificazione della UNI 7730 (Tab. 2.5.) sull'accettabilità termica in base al PMV/PPD.

Tabella 2.5. Classi di comfort termico globale secondo le norme UNI EN ISO 7730 (Classi A, B, C) e UNI EN 15251 (Classi I, II, III, IV).

Grandezza	Condizione			
	Classe A(I)	Classe B(II)	Classe C(III)	Classe IV
PMV	-0,20 ÷ 0,20	-0,50 ÷ 0,50	-0,70 ÷ 0,70	
PPD	< 6%	< 10%	< 15%	≥ 15%

Oltre agli indici di comfort è stata determinata la temperatura operante (T_{op}), considerata un buon indicatore del livello di comfort percepito dagli utenti in quanto tiene conto sia degli scambi convettivi (h_c) con l'aria circostante che di quelli radiativi (h_r).

$$T_{op} = \frac{h_r t_{mr} + h_c t_a}{h_r + h_c}$$

Per valori della velocità dell'aria negli ambienti monitorati inferiori ai 0,2 m/s, il calcolo della temperatura operativa si semplifica con la seguente formula:

$$T_{op} = \frac{t_a + t_{mr}}{2}$$

Le principali norme tecniche sul microclima interno, pur non tenendo conto di alcuni importanti parametri individuali come per esempio il vestiario ed il dispendio metabolico derivante dal tipo di attività svolta, né suggeriscono l'uso (ASHRAE, 2009). Per gli ambienti moderati sono stati identificati, in base alla stagione, dei range di valori di temperatura operativa in grado di assicurare la soddisfazione termica per almeno il 90% delle persone occupanti l'ambiente (Tab. 2.6.).

Tabella 2.6. Valori di Top consigliati dalla UNI EN ISO 7730 (per un'attività di tipo leggera o sedentaria svolta in ufficio).

Stagione Top (range di accettabilità)	
Inverno	20÷24 °C
Estate	23÷26 °C

Si è inoltre indagato sulla verifica del livello di illuminazione presente negli ambienti rispetto ai limiti richiesti dalla normativa per le diverse attività svolte. La normativa di riferimento, per gli ambienti interni, è la UNI EN 12464-1 che specifica i requisiti illuminotecnici per i posti di lavoro che corrispondono alle esigenze di comfort e di prestazione visiva.

Tabella 2.7. UNI EN 12464-1 Illuminazione dei posti di lavoro. Parte 1: posti di lavoro in interno-uffici.

Tipo di interno compito o attività	E_m lux	UGR _L	R _a	Note
Archiviazione, copiatura	300	19	80	
Scrittura, dattilografia, lettura, elaborazione dati	500	19	80	
Disegno tecnico	750	16	90	
Postazioni CAD	500	19	80	
Sale conferenze e riunioni	500	19	80	L'illuminazione deve essere regolabile
Ricezione (reception)	300	22	80	
Archivi	200	25	80	

I rilievi delle misure di intensità di illuminazione sono stati condotti adoperando il luxmetro della ditta Testo (Fig. 2.7.).



Figura 2.7. Luxmetro – Testo (Modello 545).

3 Analisi di edifici

Nei capitoli successivi 4 e 5 vengono presentati alcuni casi studio affrontati durante questa annualità sulla base dei concetti e delle tecniche descritti nei precedenti capitoli.

Per analizzare le tematiche del comfort termico, illuminotecnico, della gestione e salubrità (salute e benessere degli occupanti) e le loro reciproche connessioni negli edifici residenziali è stata analizzata la qualità degli ambienti interni in edifici non residenziali.

In particolare sono stati approfonditi i temi del benessere indoor, qualità dell'aria, salubrità, in due edifici storici pubblici aventi differenti destinazioni d'uso.

4 Analisi dell'edificio sede del museo dei Paleo Ambienti Sulcitani

4.1 Il museo dei Paleo Ambienti Sulcitani

L'edificio in cui ha sede il museo, è situato nei locali appositamente riconvertiti del padiglione delle ex Officine meccaniche della Grande Miniera di Serbariu, collocata nella periferia sud occidentale dell'abitato di Carbonia. L'organismo edilizio si struttura come un corpo principale rettangolare a due livelli, con asse maggiore orientato a NE-SO e due ali laterali ad un solo livello disposti a formare una pianta quadrata che delimita una corte interna. Il corpo di fabbrica principale è caratterizzato da copertura a falde mentre gli ambienti laterali, ad un livello, hanno copertura piana distinta dalla presenza di due lucernai.

La struttura è esposta su tre lati orientati rispettivamente a NO, NE e SO, mentre sul lato SE, confina con un adiacente corpo di fabbrica di dimensioni maggiori ed a più livelli.

Le pareti verticali sono realizzate in muratura lapidea. Il materiale predominante è la trachite rossa, caratterizzata da alta porosità e leggerezza. Le coperture orizzontali sono di tipo latero cementizio, mentre gli ambienti *museo1* e *sala alberi* hanno la copertura in legno lamellare.

La superficie totale è di 1740 m², dei quali circa 1050 m² destinati al percorso espositivo e alle attività didattiche.

Il profilo di uso attuale dell'edificio è caratterizzato da una forte discontinuità e da un flusso di utenza molto basso. In particolare, nella stagione invernale si registra la presenza continuativa di 2-3 dipendenti, un limitatissimo flusso di visitatori ed il saltuario utilizzo di alcuni ambienti per visite guidate ed attività didattiche, attività congressuali e mostre temporanee. Di contro nella stagione estiva il numero di visitatori cresce esponenzialmente e di conseguenza è richiesto un maggior numero di lavoratori.

L'unica categoria di utenti caratterizzata da una presenza continua è quella relativa ai dipendenti del museo, che utilizzano quasi esclusivamente gli ambienti degli uffici e dell'ingresso, che hanno un profilo di presenza coincidente con gli orari di apertura della struttura.

Vista l'attività sedentaria di ufficio ed i requisiti dei locali di lavoro deve essere garantito un buon livello di comfort interno negli ambienti.

Tra le aree accessibili al pubblico solo la zona espositiva principale (*museo1*) è priva di impianti di climatizzazione. Le sale museali (*museo2-3*, *sala alberi bianchi*, *darwin*) sono aperte e visitabili durante gli orari di apertura del museo, il sistema di illuminazione è sempre attivo e gli impianti di climatizzazione vengono avviati solo in presenza di eventi o attività didattiche.

Gli ambienti *ufficio2* e *l'archivio* vengono anche utilizzati da una associazione di geologi e speleologi con un profilo di presenza saltuario, stimato sulla base delle indicazioni degli utenti abituali, in 1-2 persone per poche ore al mese (5h).

La sala degli alberi bianchi resta attualmente chiusa durante il periodo estivo a causa delle alte temperature raggiunte.

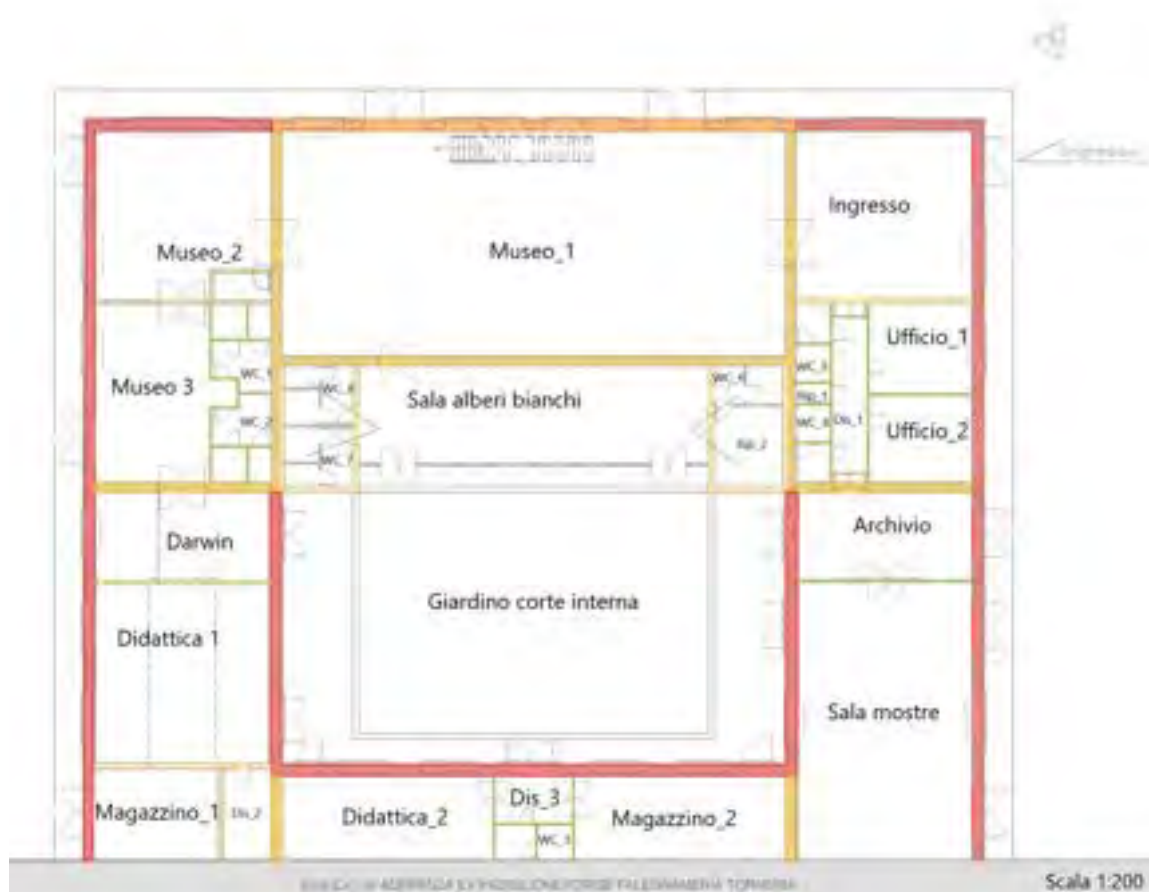


Figura 4.1.1. Planimetria piano terra - museo Paleo Ambienti Sulcitani.



Figura 4.1.2. Planimetria piano primo - museo Paleo Ambienti Sulcitani.

Tabella 4.1.1 Profilo di utilizzo degli ambienti del PAS in base alle tipologie di utenti e al tipo di attività svolta.

Utente	Ambienti utilizzati	Tipo attività	Presenza	Fonte dei dati
Lavoratori Museo	Ingresso, Ufficio 1, bagni	Attività sedentaria	Continua	Orario ufficiale di apertura
Addetto manutenzione	tutti	Attività fisica lieve	Periodica	Ore settimanali
Gruppo Speleo	Ufficio_2, Archivio	Attività sedentaria	Saltuaria	Interviste
Visitatori del Museo	Ingresso, Museo 1, Museo 2, Museo 3, Darwin, Sala alberi	Cammino	Saltuaria	Registro delle presenze
Partecipanti ad Attività Congressuali	Museo 2	Attività sedentaria	Saltuaria	Registro delle attività
Visitatori di mostre temporanee	Sala_mostre	Cammino	Saltuaria	Registro delle attività
Partecipanti attività didattiche per studenti	Didattica 1	Attività sedentaria	Saltuaria	Registro delle attività



Figura 4.1.3. Prospetto NE - Museo PAS.



Figura 4.1.4. Prospetto NO – museo PAS.

Sulla base degli usi dell'edificio e delle categorie di utenti individuate si è proceduto con la valutazione delle condizioni di qualità degli ambienti attualmente riscaldati e degli spazi espositivi principali durante l'utilizzo ordinario dell'ambiente, sia nella stagione estiva che in quella invernale.

Nello specifico i rilievi effettuati hanno riguardato:

- Misure microclimatiche (T , UR , v_a , T_{mr} , CO_2) negli ambienti attualmente riscaldati (*ingresso, ufficio1*);
- Misure di T , UR , v_a , T_{mr} , CO_2 nelle zone espositive non riscaldate (*museo1, sala alberi bianchi*);
- Misure microclimatiche nella *sala mostre* durante l'inaugurazione di un evento;

4.2 Monitoraggio invernale

Nel lavoro sono presentati i risultati di una campagna sperimentale effettuata presso alcuni locali del museo dei Paleo Ambienti di Carbonia, al fine di valutare le condizioni di comfort microclimatico secondo l'approccio tradizionale (ISO 7730). Il rilievo invernale è stato condotto nel periodo che va dal primo al sesto giorno del mese di marzo 2018, sia nelle zone caratterizzate da un uso continuativo da parte dei dipendenti (*ufficio1* e *ingresso*) che in quelle di maggior pregio dello spazio espositivo (*museo1*).

Gli ambienti utilizzati dai dipendenti, attualmente sono riscaldati tramite stufe elettriche ad aria calda e ad irraggiamento a causa dell'impianto di climatizzazione non funzionante.

Con l'utilizzo delle centraline microclimatiche Grillo MMTS è stato possibile osservare l'evoluzione temporale delle principali grandezze ambientali indoor (temperatura e umidità relativa dell'aria, temperatura del globo termometro, velocità e direzione delle correnti d'aria e concentrazione di CO₂).

I dati caratteristici degli ambienti e l'ubicazione delle apparecchiature adoperate sono riportati rispettivamente alle tab 4.2.2-4.2.1.

Tabella 4.2.1. Strumentazione adoperata per il monitoraggio ambientale negli ambienti oggetto di studio.

Ambienti monitorati	Esposizione	Ombreggiamento	Centraline microclimatiche indoor				Tinytag	Indici PMV e PPD
			C1	C2	C3	C4		
Ingresso	NE- NO	no		x				x
Museo 1	NO	no	x					
Sala alberi	SE	no			x			
Ufficio 1	NE	no				x		x

Tabella 4.2.2. Dati caratteristici degli ambienti.

Ambienti monitorati	n° occupanti	S _{utile} [m2]	V _{utile} [m3]	N. finestre	Telaio	Schermature	Tipo di vetro
Ingresso	2 - 4	80,75	314,93	2	legno	tende a rullo verticali	doppio
Museo 1	2 - 4	304,32	2647,58	13	legno	tende a rullo verticali	doppio
Sala alberi	variabile	91,86	381,22	1	legno	tende a rullo verticali	doppio
Ufficio 1	variabile	25,84	73,9	1	legno	cartoncino nero	doppio
WC_1	variabile	3,42	9,8	-	-	-	-

Le chiusure verticali presenti negli spazi monitorati, sono caratterizzate da un buono stato di conservazione, tuttavia, quelle con i battenti di dimensioni maggiori (*ingresso*), presentano problematiche in apertura e chiusura, a causa del parziale cedimento delle cerniere, rendendo così difficoltosa la regolazione del clima interno tramite ventilazione naturale specialmente nel periodo estivo.

Nessun infisso è dotato di schermature solari esterne, le finestre dell'area espositiva sono provviste di schermature interne parzialmente oscuranti realizzate con tende a rullo verticali in materiale plastico. In altre finestre sono state posizionate delle schermature provvisorie parzialmente oscuranti realizzate con del cartoncino nero applicato nella parte interna del vetro (*ufficio1*).

Nello specifico, due stazioni microclimatiche sono state posizionate nei pressi delle postazioni di lavoro dell'*ingresso* e del locale *ufficio1*.



Figura 4.2.1. Ufficio 1

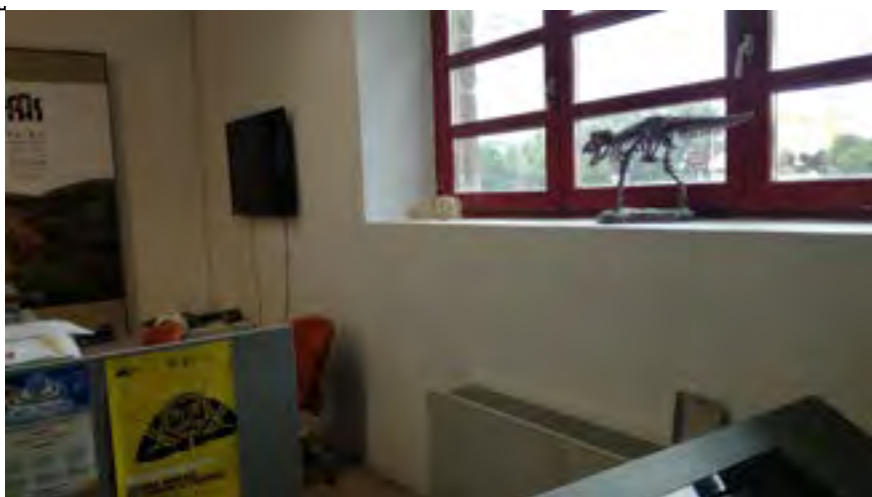


Figura 4.2.2. Ingresso

Un'altra stazione microclimatica è stata posizionata nella sala espositiva principale (*museo1*) che non è attualmente servita da impianti di climatizzazione e si caratterizza da ampi volumi su due livelli calpestabili. L'ultima stazione è stata posizionata nella *sala degli alberi bianchi* per studiare il comportamento termico dell'ambiente che si configura come una serra solare.



Figura 4.2.3. Museo 1



Figura 4.2.4. Sala alberi bianchi

In questo modo si è proceduto a valutare gli indici di benessere PMV e PPD negli ambienti adibiti ad uso ufficio ed ingresso dell'edificio. Le misure sono state ottenute nelle reali condizioni operative degli ambienti oggetto di studio, dal lunedì alla domenica nelle ore lavorative 10:00 – 16:00, assumendo - con riferimento alla stagione invernale - valori fissi di resistenza termica all'abbigliamento e di tasso metabolico rispettivamente pari a 1 clo e a 1,2 met .

I dati sono stati registrati ad intervalli temporali di 15 minuti e la misura ottenuta fornisce un valore istantaneo di massima, di minima e di media, riferito a ciascuna variabile misurata. Si precisa che per i calcoli effettuati si è sempre utilizzata la misura media.

In parallelo al monitoraggio dei parametri microclimatici indoor sono state misurate le principali grandezze climatiche esterne: temperatura ed umidità relativa. Il meteo nella prima settimana di marzo evidenzia condizioni instabili caratterizzate per lo più da nubi sparse e da discontinue precipitazioni (tab. 4.2.3).

Tabella 4.2.3. Condizioni meteorologiche 01 - 06 mar 2018 - meteo.it

Condizioni meteo								
Periodo monitoraggio	Fenomeni	T min (°C)	T max (°C)	Ur _{min} (%)	Ur _{max} (%)	V _{media} (km/h)	V _{max} (km/h)	
01-mar	 nubi sparse	7	21	73	93	9	17	
02-mar	 poco nuvoloso	10	18	63	93	20	35	
03-mar	 pioggia e schiarite	8	19	77	100	17	41	
04-mar	 pioggia debole	10	16	77	93	9	18	
05-mar	 pioggia e schiarite	11	17	87	100	16	35	
06-mar	 nubi sparse	10	18	77	93	17	33	

L'andamento dei dati è riportato nella grafica sottostante (fig. 4.2.5) ed in modo sintetico in tab 4.2.4. Nell'intervallo di tempo considerato (10:00 – 16:00) la temperatura media esterna non ha subito importanti variazioni con minime di circa 12 – 15 °C registrate in tarda mattina e massime di circa 15 – 16 °C, con un $\Delta T_{e_{max}} < 4$ °C. La giornata più calda è quella del 1 marzo in cui la temperatura esterna ha raggiunto i 20 °C nell'ora di punta (h 14:00) mentre quella più fredda è del 5 marzo con una $T_{e_{max}}$ di 14,7 °C. Si osserva, globalmente, che l'umidità relativa ha subito variazioni percentuali inferiori al 20%.

Tabella 4.2.4. Valori minimi e massimi della temperatura e dell'umidità relativa esterna.

Periodo monitoraggio	Time	$T_{e_{min}}$ (°C)	URe_{max} (%)	Time	$T_{e_{max}}$ (°C)	URe_{min} (%)
	h 10:00 – 16:00			h 10:00 – 16:00		
01-mar	11:00	16,1	63,2	14:30	20,9	51,2
02-mar	16:00	15,2	70,3	13:00	16,6	61,2
03-mar	10:00	14,9	88,9	14:30	17	73,9
04-mar	10:30	12,7	80,4	13:00	16,6	60
05-mar	12:00	13	93,6	13:00	14,7	81,8
06-mar	10:00	12,3	88,3	14:30	15,6	67,9

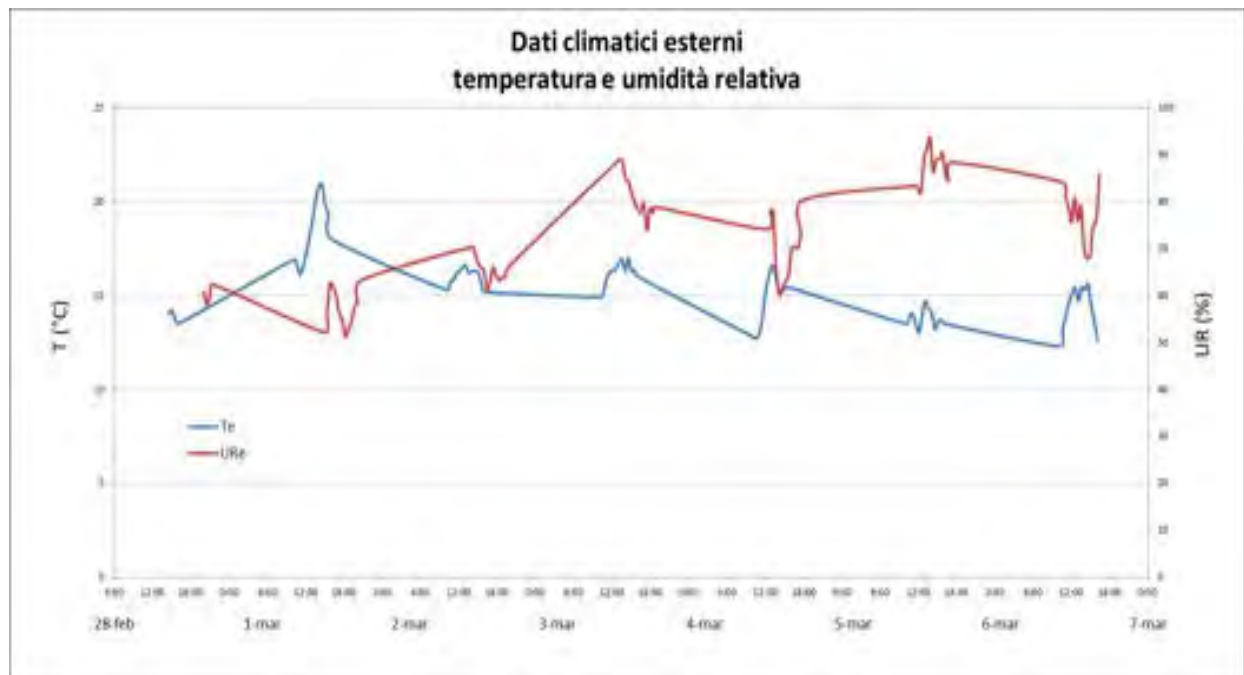


Figura 4.2.5. Andamento dei dati climatici esterni – 01/3/18 – 06/3/18.

Nelle tabelle seguenti sono riportati, per i vari ambienti esaminati, i dati medi delle variabili indoor calcolati nell'orario di occupazione e i parametri statistici delle grandezze misurate. I profili orari delle variabili indoor e outdoor sono illustrati nelle Fig 4.2.6 – 4.2.7 – 4.2.8 – 4.2.9 – 4.2.10.

Tabella 4.2.5. Valori medi giornalieri - Ingresso

Ingresso					
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	T_rad (°C)	UR_aria (%)	V_aria (m/s)	Posizionamento centraline (x)
01/03/2018	16,06	16,38	59,23	0,058	
02/03/2018	16,06	16,55	63,44	0,047	
03/03/2018	16,52	16,86	59,20	0,043	
04/03/2018	16,18	16,56	64,34	0,048	
05/03/2018	17,36	17,14	59,68	0,052	
06/03/2018	14,70	15,16	58,73	0,054	

Tabella 4.2.6. Valori medi giornalieri – Museo 1

Museo 1					
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	T_rad (°C)	UR_aria (%)	V_aria (m/s)	Posizionamento centraline (x)
01/03/2018	14,30	14,65	58,73	0,038	
02/03/2018	15,06	15,39	63,9	0,029	
03/03/2018	15,51	15,88	65,59	0,022	
04/03/2018	15,39	15,71	63,33	0,038	
05/03/2018	16,18	16,58	64,42	0,027	
06/03/2018	15,81	16,16	66,31	0,035	

Tabella 4.2.7. Valori medi giornalieri – Sala alberi bianchi

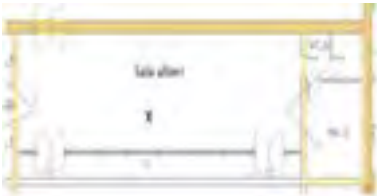
Sala alberi					
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	T_rad (°C)	UR_aria (%)	V_aria (m/s)	Posizionamento centraline (x)
01/03/2018	17,765	18,667	48,741	0,037	
02/03/2018	21,453	23,175	44,655	0,043	
03/03/2018	18,905	19,849	56,308	0,028	
04/03/2018	17,465	17,948	55,463	0,038	
05/03/2018	17,702	18,228	60,376	0,036	
06/03/2018	21,348	22,551	49,262	0,027	

Tabella 4.2.8. Valori medi giornalieri – Ufficio 1

Ufficio 1					
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	T_rad (°C)	UR_aria (%)	V_aria (m/s)	Posizionamento centraline (x)
01/03/2018	15,727	16,053	55,639	0,073	
02/03/2018	16,053	16,392	59,832	0,058	
03/03/2018	16,488	16,759	63,858	0,069	
04/03/2018	17,781	18,121	56,071	0,062	
05/03/2018	16,65	16,999	63,255	0,061	
06/03/2018	17,086	17,335	60,922	0,068	

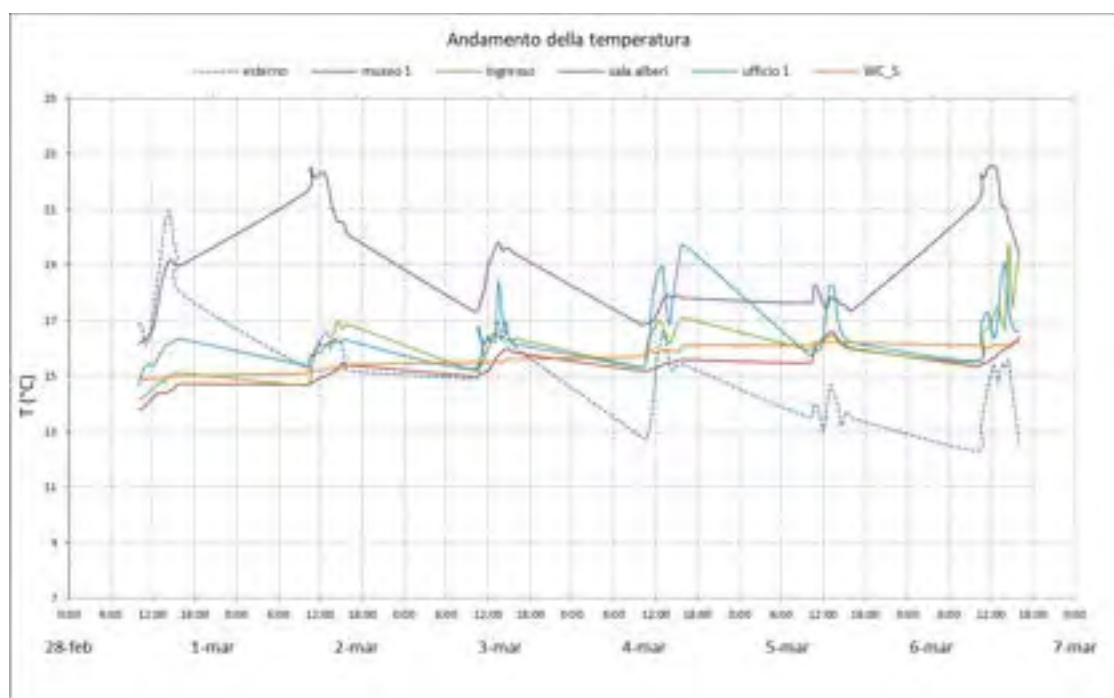


Figura 4.2.6. Profilo di temperatura all'esterno e all'interno degli ambienti del museo PAS – 01/3/18 – 6/3/18.

Tabella 4.2.9. Statistica delle variabili di temperatura

	Temperatura (°C)	
	Media	Deviazione standard σ
Museo 1	15,1	0,71
Ingresso	15,44	0,89
Sala alberi	17,47	1,51
Ufficio 1	15,74	0,91

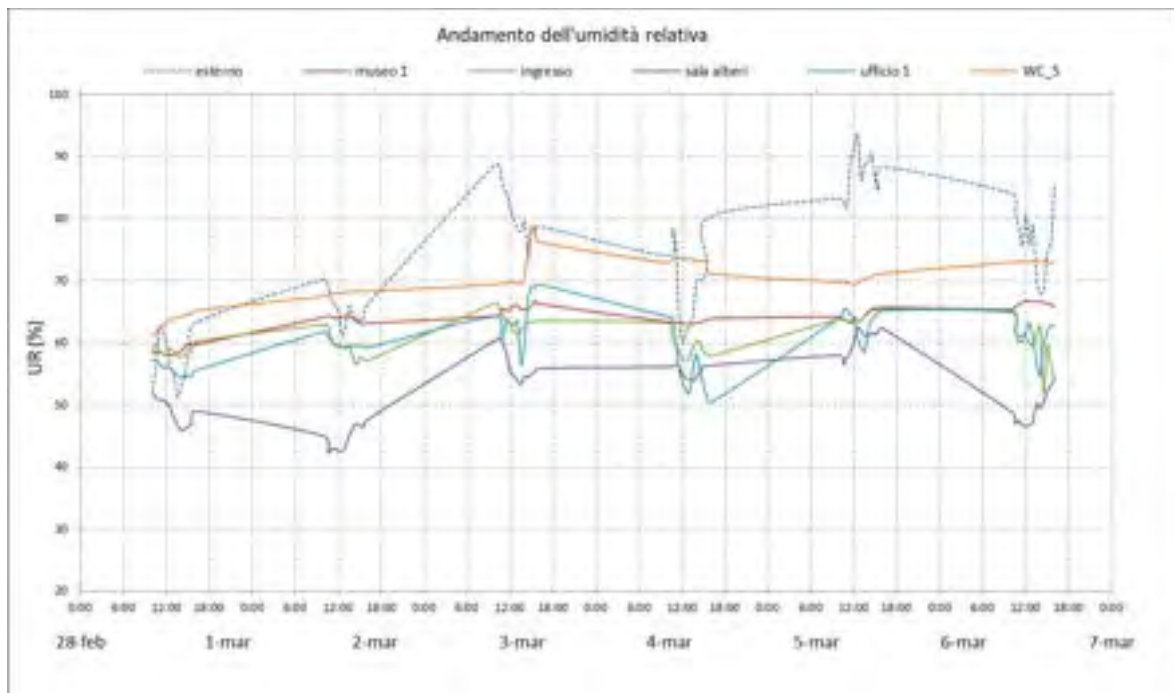


Figura 4.2.7 Profilo di umidità all'esterno e all'interno degli ambienti del museo dei Paleo Ambienti Sulcitani – 01/3/18 – 06/3/18.

Tabella 4.2.10. Statistica delle variabili di umidità relativa

	Umidità relativa (%)	
	Media	Deviazione standard σ
Museo 1	63,60	2,64
Ingresso	62,15	2,98
Sala alberi	56,33	5,36
Ufficio 1	61,24	4,45

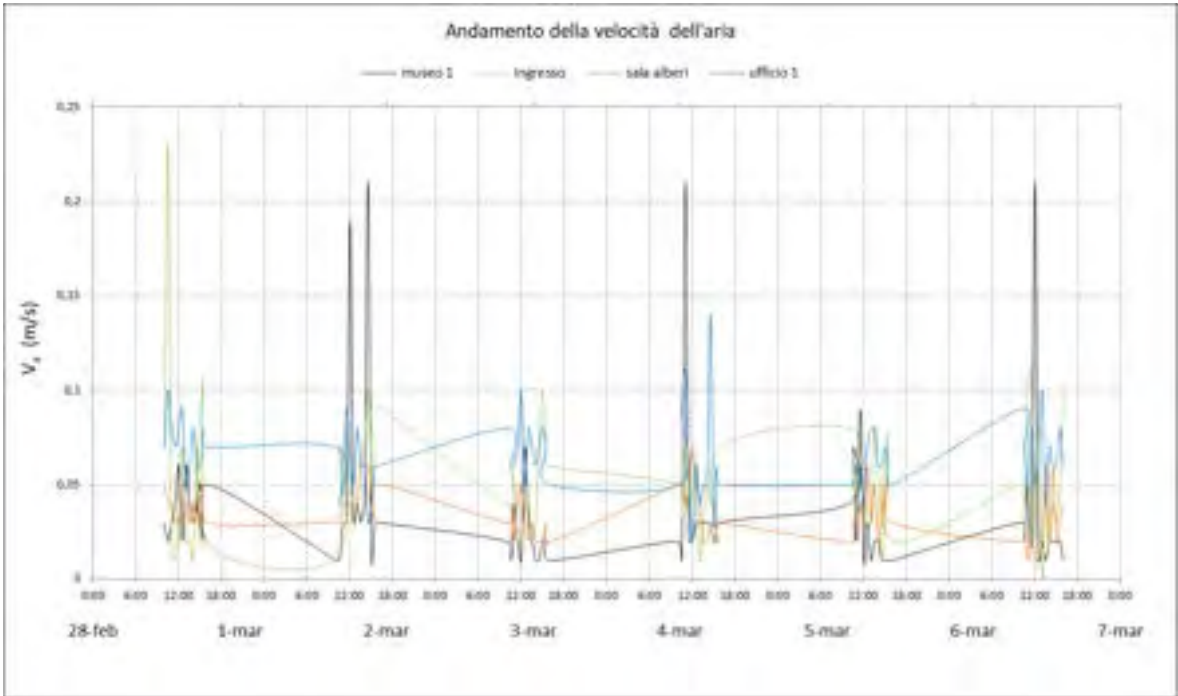


Figura 4.2.8. Andamento della velocità nei locali del museo dei Paleo Ambienti Sulcitani – 01/3/18 – 06/3/18.

Tabella 4.2.11. Statistica delle variabili della velocità dell'aria

	Velocità dell'aria (m/s)	
	Media	Deviazione standard σ
Museo 1	0,03	0,03
Ingresso	0,05	0,03
Sala alberi	0,04	0,01
Ufficio 1	0,07	0,02

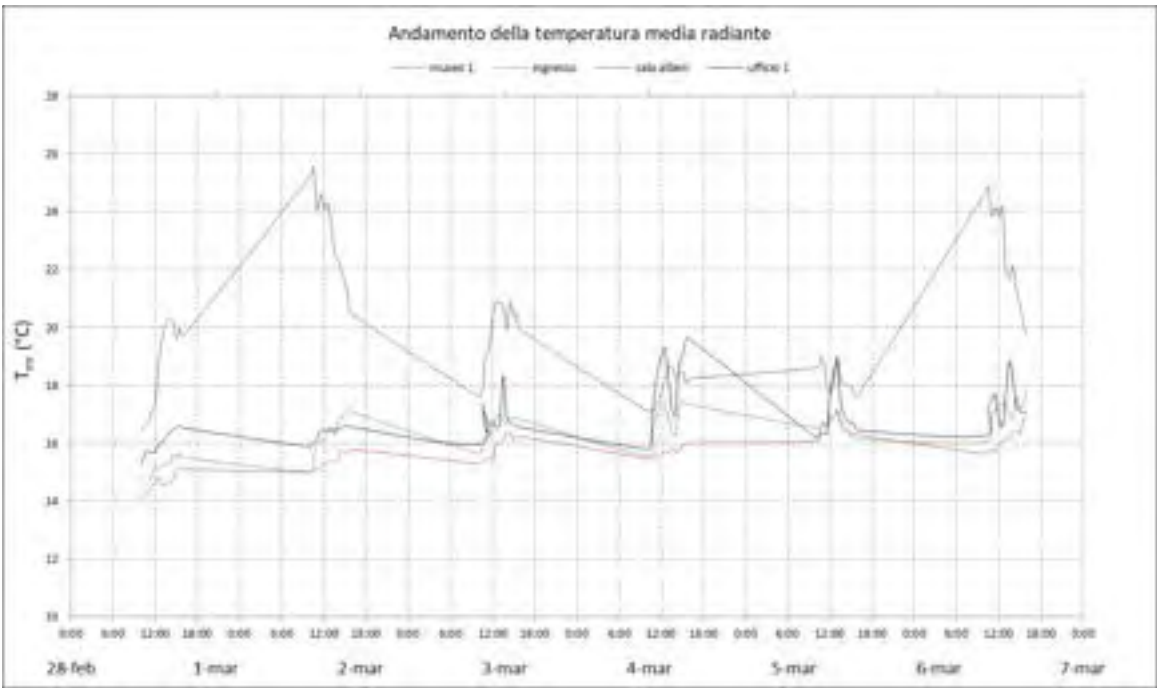


Figura 4.2.9. Andamento della temperatura radiante nei locali del museo PAS – 01/3/18 – 06/3/18

Tabella 4.2.12. Statistica delle variabili della temperatura radiante

	Temperatura radiante (°C)	
	Media	Deviazione standard σ
Museo 1	15,35	0,74
Ingresso	15,65	0,86
Sala alberi	17,87	2,02
Ufficio 1	16,10	0,85

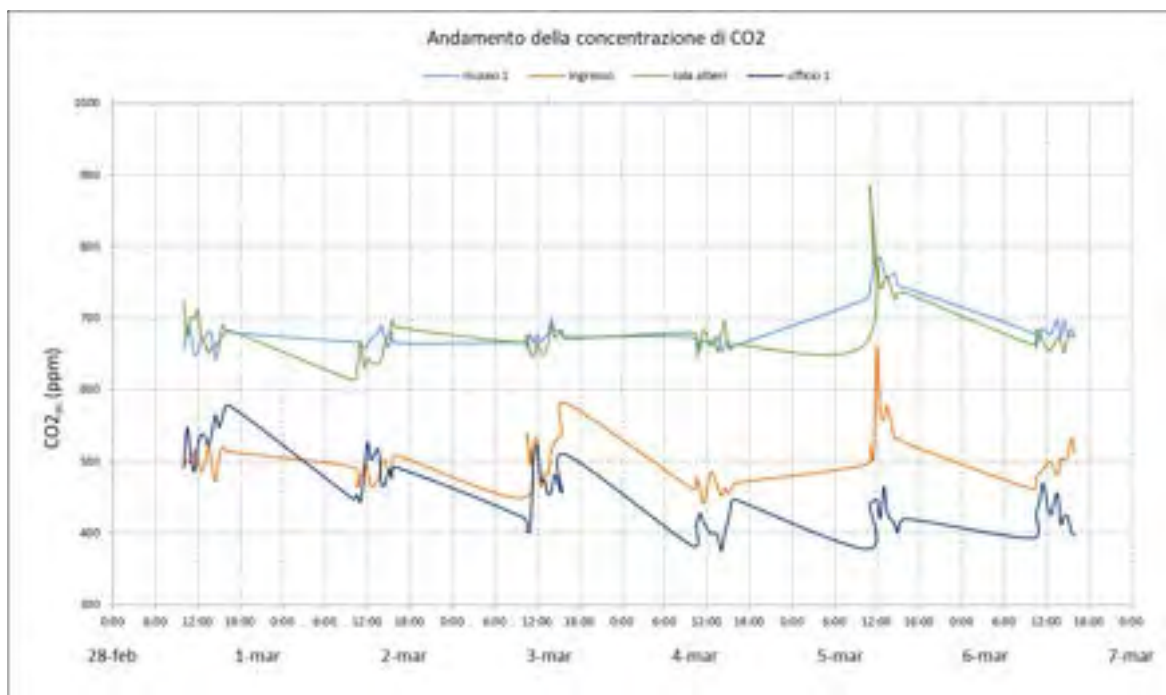


Figura 4.2.10. Andamento della concentrazione di anidride carbonica negli ambienti del museo PAS - 01/3/18 – 06/3/18.

Tabella 4.2.13 Valori medi giornalieri di concentrazione di CO₂ negli ambienti del PAS.

Periodo monitoraggio	CO ₂ (ppm)			
	Museo 1	Ingresso	Sala alberi	Ufficio 1
01/03/2018	668,83	500,83	680,58	530,83
02/03/2018	670,25	487,42	652,92	480,42
03/03/2018	675,08	511,5	665,75	463,92
04/03/2018	664,08	464,83	668,25	410,17
05/03/2018	754,36	544,73	752,46	424,91
06/03/2018	680,46	495,73	669,82	424,82

Tabella 4.2.14 Statistica delle variabili della concentrazione di anidride carbonica.

	Concentrazione di CO ₂ (ppm)	
	Media	Deviazione standard σ
Museo 1	677,18	26,08
Ingresso	475,28	86,93
Sala alberi	685,52	26,48
Ufficio 1	429,59	46,27

Nelle figure seguenti è riportata la variazione degli indici PMV e PPD per gli ambienti *ufficio1* e *ingresso*.

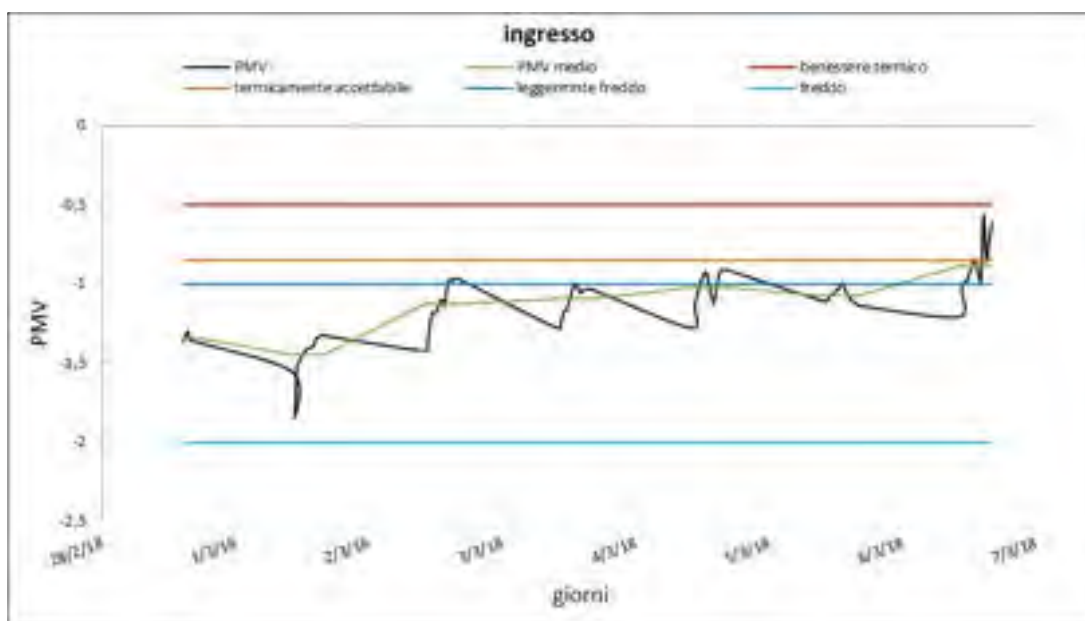


Figura 4.2.11. Andamento del voto medio previsto nel locale ingresso – Periodo 1 – 6 mar 2018.



Figura 4.2.12. Andamento del voto medio previsto nel locale ufficio 1 – Periodo 1 – 6 mar 2018.

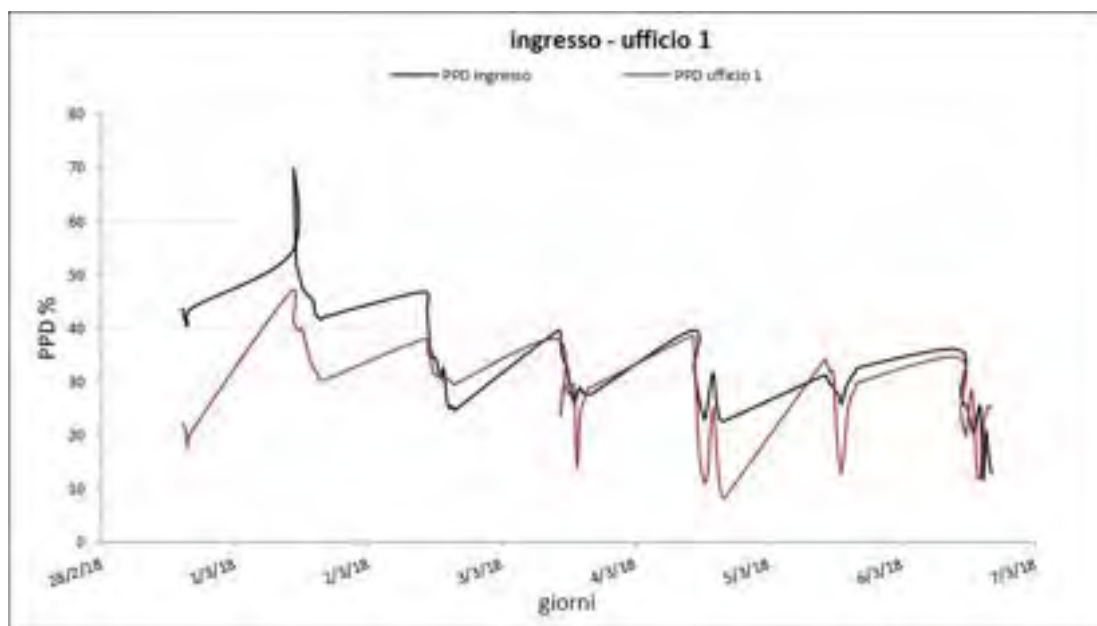


Figura 4.2.13. Andamento della percentuale degli insoddisfatti nei locali *ingresso* e *ufficio 1* – Periodo 1 – 6 mar 2018.

Oltre agli indici di comfort è stata determinata la temperatura operante (T_{op}), considerata un buon indicatore del livello di comfort percepito dagli utenti. Essendo la velocità dell'aria degli ambienti interni monitorati inferiore allo 0.2 m/s la 1 la temperatura operante può essere valutata come media ponderata tra la temperatura dell'aria e della temperatura media radiante.

$$T_{op} = \frac{t_a + t_{mr}}{2}$$

Nelle figure che seguono è mostrato l'andamento della variabile e il suo valore medio, rispettivamente per la zona *ufficio1* e *ingresso*.

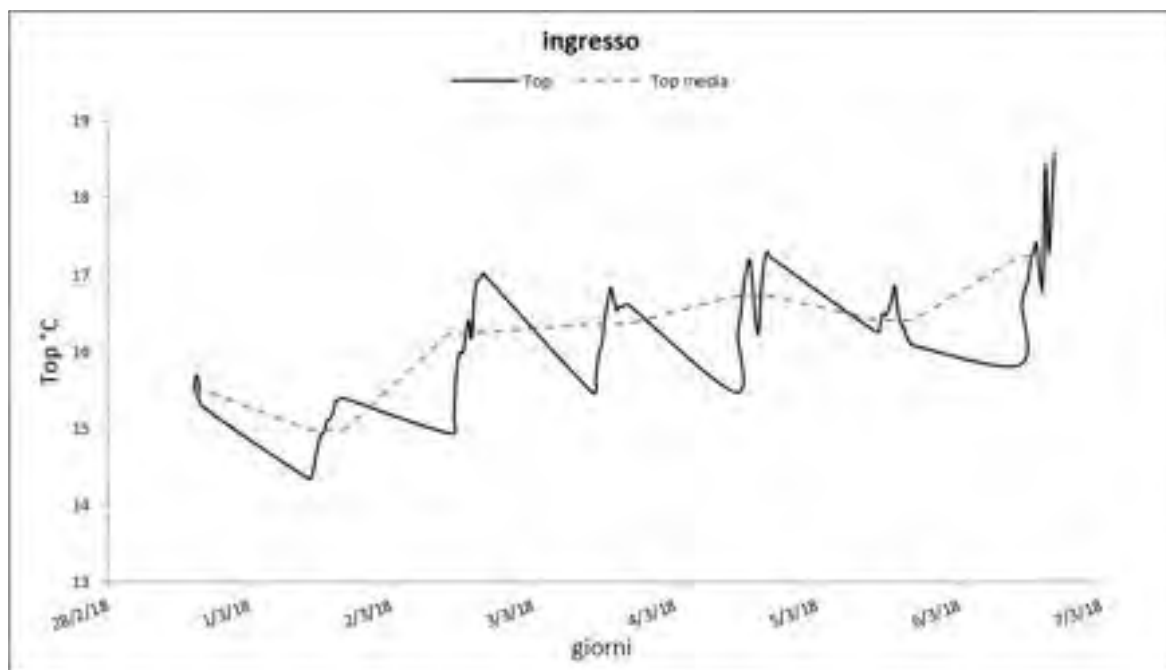


Figura 4.2.14. Profilo di temperatura operativa nel locale *ingresso* – Periodo 1 – 6 mar 2018.

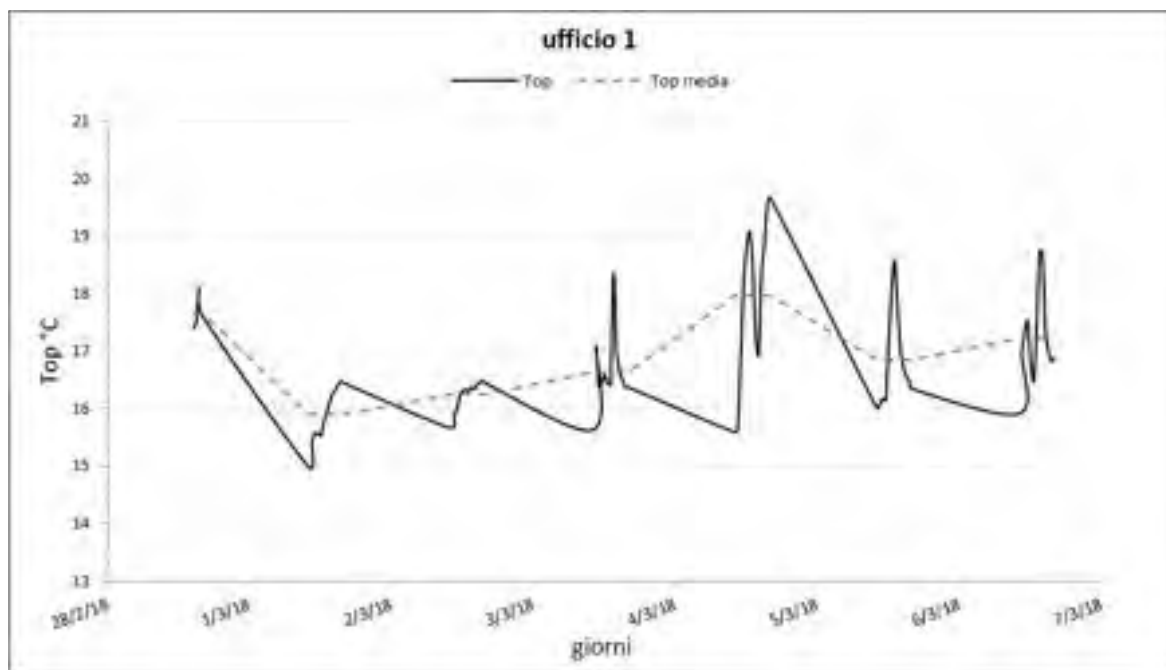


Figura 4.2.15. Profilo di temperatura operativa nel locale *ufficio 1* – Periodo 1 – 6 mar 2018.

4.3 Esito del monitoraggio

Globalmente si osserva che il profilo di temperatura degli ambienti monitorati segue in maniera approssimata quello esterno, riportato con linea tratteggiata in fig. 4.2.6. Dall'analisi emerge che il campo di variabilità per gli ambienti più ventilati – *museo1, ingresso* – è ristretto. L'andamento della temperatura, infatti, risulta tendenzialmente costante, con un delta tra interno ed esterno di pochi gradi, imputabile alle generose volumetrie e alla maggior presenza di correnti d'aria. Ciò non si verifica per *l'ufficio1* e per la *sala alberi*. La causa è da ricercarsi in riferimento all'apporto di calore dovuto rispettivamente ad apparecchi elettrici per *l'ufficio1* ed all'irraggiamento (solare diretto), favorito dall'esposizione (sud) e dalla configurazione strutturale della *sala alberi*. In quest'ultimo ambiente, nel primo e nell'ultimo giorno di rilievo, si raggiunge una differenza massima di temperatura con l'esterno di 6°C.

La temperatura esterna risulta maggiore di quella interna, in riferimento a tutti gli ambienti, unicamente nel primo giorno di monitoraggio in cui si raggiungono valori esterni minimi di 17 °C e massimi di 21 °C. La giornata più fredda è quella del 5 marzo in cui si evidenziano temperature esterne comprese tra 13 e 15°C e valori interni compresi nell'intervallo 16-18°C.

Un andamento tendenzialmente costante, all'interno del periodo in esame, è evidenziato plottando i risultati riguardanti l'umidità relativa interna. Per tutti gli ambienti i valori ricadono nell'intervallo 50 -70%. Valori esterni del medesimo parametro si attestano tra il 60 e i 90 punti percentuali.

Quanto espresso in riferimento all'andamento della temperatura interna nei diversi ambienti, è riferibile anche al profilo di temperatura media radiante negli stessi.

In riferimento alla velocità dell'aria si osservano valori che permangono nel range ottimale, quasi sempre inferiori a 0,1 m/s, con picchi superiori a 0,2 m/s nella zona museo e ingresso, ambienti più affollati e ventilati.

Sono stati inoltre effettuati rilevamenti circa la concentrazione di CO₂ considerando che per concentrazioni di anidride carbonica maggiori ai 1000 ppm (1.798 mg/m³) il ricambio dell'aria risulta inadeguato e per tutti gli ambienti è emerso che la qualità dell'aria può essere ritenuta ottimale.

I dati misurati sono stati confrontati in base a parametri di riferimento relativi ai valori microclimatici riportati nelle "Linee Guida su microclima, areazione ed illuminazione (IPESL)" del 2006, che prevedono, per la stagione invernale, il rispetto delle variabili sotto riportate:

- Temperatura: 20 ± 2 °C;
- Umidità relativa: 35-45 %;
- Velocità dell'aria: 0,05÷0,15 m/s.

Tabella 4.3.1. Ambienti termici moderati – Parametri di riferimento – Linee guida IPSEL (2006).

CATEGORIE DI EDIFICI - Sottogruppi	Aerazione naturale	Ventilazione forzata Rimovi	n _s	Classe dei filtri	Riduc.	inverno			estate			Illuminazione		
						t	UR	va	t	UR	va	naturale	artificiale	nr.
						(°C)	(%)	(m/s)	(°C)	(%)	(m/s)	(FLD, %)	lx	lx
PUBBLICO SPETTACOLO, ATTIVITÀ RICREATIVE E ASSOCIATIVE - Cinema, Teatri, Sale per Congressi/Riunioni														
• zone pubblico	n ≥ 0,5 & RA ≥ 1/8	Q _{tr} = 5,5 *	1,50	5 + 6	A	20 ± 1 (D)	35 ± 45	0,05-0,15	26	50 ± 60	0,05-0,20	0,7 (D)	150	5 ± 2
• poliscenismi, studi TV	*	Q _{tr} = 12,5 *	1,50	5 + 6	A	18 ± 10	40 ± 70	1,0	18 ± 30	40 ± 70	1,0	*	300 *	5 ± 2
• att. sale di attesa, bar	n ≥ 0,5 & RA ≥ 1/8	estrattori	0,20	3 + 5	A	20 ± 1 (D)	35 ± 45	0,05-0,15	26	50 ± 60	0,05-0,20	2 ± 0,7 (D)	100-300 *	5 ± 2
- Musei, Musei, Biblioteche														
• sale mostre, pinacoteche, musei	n ≥ 0,5 & RA ≥ 1/8	Q _{tr} = 6,0 *	0,30	7 + 9	A	18 ± 1 (D)	35 ± 45	0,05-0,15	26	50 ± 60	0,05-0,20	2 ± 0,7 (D)	300 *	1
• sale lettura biblioteche	n ≥ 0,5 & RA ≥ 1/8	Q _{tr} = 5,5 *	0,30	5 + 6	A	20 ± 1 (D)	35 ± 45	0,05-0,15	26	50 ± 60	0,05-0,20	2 ± 0,7 (D)	300	1
• depositi libri	*	Q _{tr} = 1,5	*	3 + 5	A	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	*	300 *	1

CATEGORIE DI EDIFICI - Settori tipo - Tipologia dei locali	Aerazione naturale	Ventilazione forzata Rinnovi	n _l	Classe del filtro	Riscr.	Inverno			estate			Illuminazione		
						t	LR	vt	t	LR	vt	naturale	artificiale	tot.
						°C	%	m/s	°C	%	m/s	(PLD, %)	lx	lx
AMBIENTI INDUSTRIALI, LOCALI ACCESSORI E UFFICI - Ambienti industriali														
• in generale (n)	n ≥ 0,5 e RA ≥ 1/8	Q _h ≥ 4,3 ± 1,1 + n/2,0	n	1 = 1	S	20 ± 0,5 ± 0,5	30 ± 70	± 0,30	20	50 ± 60	± 0,30	2 ± 0,7 (d)	300-7.000 (m)	1
• Depositi, magazzini, archivi (n)	n ≥ 0,5 e RA ≥ 1/8	Q _h ≥ 4,3 ± 1,1 + n/2,0	n	2 = 1	A	20 ± 0,5 ± 0,5	30 ± 70	± 0,30	20	50 ± 60	± 0,30	2 ± 0,7 (d)	100-200	1
- Locali per uffici ed attività														
• uffici, box-ufficio singoli	n ≥ 0,5 e RA ≥ 1/8	Q _h = 11,0	0,06	3 = 7	A	18 ± 2 (d)	45 ± 45	0,05-0,15	20	50 ± 60	0,05-0,20	2 ± 0,7 (d)	300-750	1
• uffici open space	n ≥ 0,5 e RA ≥ 1/8	Q _h = 11,0	0,12	3 = 7	A	18 ± 2 (d)	35 ± 45	0,05-0,15	20	50 ± 60	0,05-0,20	2 ± 0,7 (d)	300-750	1
• locali comuni interni (>100 pers.)	*	Q _h = 10,0 *	0,05	3 = 7	A	18 ± 2 (d)	35 ± 45	0,05-0,15	20	50 ± 60	0,05-0,20	*	500	1
• centri informazione dati	*	Q _h = 7,0	0,08	8 = 9	S	18 ± 2 (d)	35 ± 45	0,05-0,15	20	50 ± 60	0,05-0,20	*	500	1
• lezioni di VCT	n ≥ 0,5 e RA ≥ 1/8	Q _h = 11,0	0,12	3 = 7	A	18 ± 2 (d)	35 ± 45	0,05-0,15	20	50 ± 60	0,05-0,20	2 ± 0,7 (d)	300-750	1

Dal confronto è emerso che in nessuno degli ambienti monitorati si rispettano gli standard previsti. Una sintesi dei risultati ottenuti dall'analisi del monitoraggio microclimatico è riportata nelle tabelle sottostanti, sulle quali sono indicati, per ciascun ambiente e nel range temporale specificato, i valori medi degli indici di benessere globale (PMV_m e PPD_m).

Tabella 4.3.2. Valori medi degli indici di comfort globale e valutazione degli ambienti.

Periodo 28 feb - 6 mar h 10 - 16	Ingresso		Valutazione ambiente	Ufficio 1		Valutazione ambiente
	PMV _m	PPD _m		PMV _m	PPD _m	
01/03/2018	-1,44	48,12	Leggermente freddo	-1,21	36,23	Leggermente freddo
02/03/2018	-1,13	32,23	Leggermente freddo	-1,12	31,81	Leggermente freddo
03/03/2018	-1,09	30,44	Leggermente freddo	-1,02	27,26	Leggermente freddo
04/03/2018	-1,02	27,44	Leggermente freddo	-0,76	18,97	Termicamente accettabile
05/03/2018	-1,07	29,54	Leggermente freddo	-1	25,81	Leggermente freddo
06/03/2018	-0,89	22,33	Termicamente accettabile	-0,9	22,61	Termicamente accettabile

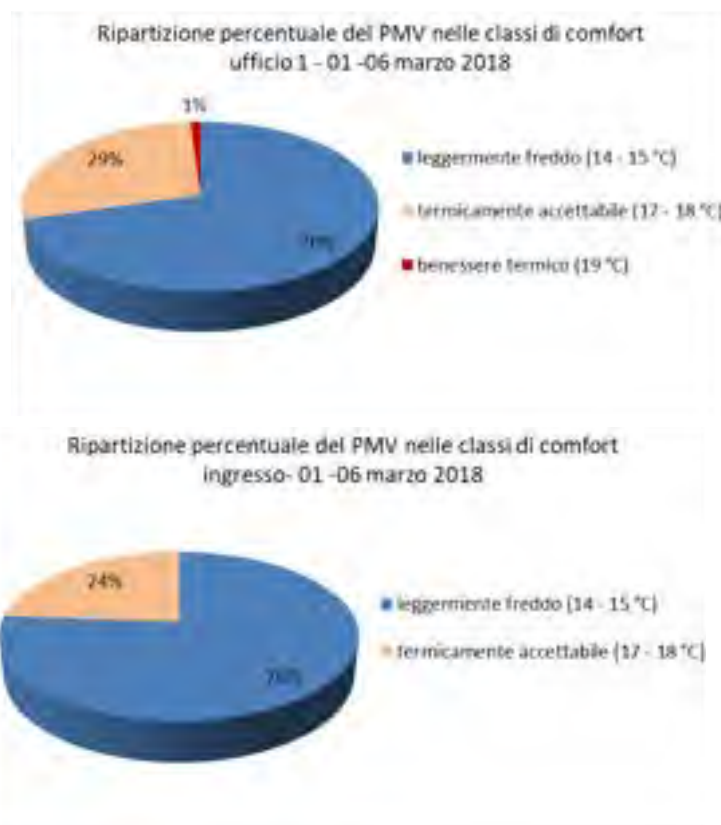
I risultati dei rilievi strumentali condotti nell'ambiente *ufficio1* nelle giornate del 1, 2,3 e 5 marzo, forniscono valori dell'indice PMV lontani dall'intervallo di benessere termico.

Complessivamente la valutazione dell'ambiente è classificata come "leggermente freddo" registrando valori di PMV > -1 e della PPD > 30%. L'ambiente risulta termicamente accettabile nel quarto e nell'ultimo giorno di monitoraggio con PMV < -1 e 22 % < PPD < 26%.

I rilievi effettuati nell'ambiente *ingresso*, mostrano valori di comfort peggiori nelle giornate dal 1 al 5 marzo con PMV_m compreso tra -1 e -1,5 a cui corrisponde una percentuale degli insoddisfatti di poco inferiore al 50%. In queste giornate la valutazione termica dell'ambiente è di "leggermente freddo". Ad esclusione della giornata del 6 marzo si rilevano valori della percentuale degli insoddisfatti indicanti un ambiente termicamente accettabili, poco superiori al 20%.

Le grafiche mostrate nel seguito riportano la ripartizione percentuale dell'indice PMV nelle classi di comfort, in particolare si evidenzia che:

- l'*ufficio1* ricade, in riferimento al tempo di monitoraggio, per il 70% nelle condizioni termiche di "leggermente freddo", per il 29% in "termicamente accettabile". Solo l'1% nell'intervallo di benessere termico.
- l'*ingresso* è stato per il 76% del tempo in condizioni di "leggermente freddo" e per il restante in termicamente accettabile.



In base a quanto previsto dalla UNI 15251, assumendo gli ambienti *ufficio1* e *ingresso* come rappresentativi della struttura in esame, per $-0,7 < PMV < 0,7$ e $PPD \geq 15\%$ l'edificio può essere classificato, per questa stagione, di categoria IV.

Emerge, inoltre, come la mancanza di un sistema di climatizzazione operativo e l'impatto delle continue aperture delle grandi porte dell'ingresso e di comunicazione con la sala museale principale, incida sul grado di benessere dei dipendenti.

Anche l'analisi della temperatura operativa conduce a risultati sostanzialmente analoghi a quelli evidenziati dal calcolo degli indicatori di comfort. Per ambedue gli ambienti (Tab. 4.3.3.) i valori delle temperature operative non rientrano nel range (20 – 24 °C) consigliato dalla UNI 15251.

Tabella 4.3.3. Valori medi della temperatura operativa nei locali *ingresso* e *ufficio 1*.

Periodo	Ingresso	Ufficio 1
28 feb – 6 mar		
	Top _m	Top _m
01/03/2018	14,98	15,9
02/03/2018	16,25	16,25
03/03/2018	16,36	16,63
04/03/2018	16,72	17,96
05/03/2018	16,41	16,85
06/03/2018	17,23	17,22

4.4 Monitoraggio estivo

La valutazione del benessere termico negli ambienti del museo dei Paleo Ambienti Sulcitani, ha interessato anche la stagione estiva. Nello specifico, il monitoraggio dei parametri indoor e outdoor ha riguardato l'arco temporale dal 17 al 23 Luglio 2018. Le apparecchiature impiegate, riportate in tab. 4.4.1., sono state programmate per registrare in continuo, h 24, con intervallo di memorizzazione dei dati di 30 minuti. Per l'elaborazione dei dati si è fatto riferimento all'orario lavorativo 10:00 – 18:00.

Tabella 4.4.1. Strumentazione adoperata per il monitoraggio ambientale negli ambienti oggetto di studio.

Ambienti monitorati	Esposizione	Centraline microclimatiche indoor				Tinytag	Indici PMV e PPD
		C1	C2	C3	C4		
Ingresso	NE- NO	x					x
Museo 1	NO				x		
Sala alberi	SE					x	
Ufficio 1	NE			x			x

Dai dati, consultabili dal sito meteo.it, e illustrati in tabella 4.4.2., emerge che la settimana oggetto di studio, presenta condizioni meteo variabili.

Tabella 4.4.2. Condizioni meteorologiche 17 - 23 lug 2018 - meteo.it

Condizioni meteo								
Periodo monitoraggio	Fenomeni	T min (°C)	T max (°C)	U _r min (%)	U _r max (%)	V _{media} (km/h)	V _{max} (km/h)	
17-lug	 poco nuvoloso	24	31	62	94	25	37	
18-lug	 poco nuvoloso	20	36	32	100	15	30	
19-lug	 poco nuvoloso	19	35	38	94	13	31	
20-lug	 sole e caldo	19	38	24	94	12	31	
21-lug	 poco nuvoloso	24	37	44	94	18	31	
22-lug	 pioggia e schiarite	23	31	58	94	13	21	
23-lug	 poco nuvoloso	22	31	55	100	22	39	

L'andamento dei dati climatici esterni, ricavati tramite sensore, è riportato alla figura 4.4.1. Nell'intervallo di tempo considerato (10:00 – 18:00) il profilo di temperatura media esterna presenta notevoli variazioni, con valori di minimo compresi tra 26 – 29 °C, registrati in tarda mattina, e valori di massimo tra 30 – 41 °C, con un $\Delta T_{e_{max}} < 14$ °C, come specificato in tab. 4.4.3. Si registrano forti escursioni termiche tra il giorno e la notte, con un $\Delta T_{e_{max}}$ dell'ordine dei 20 °C. La giornata più calda è quella del 19 luglio in cui la temperatura esterna raggiunge i 41 °C nell'ora di punta (h 15:00), di contro quella più mite, è coincidente con la giornata del 22 luglio con una $T_{e_{max}}$ di circa 30 °C. Si osserva, globalmente, che l'umidità relativa, durante l'orario

lavorativo, ha subito variazioni percentuali inferiori al 25%, mentre tra il giorno e la notte, il delta è maggiore.

Tabella 4.4.3. Valori minimi, medi e massimi della temperatura e dell'umidità relativa esterna.

Periodo monitoraggio	Time h 10:00 – 18:00	Te _{min} (°C)	Time h 10:00 – 18:00	UR _e _{max} (%)	Time h 10:00 – 18:00	Te _{max} (°C)	Time h 10:00 – 18:00	UR _e _{min} (%)
17-lug	10:00	27,1		62,2	15:00	37		37,6
18-lug	10:00	27,4		43,8	15:00	36,1		25,3
19-lug	10:00	28,4	12:30	45,3	15:00	41		24,7
20-lug	10:00	28,5	16:30	50,5	15:30	36,2	11:00	33,6
21-lug	18:00	29,8	17:00	61,5	14:30	34,5	10:00	38,6
22-lug	11:00	26,3		67	15:00	29,9		51
23-lug	10:00	26,5		64,8	15:00	34,6		42,4

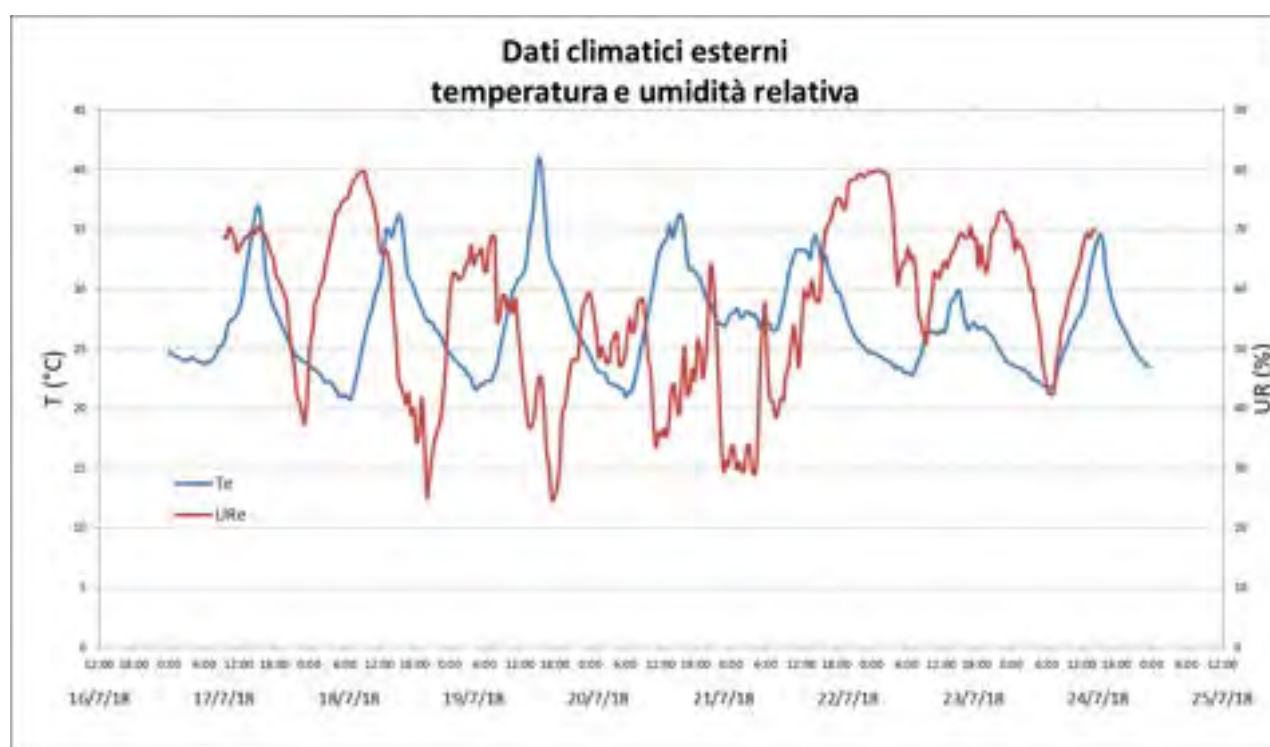


Figura 4.4.1. Andamento dei dati climatici esterni – 17/7/18 – 24/7/18

Nelle tabelle seguenti sono riportati, per gli ambienti esaminati, i valori medi delle variabili indoor, calcolati nell'orario di occupazione, indicando anche i parametri statistici delle grandezze misurate. Inoltre, oltre l'andamento delle variabili termo-igrometriche esterne, le grafiche riportate nel seguito mostrano il confronto tra temperatura, umidità relativa e concentrazione di CO₂ nei diversi ambienti.

Tabella 4.4.4. Valori medi giornalieri - Ingresso

Ingresso					
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	T_rad (°C)	UR_aria (%)	V_aria (m/s)	Posizionamento centraline (x)
17/07/2018	30,72	29,70	53,79	0,14	
18/07/2018	31,56	30,70	40,17	0,14	
19/07/2018	31,64	30,64	40,21	0,18	
20/07/2018	32,22	31,30	44,25	0,19	
21/07/2018	31,80	30,71	56,50	0,19	
22/07/2018	29,67	28,63	56,07	0,13	
23/07/2018	30,64	29,77	54,34	0,11	

Tabella 4.4.5 Valori medi giornalieri – Museo 1

Museo 1					
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	T_rad (°C)	UR_aria (%)	V_aria (m/s)	Posizionamento centraline (x)
17/07/2018	31,64	30,20	53,18	0,05	
18/07/2018	31,72	30,52	43,43	0,05	
19/07/2018	31,78	30,50	40,65	0,08	
20/07/2018	32,19	31,07	44,99	0,07	
21/07/2018	32,02	30,73	55,59	0,10	
22/07/2018	30,16	28,74	55,57	0,07	
23/07/2018	30,79	29,49	53,64	0,04	

Tabella 4.4.6. Valori medi giornalieri – Sala alberi

Sala alberi			
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	UR_aria (%)	Posizionamento centraline (x)
17/07/2018	33,03	46,45	
18/07/2018	34,12	40,38	
19/07/2018	33,69	37,42	
20/07/2018	33,92	39,79	
21/07/2018	33,97	45,88	
22/07/2018	31,97	49,55	
23/07/2018	32,72	46,35	

Tabella 4.4.7. Valori medi giornalieri – Ufficio 1

Ufficio 1					
Periodo monitoraggio	T _{aria} (°C)	T _{rad} (°C)	UR _{aria} (%)	V _{aria} (m/s)	Posizionamento centraline (x)
17/07/2018	29,87	28,89	55,57	0,22	
18/07/2018	31,08	30,48	43,98	0,06	
19/07/2018	31,37	30,63	40,58	0,09	
20/07/2018	32,01	31,27	44,38	0,06	
21/07/2018	31,81	30,94	56,13	0,10	
22/07/2018	29,89	28,96	55,35	0,09	
23/07/2018	30,67	30,12	55,08	0,04	

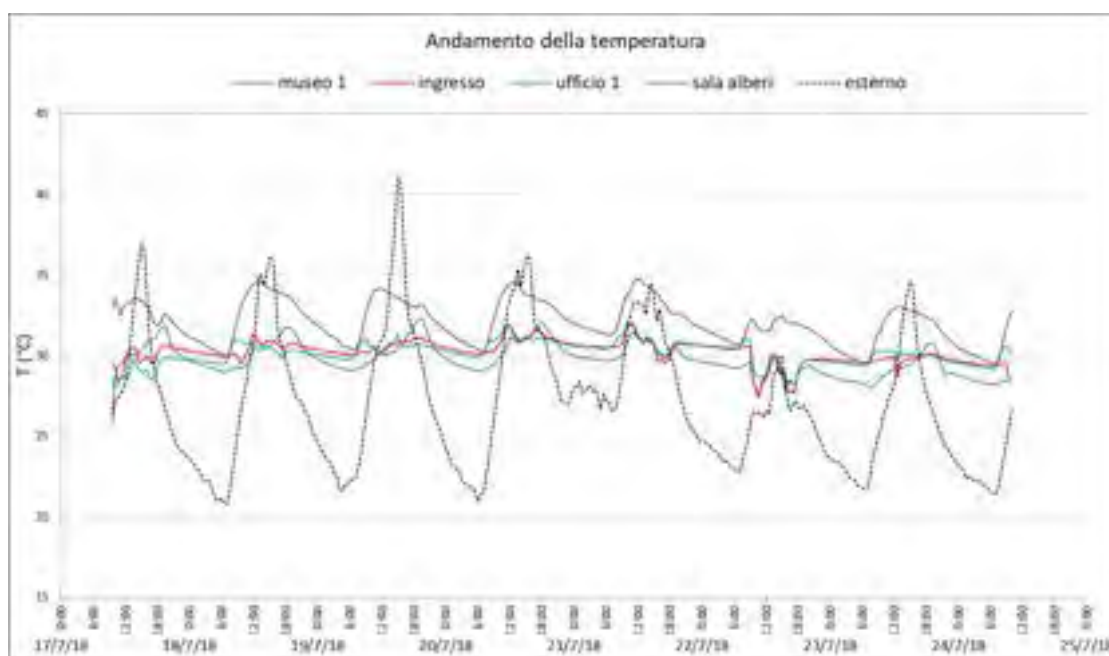


Figura 4.4.2. Profilo di temperatura all'esterno e all'interno degli ambienti del museo dei Paleo Ambienti Sulcitani – 17/7/18 – 24/7/18.

Tabella 4.4.7. Statistica delle variabili di temperatura

Temperatura (°C)		
	Media	Deviazione standard σ
Museo 1	30,19	0,96
Ingresso	30,22	0,99
Sala alberi	33,35	0,84
Ufficio 1	30,19	0,97

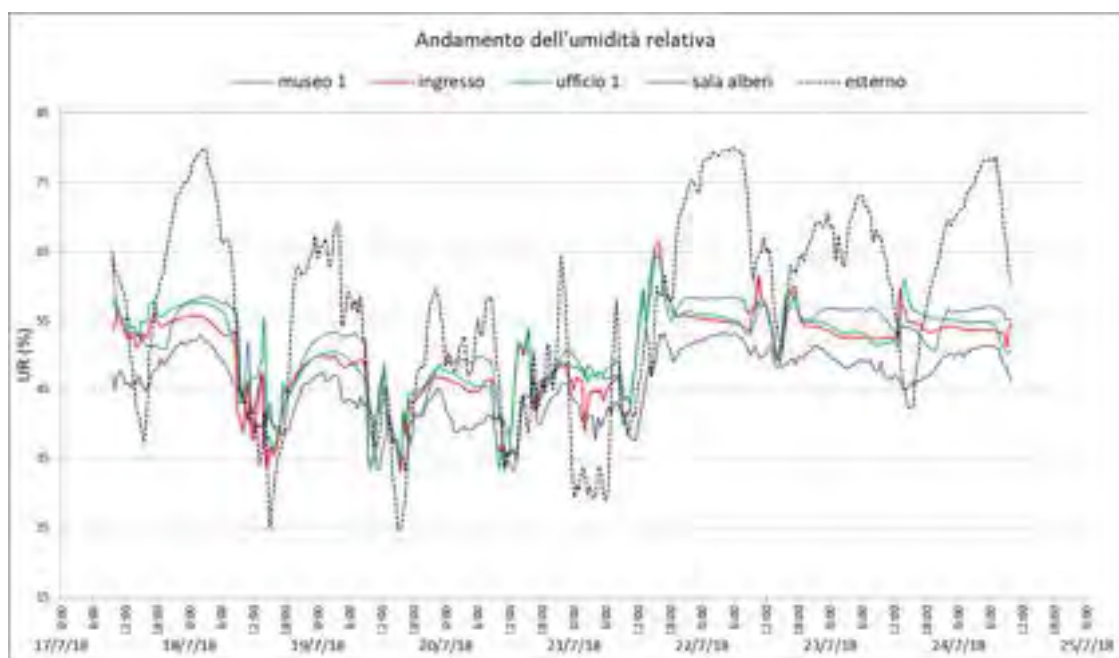


Figura 4.4.3. Profilo di umidità all'esterno e all'interno degli ambienti del museo dei Paleo Ambienti Sulcitani – 17/7/18 – 24/7/18.

Tabella 4.4.8 Statistica delle variabili di umidità relativa

	Umidità relativa (%)	
	Media	Deviazione standard σ
Museo 1	49,54	6,98
Ingresso	49,29	8,24
Sala alberi	43,66	5,06
Ufficio 1	50,10	7,89

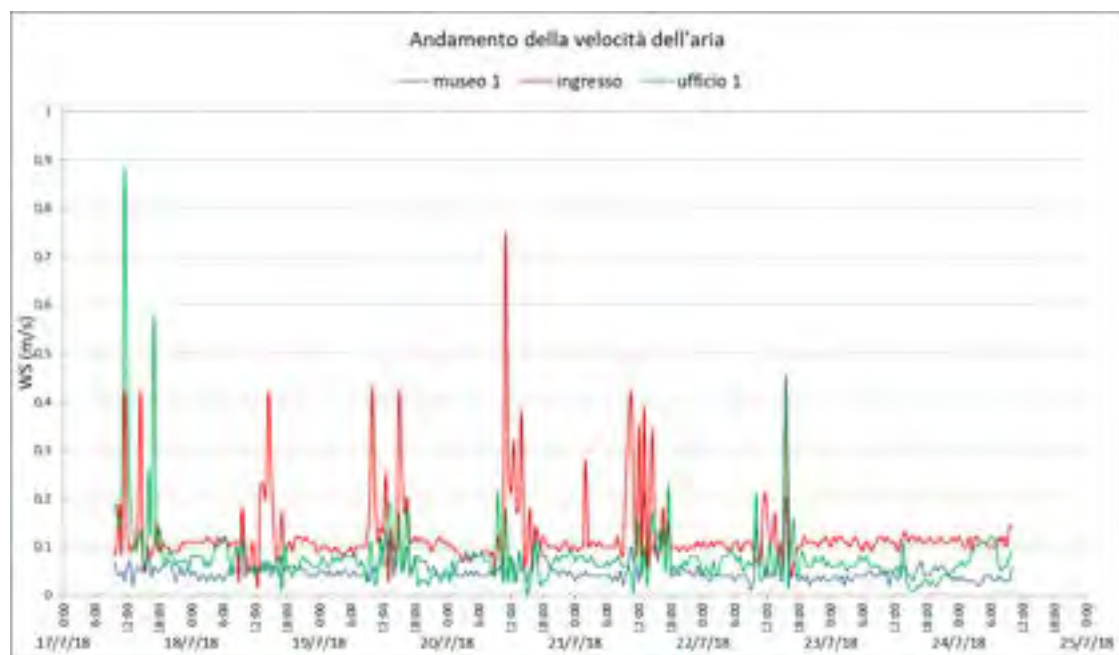


Figura 4.4.4. Andamento della velocità nei locali del museo dei Paleo Ambienti Sulcitani – 17/7/18 – 24/7/18.

Tabella 4.4.9. Statistica delle variabili della velocità dell'aria

	Velocità dell'aria (m/s)	
	Media	Deviazione standard σ
Museo 1	0,07	0,03
Ingresso	0,16	0,11
Ufficio 1	0,09	0,11



Figura 4.4.5. Andamento della temperatura radiante nei locali del museo dei Paleo Ambienti Sulcitani 17/7/18 – 24/7/18.

Tabella 4.4.10. Statistica delle variabili della temperatura radiante

	Temperatura radiante (°C)	
	Media	Deviazione standard σ
Museo 1	31,48	0,84
Ingresso	31,19	0,94
Ufficio 1	30,97	0,88

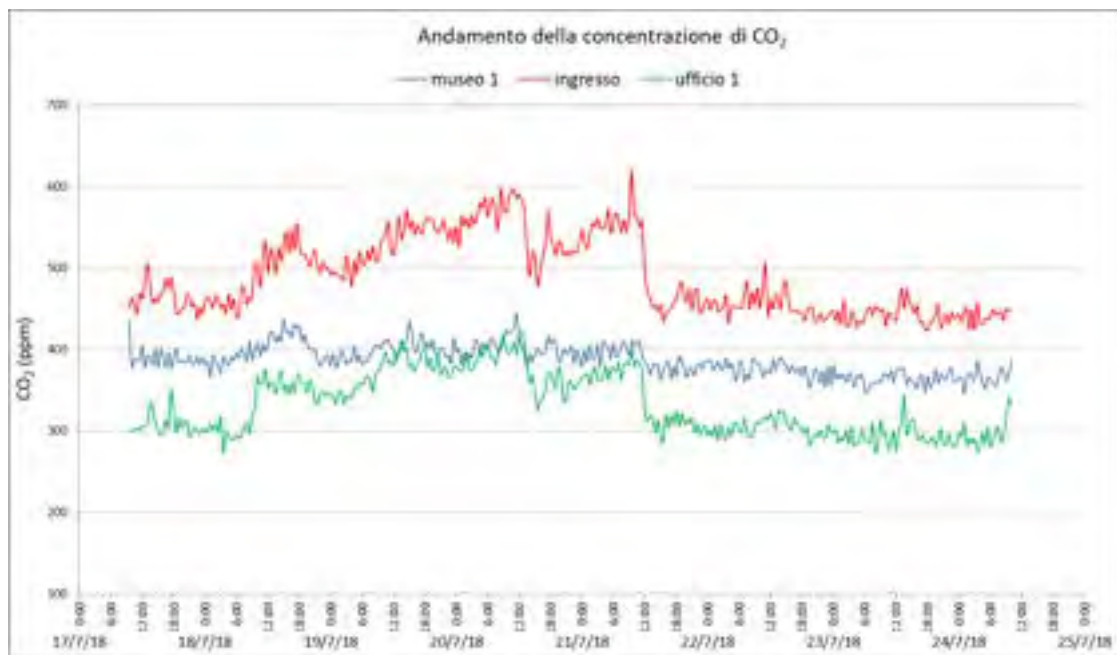


Figura 4.4.6. Andamento della concentrazione di anidride carbonica negli ambienti del museo PAS - 17/7/18 – 24/7/18.

Tabella 4.4.11. Valori medi giornalieri di concentrazione di CO₂ negli ambienti del PAS

Periodo monitoraggio	CO ₂ (ppm)		
	Museo 1	Ingresso	Ufficio 1
17/07/2018	388,18	470,65	311,47
18/07/2018	415,76	519,12	359
19/07/2018	407,41	545,35	390,82
20/07/2018	405,78	544,67	375,67
21/07/2018	382,71	480,41	326,65
22/07/2018	377,29	459,53	312,76
23/07/2018	365,59	445,35	297,88

Tabella 4.4.12. Statistica delle variabili della concentrazione di anidride carbonica

	Concentrazione di CO ₂ (ppm)	
	Media	Deviazione standard σ
Museo 1	391,93	20,31
Ingresso	495,43	46,40
Ufficio 1	339,48	38,33

I dati sperimentali raccolti hanno consentito di determinare gli indici di comfort termico globale. L'indagine è stata condotta dal 17 al 23 agosto 2018 nell'arco temporale 10:00 - 18:00, coincidente con l'orario lavorativo del museo, assumendo come valori fissi di resistenza termica all'abbigliamento e di tasso metabolico rispettivamente 0,5 clo e 1,2 met.

Nello specifico, l'analisi ha riguardato 2 ambienti del museo (*ufficio1* e *ingresso*), gli stessi della stagione invernale.

Le grafiche in fig. 4.4.7- 4.4.8. – 4.4.9 riportano l'andamento degli indici di benessere globale negli ambienti *ingresso* e *ufficio 1*. In riferimento al voto medio previsto sono riportati anche i valori limite qualitativi di confronto:

- benessere termico $PMV < 0,5$;
- leggermente caldo $PMV > 1$;
- caldo $PMV > 2$.

Inoltre, alle figure 4.4.10. - 4.4.11 è stata plottata la variazione della temperatura operativa nei medesimi ambienti e con riferimento allo stesso intervallo temporale.



Figura 4.4.7. Andamento del voto medio previsto nel locale ingresso – Periodo 17 – 24 lug 2018.

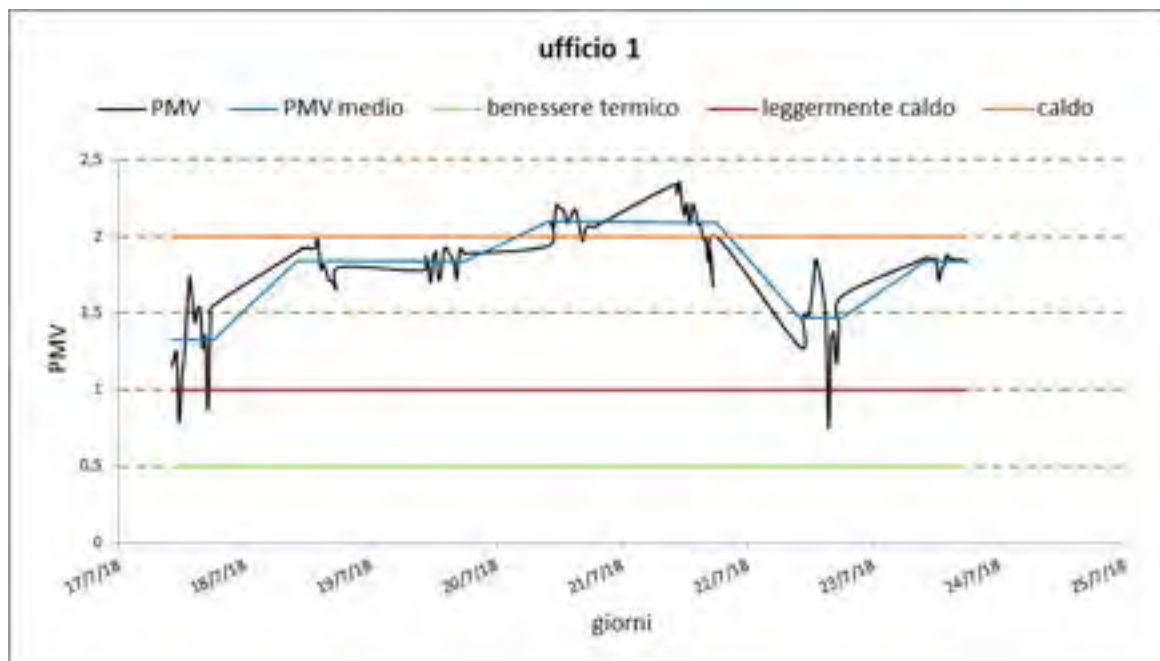


Figura 4.4.8. Andamento del voto medio previsto nel locale *ufficio 1* – Periodo 17 – 24 lug 2018.



Figura 4.4.9. Andamento della percentuale degli insoddisfatti nei locali *ingresso* e *ufficio 1* – Periodo 17 – 24 lug 2018.

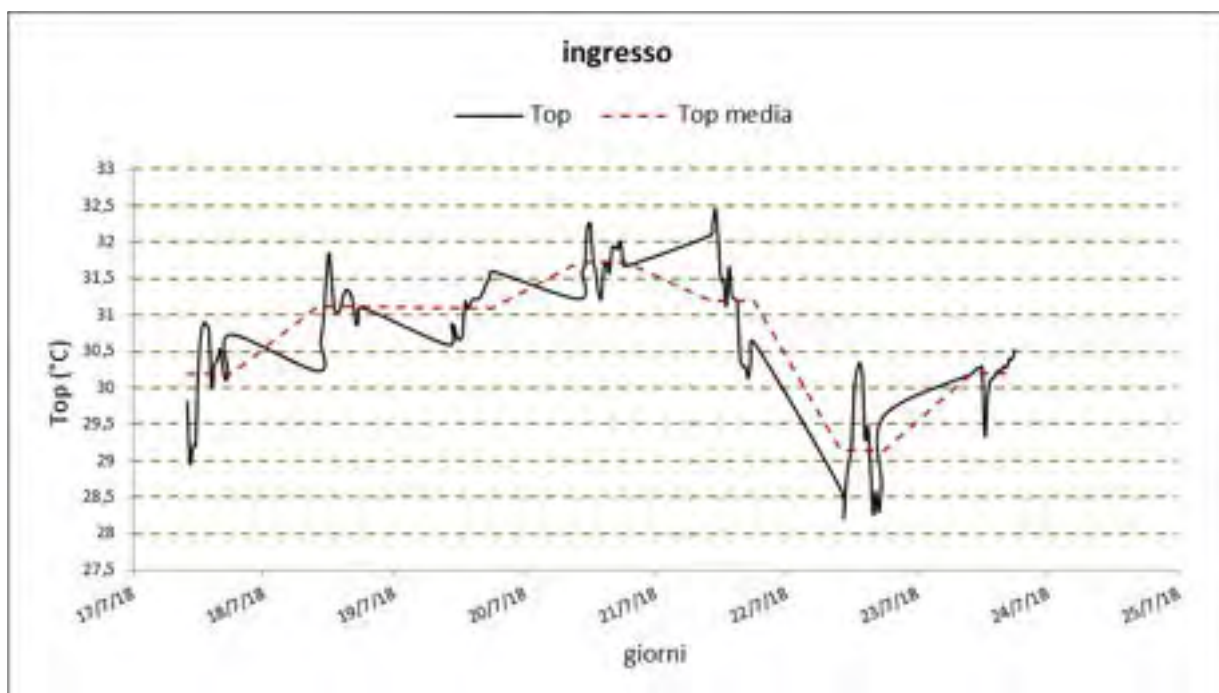


Figura 4.4.10. Profilo di temperatura operativa nel locale *ingresso* – Periodo 17 – 24 lug 2018

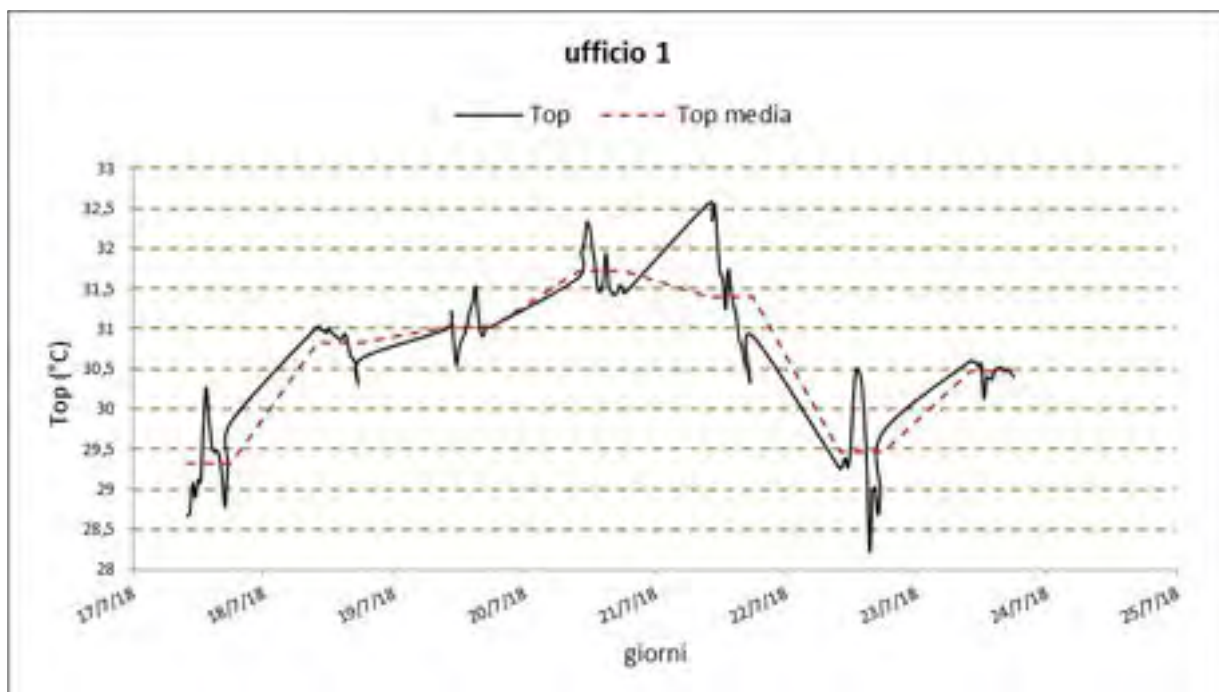


Figura 4.4.11. Profilo di temperatura operativa nel locale *ufficio 1* – Periodo 17 – 24 lug 2018

Tabella 4.4.13. Valori medi della temperatura operativa nei locali *ingresso* e *ufficio 1*

Periodo 28 feb – 6 mar	Ingresso	Ufficio 1
	Top _m	Top _m
17/07/2018	30,19	29,32
18/07/2018	31,12	30,83
19/07/2018	31,09	31,03
20/07/2018	31,72	31,72
21/07/2018	31,20	31,40
22/07/2018	29,14	29,47
23/07/2018	30,19	30,47

4.5 Esito del monitoraggio

Il grafico relativo alla temperatura interna (fig. 4.4.2.) evidenzia un andamento costante e regolare per tutti gli ambienti, sia durante l'orario lavorativo che nelle 24 ore, fatta eccezione per la sala alberi. In quest'ultimo ambiente - confinante con la sala principale espositiva "museo 1" - l'andamento oscillatorio della variabile è più marcato nell'arco della giornata, seppure con un $\Delta T (T_{\max} - T_{\min})$ piuttosto basso (4°C). Inoltre, essendo caratterizzato da una chiusura verticale vetrata non viene utilizzato durante la stagione estiva per via del grande caldo; è infatti proprio in questa sala che si registrano le temperature più elevate ($32-34^{\circ}\text{C}$).

Durante i primi quattro giorni della settimana si sono registrate le temperature esterne più alte, con picchi superiori ai 40°C , mostrandosi sempre superiori rispetto a quelle interne dei locali.

Quanto appena specificato, non si verifica nei giorni successivi. L'abbassamento della temperatura esterna, porta ad una riduzione del range di variazione della variabile tra il giorno e la notte. Nello specifico, durante la giornata del 21 luglio la temperatura all'interno della sala alberi coincide con buona approssimazione a quella esterna, tenendosi sempre più elevata rispetto agli altri locali. Il giorno seguente, caratterizzato da pioggia e schiarite, presenta una temperatura massima esterna ($29,9^{\circ}\text{C}$) minore rispetto a quelle registrate durante l'intero periodo di monitoraggio con un'inversione di tendenza evidenziata dal fatto che, nella sala alberi si raggiungono temperature più alte di tutti gli ambienti interni, compreso l'esterno, con una media di circa 32°C . Le condizioni si ristabilizzano a partire dal 23 luglio, con un significativo aumento della temperatura esterna.

Si specifica come, nonostante vi sia una forte escursione termica esterna tra il dì e la notte, gli ambienti presentino una variazione di temperatura trascurabile. Questo aspetto è attribuibile alla buona inerzia termica delle pareti, che non risentono dei cambiamenti climatici esterni in un arco temporale così limitato.

In tutti gli ambienti, i valori di temperatura superano di gran lunga i 26°C previsti per la stagione estiva dalle "Linee Guida su microclima, areazione ed illuminazione (ISPESL)" del 2006. La mancanza di un sistema di raffrescamento fa sì che all'interno degli stessi, durante l'orario lavorativo si raggiungano temperature elevate.

L'umidità relativa e la velocità dell'aria, sono invece sempre risultate comprese entro range di valori medi giornalieri accettabili: $40\% < RH < 60\%$, $0,05 < WS < 0,2$.

Negli ambienti *ingresso* e *ufficio1* il profilo di velocità presenta dei picchi in corrispondenza dei quali si raggiungono valori maggiori di $0,20 \text{ m/s}$, in concomitanza, presumibilmente, con le aperture delle finestre e delle porte.

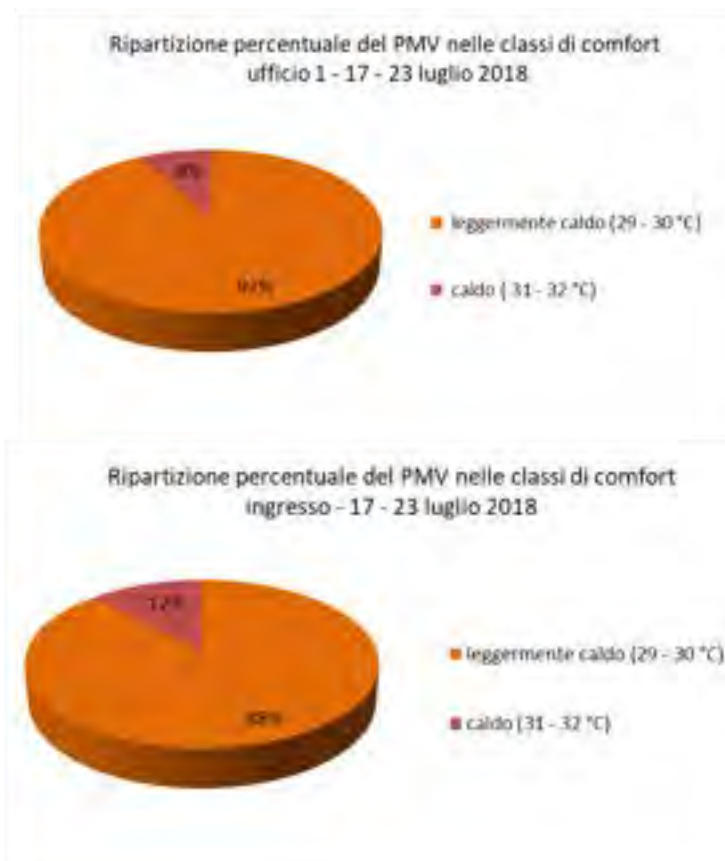
I rilievi sulla concentrazione di CO_2 hanno mostrato valori accettabili in tutti i locali, in considerazione del fatto che per concentrazioni di anidride carbonica maggiori di 1000 ppm (1.798 mg/m^3) il ricambio dell'aria risulta inadeguato.

Per quanto concerne l'indagine sul comfort termico, una sintesi dei risultati ottenuti è riportata nelle tabelle sottostanti, sulle quali sono indicati, per ciascun ambiente e nel range temporale specificato, i valori medi degli indici di benessere globale ($\text{PMV}_{\text{medio}}$ e $\text{PPD}_{\text{medio}}$) e la corrispettiva valutazione ambientale.

Tabella 4.5.1. Valori medi degli indici di comfort globale e valutazione degli ambienti.

Periodo 28 feb - 6 mar h 10 - 18	Ingresso		Valutazione ambiente	Ufficio 1		Valutazione ambiente
	PMV _m	PPD _m		PMV _m	PPD _m	
17/07/2018	1,66	59,63	Leggermente caldo	1,33	42,51	Leggermente caldo
18/07/2018	1,83	68,55	Leggermente caldo	1,84	69,22	Leggermente caldo
19/07/2018	1,79	66,67	Leggermente caldo	1,84	69,15	Leggermente caldo
20/07/2018	2,05	78,76	Caldo	2,10	81,05	Caldo
21/07/2018	1,99	75,03	Caldo	2,09	80,21	Caldo
22/07/2018	1,35	43,59	Leggermente caldo	1,47	49,90	Leggermente caldo
23/07/2018	1,68	61,08	Leggermente caldo	1,84	69,21	Leggermente caldo

Dall'indagine, in riferimento ad ambedue gli ambienti, si sono registrati complessivamente valori di PMV lontani dall'intervallo di benessere termico, con $PMV > 1$ e $PPD > 50\%$, classificando i locali nella categoria ambientale di "leggermente caldo". I valori di comfort peggiori sono coincisi con le giornate del 20 e del 21 agosto, con PMV maggiori di 2 e PPD superiori all'80%, dovuti probabilmente all'aumento della temperatura ambiente. In queste giornate la valutazione termica globale degli ambienti è di "caldo". Nello specifico, si riporta nelle seguenti figure la ripartizione percentuale del voto medio previsto nelle classi di comfort per i due ambienti.



Considerando i vari locali esaminati rappresentativi dell'edificio in esame, quest'ultimo può essere classificato, in base a quanto previsto dalla UNI 15251, di Categoria IV, con $PPD \geq 15\%$.

Anche l'analisi della temperatura operativa conduce a risultati analoghi a quelli evidenziati dal calcolo degli indicatori di comfort. I valori delle temperature operative ricadono fuori dal range (23-26 °C) consigliato dalla UNI 15251.

Tabella 4.5.2. Valori di Top consigliati dalla UNI EN ISO 7730 (per un'attività di tipo leggera o sedentaria svolta in ufficio).

Stagione Top (range di accettabilità)	
Inverno	20÷24 °C
Estate	23÷26 °C

4.6 Qualità percepita degli ambienti interni – analisi soggettiva

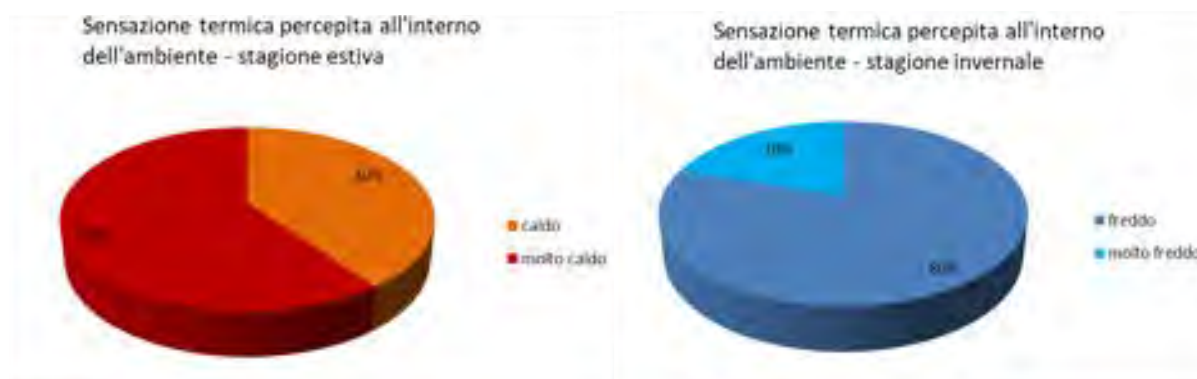
A completamento dello studio sulla qualità percepita degli ambienti interni, è stato definito un questionario in riferimento alle specifiche qualitative caratterizzanti gli ambienti analizzati.

Il questionario è costituito da 20 semplici domande divise in tre parti: la qualità generale percepita dell'edificio, la qualità percepita dell'ambiente interno, dati di profilo dell'intervistato. Il primo gruppo di domande indaga sul livello di importanza percepito dell'edificio dal punto di vista storico culturale e sull'adeguatezza dello stesso al suo uso attuale. Il secondo si focalizza sulla sensazione di comfort interno percepito (qualità del microclima, dell'aria, etc.) indagando sul tipo di attività svolta e sul vestiario utilizzato.

Il questionario è stato sottoposto a 8 lavoratori, i quali hanno fatto emergere precarie condizioni di comfort invernali ed estive per gli ambienti più utilizzati *ingresso* e *ufficio1*.

Dalle indagini i lavoratori del museo hanno fatto emergere, per gli ambienti *ingresso* e *ufficio 1*, precarie condizioni di comfort invernali ed estive. Nel seguito è riportato in forma grafica quanto esposto:

- nella stagione estiva il 60% dichiara di avvertire una sensazione termica di “molto caldo”, il restante percepisce gli ambienti (*ufficio1* e *ingresso*) come “caldi”;
- nella stagione invernale l'80% lamenta una sensazione termica di “molto freddo” e il 20% percepisce l'ambiente come “freddo”.



Dall'analisi soggettiva, in riferimento sia alla stagione estiva che a quella invernale, si evidenzia una sostanziale conferma di quanto ricavato sperimentalmente con l'utilizzo delle centraline microclimatiche.

4.7 Comfort illuminotecnico

Unitamente all'analisi delle condizioni di comfort termico, si è provveduto ad effettuare un'indagine relativa al comfort illuminotecnico nelle postazioni di lavoro (*ufficio1, ingresso*). I dati dell'illuminamento sono relativi a misurazioni effettuate in giornate soleggiate relative alla stagione estiva. Per l'illuminazione, si è fatto riferimento alla UNI EN 12464-1 che prevede, per gli operatori che lavorano al videoterminale, un illuminamento medio di 500 lux.

Nella zona ingresso l'illuminazione è garantita da un mix di lampade a fluorescenza e faretto alogeni, mentre nelle aree ufficio sono presenti principalmente le plafoniere con tubi alogeni. In tab. 4.7.1. si riporta la tipologia di lampade e la potenza complessiva. Nell'insieme le lampade presentano un buono stato di conservazione.

Tabella 4.7.1. Caratteristiche lampade

Ambiente	Tipologia lampade	n°	Potenza complessiva (W)
Ingresso	Tubi a fluorescenza	6	294
	Faretto	3	210
Ufficio 1	Tubi a fluorescenza	4	196



Figura 4.7.1. Tubo a fluorescenza 1400 mm, Philips Master TL5HO 49W/840



Figura 4.7.2. Faretto modello Zumtobel 60710512. Corpo illuminante: Philips Master CDM-TC70W/830 G12

Tabella 4.7.2. Dati misure livello di illuminamento

Luce artificiale (Lux)					
Ambiente	Postazione	Giornata soleggiata ☀			Distanza dal punto di misura al corpo luce (m)
		ON	OFF	Contributo	
Ingresso	1	1040	718	322	2,27
	2	540	260	280	2,27
	1	740	365	375	2
Ufficio	2	1940	1376	564	2
	3	590	295	297	2

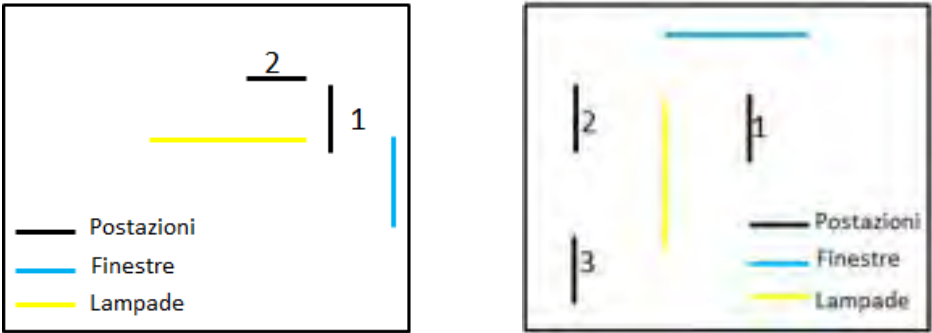


Figura 4.7.3. Riproduzione ingresso e ufficio 1

Dai rilievi, è emerso che il livello di luce naturale è tale da consentire un adeguato livello di illuminamento solamente nelle postazioni in prossimità delle finestre, postazione 1 per la zona ingresso e postazione 2 per l'ambiente ufficio. Tuttavia il contributo della luce artificiale garantisce, per tutte le postazioni di lavoro, il raggiungimento dei 500 lux previsti dalla norma UNI EN 12464-1.

4.8 Valutazione del comfort termico: un caso specifico

Un aspetto interessante della ricerca ha riguardato l'analisi del microclima in concomitanza con l'inaugurazione della mostra "Pangea - 300 milioni di anni fa", valutando l'incidenza dei visitatori sulle grandezze termo-igrometriche misurate e sul comfort termico da essi percepito.

L'evento, unico per il territorio sardo e primo nel suo genere in Italia con una variegata gamma di reperti fossili del periodo "Perno Carbonifero", risalenti a 360-250 milioni di anni fa, si è svolto nella giornata di venerdì 18 Maggio nell'ambiente "sala Mostre", con la partecipazione di oltre 70 persone.

L'ambiente in questione (fig. 4.8.1), caratterizzato da una superficie utile di 130 m², da un volume utile di 587,92 m³ e da orientamento NE, risulta comunicante, internamente con la sala archivio ed esternamente con il giardino della corte interna. Si riportano in tab. 4.8.1., rispettivamente per le giornate monitorate, gli orari di apertura, l'accessibilità e le condizioni operative che si riferiscono in questo caso specifico all'apertura delle porte P1 e P2.

Tabella 4.8.1. Condizioni operative all'interno della sala Mostre – 17-23 mag 18

Periodo di monitoraggio	Orari apertura (h)	Accessibilità	Condizioni
17-mag-18	10:00 – 18:00	dipendenti	P1
18 mag 2018 “inaugurazione mostra”	18:00 – 21:00	pubblico	P1, P2
19-mag-18	10:00 – 13:00 15:00 – 20:00	pubblico	P1
20-mag-18	10:00 – 13:00 15:00 – 20:00	pubblico	P1
21 mag 2018 “giorno di chiusura”	–	-	P1
22-mag-18	10:00 – 13:00 15:00 – 18:30	pubblico	P1
23-mag-18	10:00 – 13:00 15:00 – 18:30	pubblico	P1



Figura 4.8.1. Planimetria sala mostre ed ambienti confinanti.

I rilievi sono stati condotti sia nei giorni antecedenti l’evento, in concomitanza con l’inaugurazione e nei giorni successivi alla continuità dello stesso.

A riguardo sono state utilizzate due centraline microclimatiche (C1 e C2), collocate nell’ambiente alla quota della cosiddetta “altezza respiro” (1.50 - 2 m) in zone non facilmente accessibili al pubblico per evitare cause perturbanti accidentali, in modo da rispettare le esigenze espositive, evitando zone con fenomeni di stratificazione dell’aria. Il monitoraggio delle variabili è avvenuto in continuo e i dati sono stati registrati con un intervallo temporale di trenta minuti.

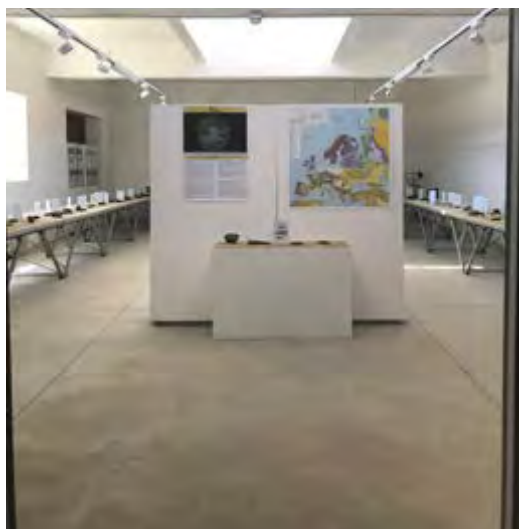


Figura 4.8.2. Sala mostre

Il meteo nella settimana di monitoraggio evidenzia condizioni stabili caratterizzate da nubi sparse (tab. 4.8.2.). L'andamento dei dati è riportato nella grafica sottostante ed in modo sintetico in tab. 4.8.3. Nell'intervallo di tempo considerato, durante i rilievi, la temperatura esterna oscilla da un minimo di 13 °C ad un massimo di 33 °C, mentre l'umidità relativa esterna raggiunge valori compresi tra circa 93 %, durante le ore diurne, e 38 % in quelle di punta (h 13:00 – 14:00). Le giornate più calde sono quelle del 18 e del 23 maggio in cui la temperatura esterna supera i 30 °C nell'ora di punta (h 14:00) mentre quella più fredda è del 21 maggio con una $T_{e_{max}}$ di 14,7 °C. Si osserva, globalmente, che l'umidità relativa ha subito variazioni percentuali inferiori al 20 %.

Tabella 4.8.2. Condizioni meteorologiche 17 - 23 mag 2018 - meteo.it

Condizioni meteo								
Periodo monitoraggio	Fenomeni	T min (°C)	T max (°C)	Ur_min (%)	Ur_max (%)	V_media (km/h)	V_max (km/h)	
17-mag	 poco nuvoloso	10	24	60	100	10	21	
18-mag	 poco nuvoloso	11	24	60	100	9	24	
19-mag	 poco nuvoloso	11	24	64	100	9	22	
20-mag	 poco nuvoloso	12	25	64	100	8	26	
21-mag	 pioggia debole	15	18	88	100	8	13	
22-mag	 poco nuvoloso	14	23	73	100	11	21	
23-mag	 poco nuvoloso	15	24	69	100	16	28	

Tabella 4.8.3. Valori medi giornalieri – Sala mostre

Periodo monitoraggio	T_aria (°C)		T_rad (°C)		UR_aria (%)		V_aria (m/s)		Posizionamento centraline (x)
	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	
17/05/2018	19,88	19,73	20,32	20,54	64,47	64,73	0,02	0,06	
18/05/2018	20,43	20,37	20,96	21,32	63,71	63,51	0,02	0,05	
19/05/2018	20,97	21,13	21,58	22,03	64,56	63,67	0,03	0,04	
20/05/2018	21,16	21,4	21,66	22,14	65,45	64,27	0,026	0,04	
21/05/2018	20,92	21,12	21,38	21,78	67,66	66,62	0,021	0,05	
22/05/2018	21,01	21,1	21,5	21,9	68,19	67,57	0,024	0,04	
23/05/2018	21,24	21,36	21,81	22,16	68,84	68,21	0,025	0,05	

Dall'analisi dei dati registrati, si nota come le condizioni termo-igrometriche dell'aria nell'ambiente interno siano influenzate da quelle esterne; in particolare, gli andamenti della temperatura e dell'umidità all'interno della sala seguono con un certo ritardo, tipicamente di 3 ore, quelli esterni all'edificio.

Ciò è probabilmente dovuto al fatto che attraverso le pareti dell'involucro edilizio, sottoposte a sollecitazioni termiche variabili nel tempo, si genera un flusso termico la cui entità dipende, ovviamente, dallo spessore e dalle caratteristiche termofisiche delle pareti stesse. Questo ritardo temporale è marcatamente visibile nell'andamento delle ore serali, nel quale si evidenzia come i valori della temperatura si mantengano costantemente elevati.

Il grafico relativo alla temperatura interna evidenzia un andamento costante in considerazione di una variazione giornaliera di circa 2-3 °C, pertanto l'ambiente analizzato può considerarsi omogeneo.

La settimana monitorata è rappresentativa della stagione intermedia, per questo, grazie all'inerzia termica i primi caldi non hanno influito sull'ambiente. Inoltre, considerata l'esposizione con orientamento NE, l'ambiente non è sottoposto a particolari carichi solari.

L'andamento delle variabili monitorate non sono state influenzate dalla presenza delle persone, ciò può anche essere legato alla generosa volumetria dell'ambiente. Una velocità maggiore si registra durante l'apertura della porta confinante con la corte interna, mantenendosi però sempre ad un valore tale da non creare correnti d'aria di disturbo.

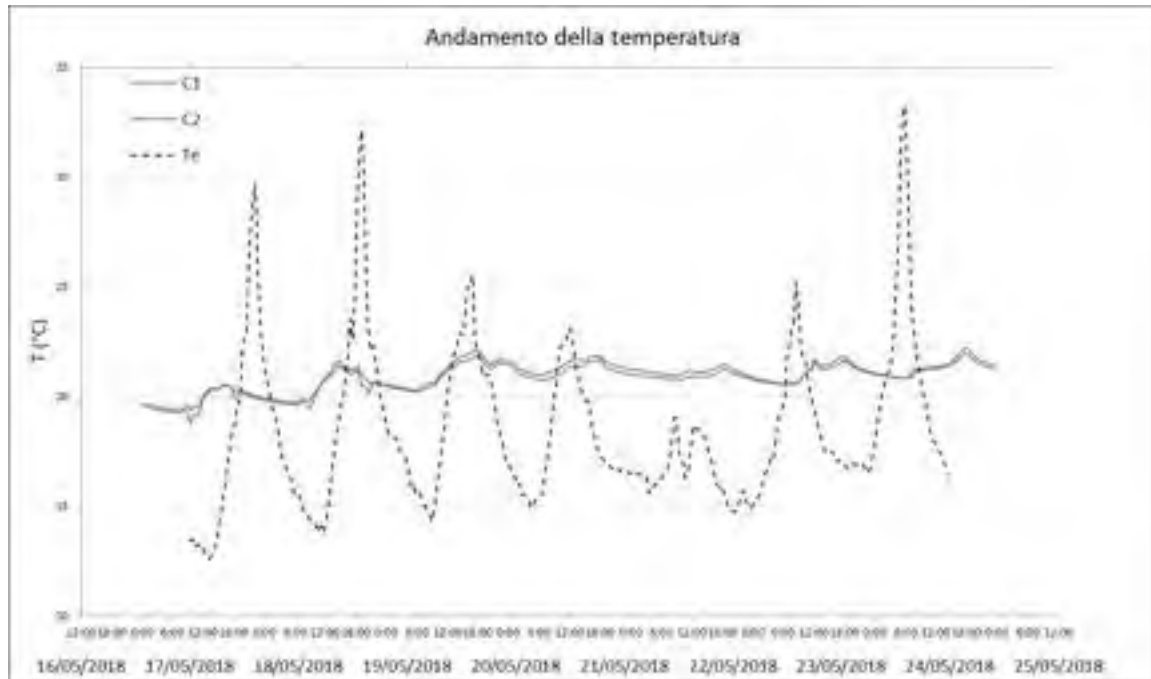


Figura 4.8.3. Profilo di temperatura all'esterno e all'interno della sala Mostre – 17/5/18 – 24/5/18.

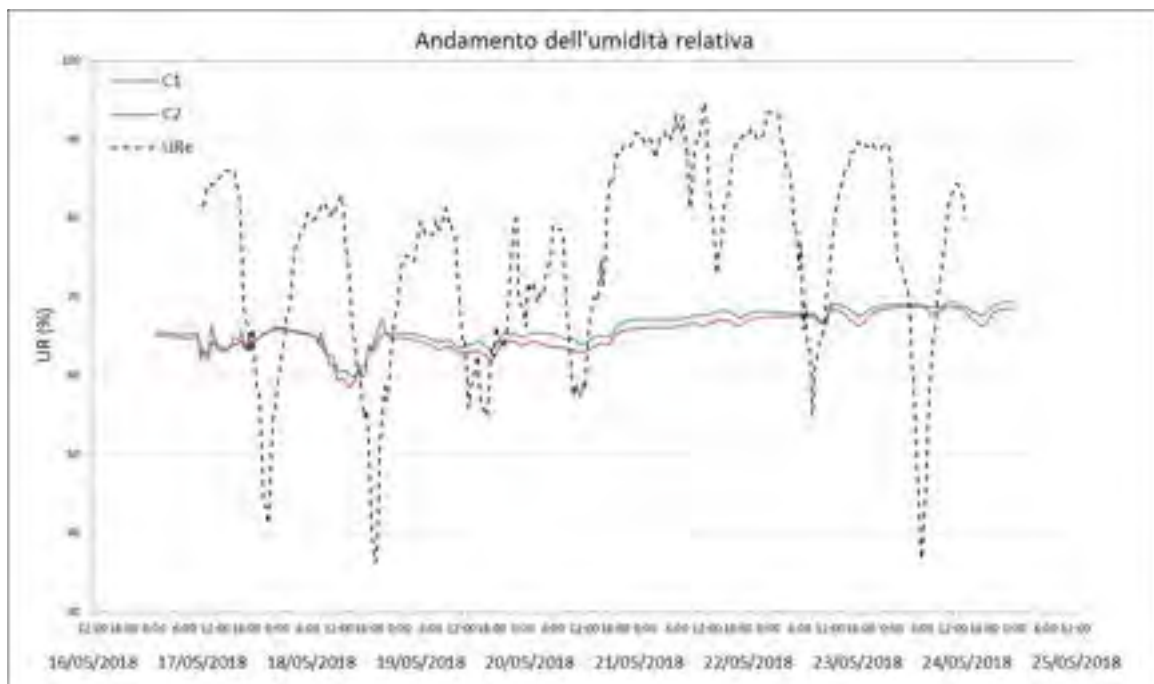


Figura 4.8.4. Profilo di umidità relativa all'esterno e all'interno della sala Mostre – 17/5/18 – 24/5/18.

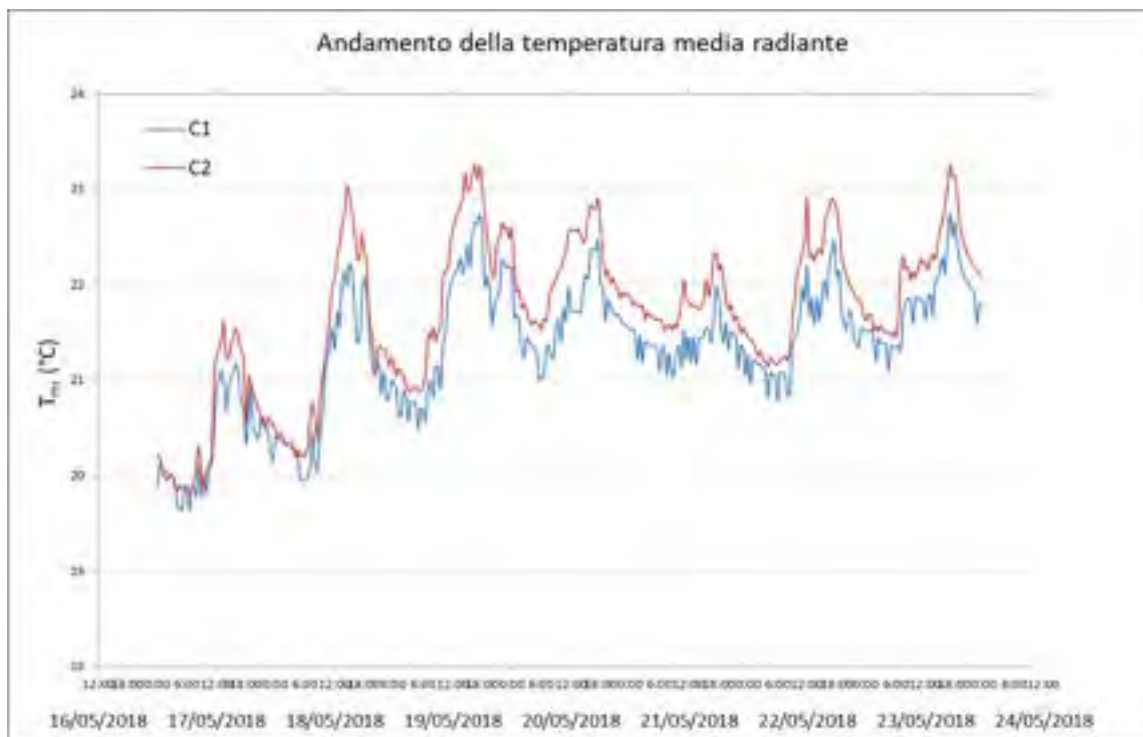


Figura 4.8.5. Profilo di temperatura radiante all'interno della sala Mostre – 17/5/18 – 24/5/18.



Figura 4.8.6. Profilo di velocità dell'aria interna della sala Mostre – 17/5/18 – 24/5/18.

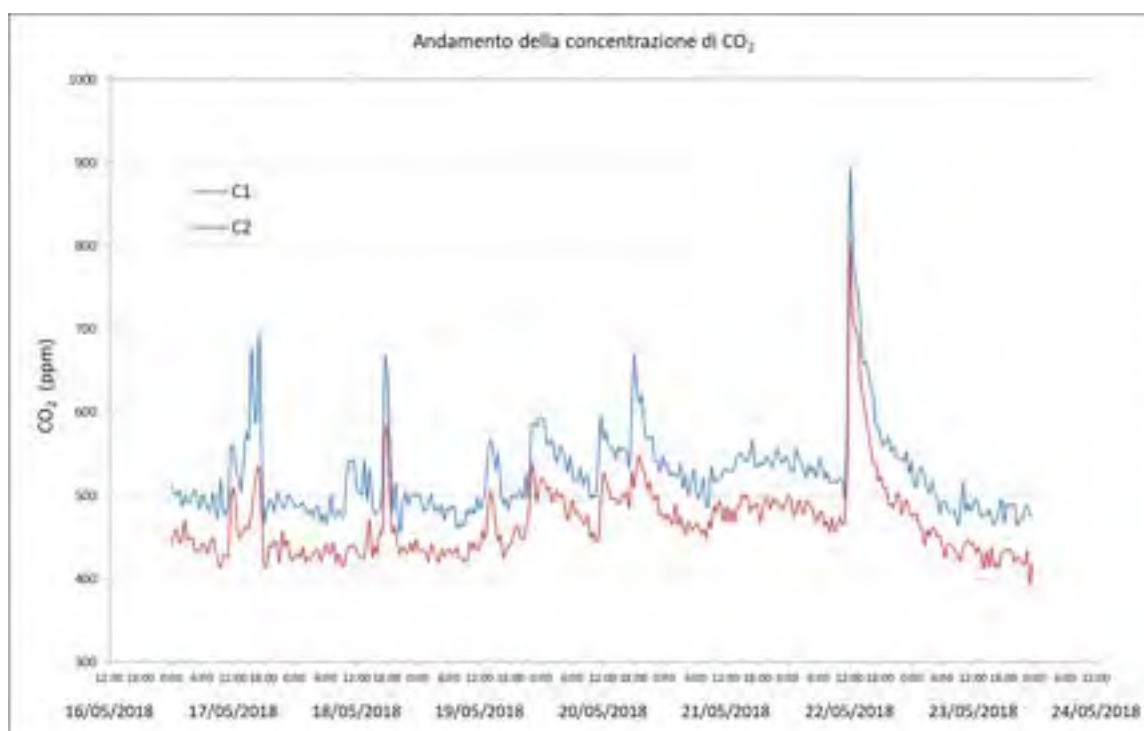


Figura 4.8.7 Profilo di concentrazione della CO₂ all'interno della sala Mostre - 17/5/18 – 24/5/18.

Per il calcolo degli indici di comfort termico si è fatto riferimento alla sola giornata dell'inaugurazione della mostra, utilizzando come indice di abbigliamento 0,7 clo e come tasso metabolico 1,6 met (attività leggera in piedi).

Tabella 4.8.4. Valori medi degli indici di comfort globale e valutazione dell'ambiente.

Durata monitoraggio	PMV _m	PPD _m	Top	Valutazione ambiente
18/5/18 – h 18.00	0,3	6,89	21,74	Benessere termico
18/5/18 – h 18.30	0,3	6,89	21,75	Benessere termico
18/5/18 – h 19.00	0,22	6,01	21,33	Benessere termico
18/5/18 – h 19.30	0,19	5,75	21,14	Benessere termico
18/5/18 – h 20.00	0,16	5,53	20,96	Benessere termico
18/5/18 – h 20.30	0,15	5,47	20,97	Benessere termico
18/5/18 – h 21.00	0,15	5,47	21,03	Benessere termico
18/5/18 – h 21.30	0,13	5,35	20,79	Benessere termico

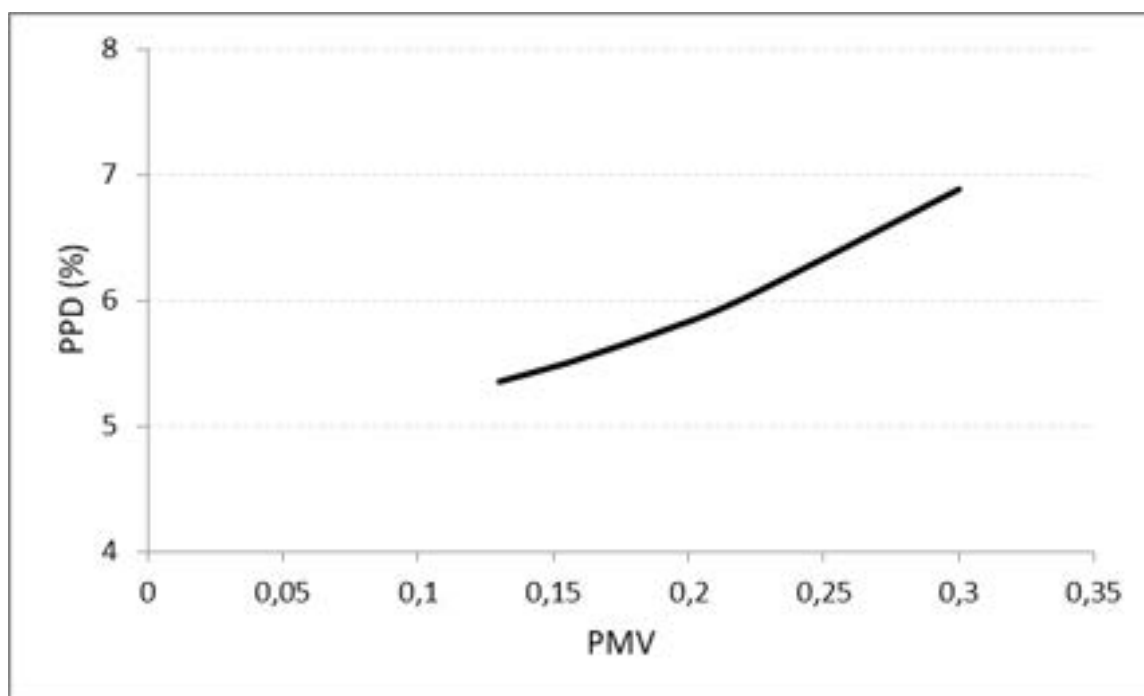


Figura 4.8.8. Andamento dell'indice PPD in funzione del PMV – 18/05/2018.

Dall'analisi dei risultati ottenuti emerge chiaramente che, all'interno della sala mostre, si raggiungono condizioni di benessere termico nonostante la presenza di numerose persone, con una percentuale degli insoddisfatti inferiore al 10 %.

5 Analisi del Museo del Carbone

5.1 Il Museo del Carbone

Il Museo del Carbone è stato inaugurato il 3 novembre 2006, in seguito al recupero e alla valorizzazione del sito minerario di Serbariu. Il progetto di riconversione ha permesso la fruibilità degli edifici e delle strutture minerarie più significative del sito: la lampisteria, locale in cui i minatori ritiravano le lampade prima di scendere in sottosuolo e che attualmente ospita l'esposizione permanente sulla storia del carbone, della miniera e della città di Carbonia; i castelli di accesso ai pozzi; le due sale argani e la galleria sotterranea.

La struttura, esposta su quattro lati, è caratterizzata da tre corpi di fabbrica adiacenti a pianta rettangolare con asse maggiore orientato a NE-SO e complementata da un elemento a pianta circolare posto a SE. Il corpo principale, situato al centro dell'edificio e utilizzato come sala espositiva, confina a NE con la sala conferenze e a SO con la zona adibita a libreria e ad uffici.

I locali adibiti a BAR ed uffici hanno superfici finestrate prevalentemente esposte a SO, la sala conferenze si affaccia verso NE, mentre l'area museale presenta superfici finestrate su tutti i lati.

Le componenti strutturali verticali dell'edificio sono interamente realizzate in muratura lapidea storica tipica della zona di Carbonia una roccia effusiva altamente porosa di colore rossastro localmente denominata "*trachite rossa*". Le coperture sono realizzate con strutture intelaiate in cemento armato e mantengono gli originali solai latero cementizi.

Gran parte dell'edificio è adibito a spazio espositivo articolato in diversi ambienti. Vi sono poi due ampi locali destinati ad attività commerciale (libreria e BAR) ed alcuni ambienti a supporto alle attività museali (ufficio e deposito). Inoltre ha sede la sala conferenze aperta al pubblico in occasioni specifiche.

L'ambiente adibito a biglietteria (ex sala caldaie) è caratterizzato da un corpo di fabbrica separato, collegato all'area espositiva principale da un corridoio in corten di nuova realizzazione, completamente sprovvisto di impianti per la climatizzazione e la ventilazione. Si tratta di un locale che, per la maggior parte del tempo, è a diretto contatto con l'ambiente esterno poiché la porta di ingresso rimane sempre aperta nell'orario di apertura.

Nell'area espositiva è presente unicamente un sistema di ventilazione per il ricambio dell'aria interna utilizzato solo nel periodo estivo al fine di agevolare la dissipazione del calore in eccesso. Il bar e la libreria sono serviti da un impianto di climatizzazione, estiva ed invernale, mantenuto sempre funzionante durante le ore di servizio del museo.

Gli ambienti dedicati ad ufficio ed a deposito sono serviti dal medesimo impianto relativo alla zona commerciale ma utilizzano terminali a ventilconvettore.

Il profilo d'utilizzo dell'edificio è fortemente discontinuo in riferimento alla stagione considerata. Nello specifico, in quella invernale si registra un limitatissimo flusso di visitatori ed il saltuario utilizzo di alcuni ambienti per visite guidate ed attività didattiche e congressuali.

Il flusso turistico cresce poi gradualmente fino a raggiungere il culmine nella stagione estiva, rimanendo comunque prevalentemente localizzato durante i fine settimana e nei giorni di festa.

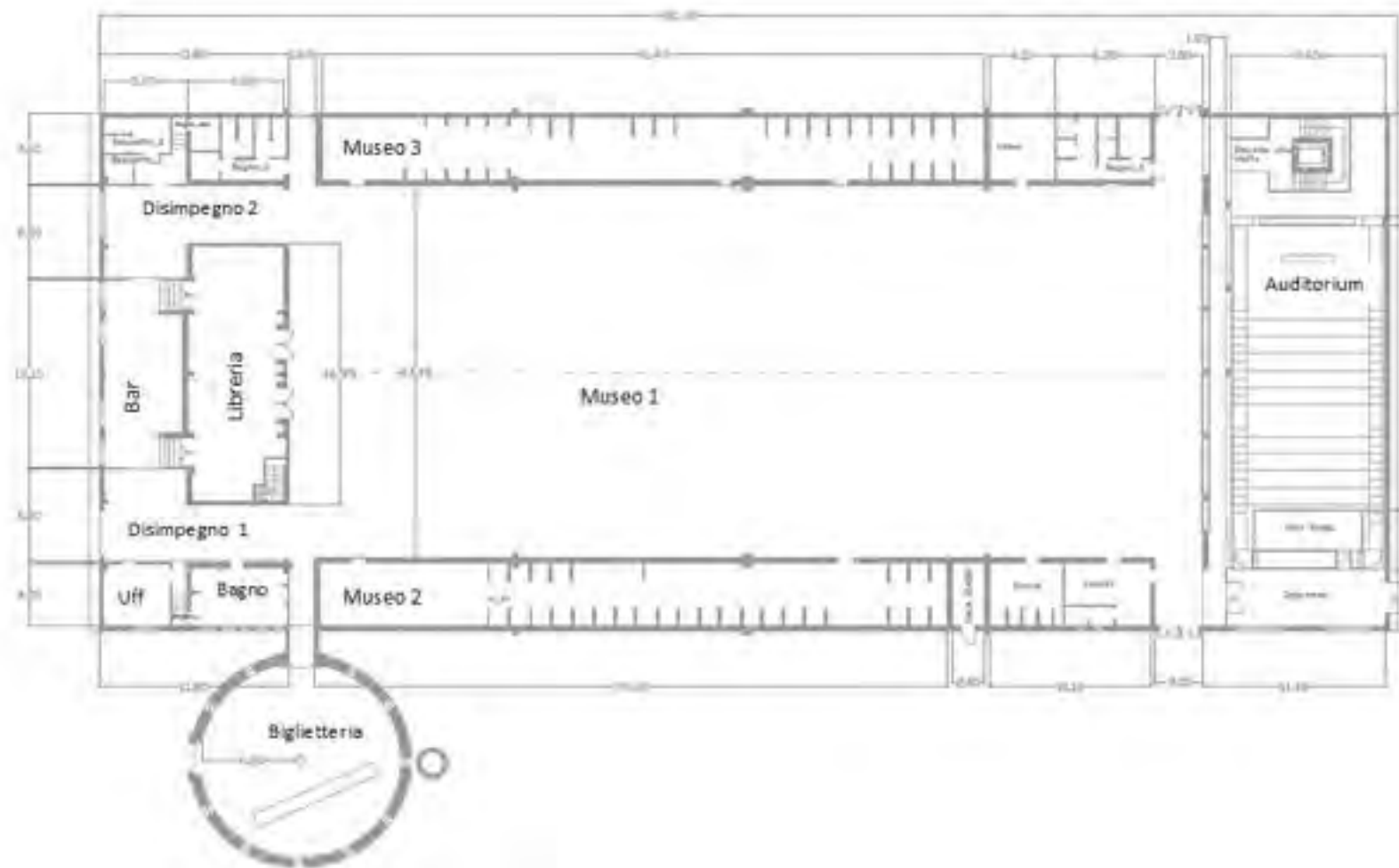


Figura 5.1.1. Planimetria museo del carbone

Tabella 5.1.1. Orari di apertura museo del Carbone

Periodo	Orario
21 giugno – 30 settembre	aperto tutti i giorni: 10.00 - 19.00
1 ottobre – 20 giugno	aperto dal martedì alla domenica: 10.00 - 18.00 chiuso il lunedì (se non festivo)



Figura 5.1.2. Complesso del Museo , prospetto SE



Figura 5.1.3. Complesso del Museo, prospetto NE (sala conferenza e frontone della Lampisteria)



Figura 5.1.4. Ingresso del Museo (ex sala Caldaie)

Si stima che le visite medie annue siano circa 20.000 con picchi di 300-400 persone ricadenti nel periodo estivo o durante i giorni di festa primaverili.

L'unico ambiente caratterizzato da un profilo di utilizzo continuo per tutta la durata dell'anno è l'ufficio, dove abitualmente sono presenti da 2 a 4 dipendenti addetti ad attività di ufficio, manutenzione della zona espositiva e di servizio alle zone commerciali.

Tabella 5.1.2. Tipologia di utenti e profilo d'uso della struttura

Utente	Ambienti utilizzati	Tipo attività	Presenza
Lavoratori museo	Ingresso, zona uffici, zona commerciale	Attività sedentaria	Continua
Addetto manutenzione	Tutto l'edificio	Attività fisica lieve	Periodica
Visitatori del Museo	Zona espositiva, zona commerciale	Cammino	Saltuaria
Partecipanti a conferenze	Sala conferenza, zona espositiva, zona commerciale	Attività sedentaria	Saltuaria

5.2 Il sistema impiantistico

L'impianto di climatizzazione per il riscaldamento ed il raffrescamento, al servizio dell'intero complesso, è di tipo misto (tutt'aria e idronico). Il generatore (Fig. 5.2.1.) è costituito da una pompa di calore aria – acqua, Systemair CLH202-LN accoppiato ad un'unità di trattamento d'aria (UTA), per servire la zona commerciale, ed a terminali idronici (fancoil) per l'ufficio ed il deposito. Il generatore, posto all'esterno dell'edificio in uno spazio apposito, è provvisto di gruppo idronico che scambia calore con l'acqua. Il fluido così termo condizionato (refrigerato o riscaldato) viene poi pompato verso l'UTA con ricircolo parziale d'aria interna, e verso i due ventilconvettori, posizionati nell'ufficio e nei locali adibiti a deposito.

La distribuzione primaria del fluido termovettore (acqua) avviene tramite una rete di tubazioni di diversa sezione. I terminali idronici (N° 2 ventilconvettori da 90 w) sono alimentati dalla stessa pompa HP1. Il deposito non necessita di climatizzazione perciò il terminale è attualmente scollegato dal circuito di distribuzione per limitare le perdite di calore dalla tubazione direttamente a contatto con l'ambiente esterno e con lo strato isolante ammalorato.



Figura 5.2.1. Generatore a pompa di calore



Figura 5.2.2. UTA a servizio della zona commerciale

L'Unità di Trattamento d'Aria a servizio della zona commerciale, posta sopra la copertura in corrispondenza del locale ufficio, è direttamente alimentata dalla HP1 e la tubazione è prevalentemente sotto traccia.



Figura 5.2.5-1. Canalizzazioni esterne ed interne di distribuzione dell'aria nella zona commerciale



Sono inoltre presenti due tipologie di sistemi di ventilazione, uno integrato nell'UTA al servizio della zona commerciale e l'altro costituito da un sistema di ventole aspiratrici dedicato alla zona espositiva. L'UTA utilizza parte dell'aria interna che, miscelata con quella primaria esterna, garantisce il rinnovo recuperando parte del calore.

5.3 Monitoraggio invernale

Sulla base degli usi dell'edificio e delle categorie di utenti si è proceduto a valutare, durante la stagione invernale ed estiva, le condizioni della qualità ambientale, sia nelle zone caratterizzate da un uso continuativo da parte dei dipendenti che in quelle di maggior pregio dello spazio espositivo.

Nello specifico sono state effettuate:

- misure microclimatiche e analisi di comfort nella zona adibita ad ufficio, nella quale si evidenzia la presenza fissa giornaliera di almeno un operatore;
- misure microclimatiche nelle zone espositive e nella zona commerciale (museo1, libreria, bar);

Come per il museo dei Paleo Ambienti Sulcitani, i rilievi sono stati condotti utilizzando le stazioni microclimatiche Grillo MMTS (tab. 5.3.1.). I principali dati caratteristici degli ambienti monitorati sono riportati in tabella 5.3.2.

Tabella 5.3.1. Strumentazione adoperata per il monitoraggio ambientale negli ambienti oggetto di studio

Ambienti monitorati	Esposizione	Ombreggiamento	Centraline microclimatiche indoor				Calcolo degli indici PMV e PPD
			C1	C2	C3	C4	
Ufficio	SO - SE	no		x			x
Libreria	nessuno	no	x				
Bar	SO	no			x		
Museo 1	SO - NE	no				x	

Tabella 5.3.2. Dati caratteristici degli ambienti

Ambienti monitorati	N° occupanti	N° presenze	S _{utile} [m ²]	N. finestre	Telaio	Schermature	Tipo di vetro
BAR	Saltuaria	variabile	60	1	alluminio	nessuna	singolo
Libreria	Saltuaria	variabile	92,2	-	-	-	-
Ufficio	Continua	2-4 persone	16,7	2	legno	veneziane	singolo
Museo 1	Saltuaria	variabile	1473,2	1	alluminio	nessuna	singolo

Nello specifico, una stazione microclimatica è stata posizionata presso le postazioni di lavoro del locale ufficio. Si tratta di un'area di piccole dimensioni, riscaldata tramite stufe elettriche ad aria calda e ad irraggiamento in quanto il ventilconvettore collegato alla pompa principale non era operante.

Il locale è provvisto di finestre quadrate (120x120 cm) a doppia anta costituite da un telaio ligneo, con vetro singolo e veneziane interne, con limitata tenuta all'aria.

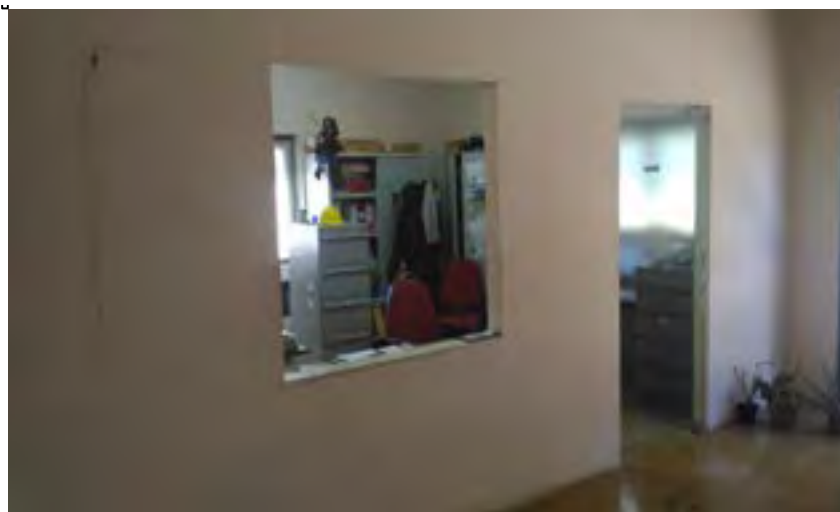


Figura 5.3.1. Ingresso ufficio

Due centraline sono state posizionate nella libreria e nel bar, dove attualmente la climatizzazione (estiva ed invernale) viene utilizzata in continuo durante gli orari di servizio. I due ambienti, climatizzati dallo stesso generatore, alimentato da una pompa di calore aria-acqua integrata con una unità di trattamento dell'aria con ripresa di aria canalizzata, sono tra loro comunicanti e confinanti con l'area espositiva. Dei due locali solo la zona bar presenta un unico lato esterno orientato a SO e caratterizzato da finestre prive di schermatura.



Figura 5.3.2. Libreria



Figura 5.3.3. Bar

L'ultima stazione microclimatica è stata posizionata nella zona espositiva principale (museo 1), che non presenta servizi di climatizzazione, ma solo un sistema di ventilazione, costituito da diversi aspiratori lasciati accesi in continuo durante la stagione estiva. Dalle indagini soggettive è emerso che la criticità maggiore si manifesta durante il periodo estivo per via dei fenomeni di surriscaldamento in concomitanza con il maggiore afflusso di visitatori.

Le coperture del locale sono realizzate con vetrate dotate di infissi a telaio metallico e vetro singolo sostenute da un graticcio di conglomerato cementizio. Le superfici finestrate presentano segni di degrado del telaio per effetto della corrosione causata dal ristagno dell'umidità, determinando conseguenti infiltrazioni d'acqua meteorica. La vetrata in testata è anch'essa costituita da un graticcio di conglomerato cementizio su cui sono stati apposti infissi quadrati a telaio fisso e solo alcuni apribili.



Figura 5.3.4. Museo 1 (lampisteria)

Le misure sono state ottenute nelle reali condizioni operative degli ambienti, dal lunedì alla domenica nelle ore lavorative 10:00 – 18:00, assumendo - con riferimento alla stagione invernale - valori fissi di resistenza termica all'abbigliamento e di tasso metabolico rispettivamente 1 clo e a 1,2 met. I dati sono stati registrati ad intervalli temporali di 15 minuti e la misura ottenuta fornisce un valore istantaneo di massima, di minima e di media, riferito a ciascuna variabile misurata. Anche in questo caso per i calcoli effettuati si è sempre utilizzata la misura media.

Per una completa analisi del microclima interno si è proceduto al monitoraggio delle principali grandezze climatiche esterne: temperatura ed umidità relativa. Il meteo evidenzia, nelle settimane dei rilievi, condizioni variabili, caratterizzate da un progressivo aumento dell'instabilità atmosferica nel corso del periodo.

Tabella 5.3.3. Condizioni meteorologiche 08 - 19 mar 2018 - meteo.it

Condizioni meteo								
Periodo monitoraggio	Fenomeni	T min (°C)	T max (°C)	Ur _{min} (%)	Ur _{max} (%)	V _{media} (km/h)	V _{max} (km/h)	
08-mar	 Pioggia e schiarite	4	15	82	90	7	17	
09-mar	 Poco nuvoloso	11	19	82	93	7	17	
10-mar	 Poco nuvoloso	11	21	82	94	12	22	
11-mar	 Pioggia e schiarite	12	17	87	93	13	26	
12-mar	 Nubi sparse	12	18	67	100	19	33	
13-mar	 Poco nuvoloso	9	18	63	93	10	22	
14-mar	 Poco nuvoloso	5	21	64	93	7	18	
15-mar	 Pioggia e schiarite	11	20	88	94	13	22	
16-mar	 Pioggia e schiarite	13	19	82	100	10	22	
17-mar	 Pioggia e schiarite	10	17	59	93	14	30	
18-mar	 Temporale e schiarite	7	16	72	100	20	33	
19-mar	 Temporale e schiarite	6	15	67	100	16	37	

L'andamento dei dati climatici, registrati tramite sensore tinytag, è riportato nella grafica sottostante e i valori minimi e massimi in tabella 5.3.4. Nell'intervallo di tempo considerato (10:00 – 18:00) la temperatura media esterna non ha subito importanti variazioni con minime di circa 11 – 15 °C registrate in tarda mattina e massime di circa 15 – 22 °C. La giornata più calda è quella del 14 marzo in cui la T esterna sfiora i 23 °C nell'ora di punta (h 14:30) mentre quella più fredda è dell'8 marzo con una T_{max} di 14,9 °C. Si osserva, globalmente, che l'umidità relativa ha subito variazioni percentuali inferiori al 30%.

Tabella 5.3.4. Valori minimi e massimi della temperatura e dell'umidità relativa esterna

Periodo monitoraggio	Time	Te _{min} (°C)	Time	UR _{max} (%)	Time	Te _{max} (°C)	Time	UR _{min} (%)
	h 10:00 – 18:00		h 10:00 – 18:00		h 10:00 – 18:00		h 10:00 – 18:00	
08/03/2018	18:00	11,2	13:30	59,4	13:30	14,9	18:00	85,2
09/03/2018	10:00	13,8	14:00	63,1	14:00	19,4	10:00	93,9
10/03/2018	10:00	17	14:00	59,2	14:30	23	18:00	81
11/03/2018	13:30	13,5	16:30	70,6	10:00	16,6	14:00	88,2
12/03/2018	18:00	14	14:30	59	14:30	19,8	18:00	78
13/03/2018	18:00	14,7	11:30	45,7	13:00	18,2	18:00	81,1
14/03/2018	18:00	15	14:30	42	14:30	22,7	18:00	73,8
15/03/2018	18:00	15,1	11:30	60,6	12:00	20,2	15:00	89,9
16/03/2018	18:00	14,8	14:00	75,6	14:00	17,3	18:00	83,2
17/03/2018	10:00	13,4	14:30	54,1	14:30	19,5	10:00	82,7
18/03/2018	10:00	11,9	15:00	56,2	14:30	17,8	10:00	76,1
19/03/2018	18:00	13	14:30	44,6	14:30	20,2	10:00	67,7

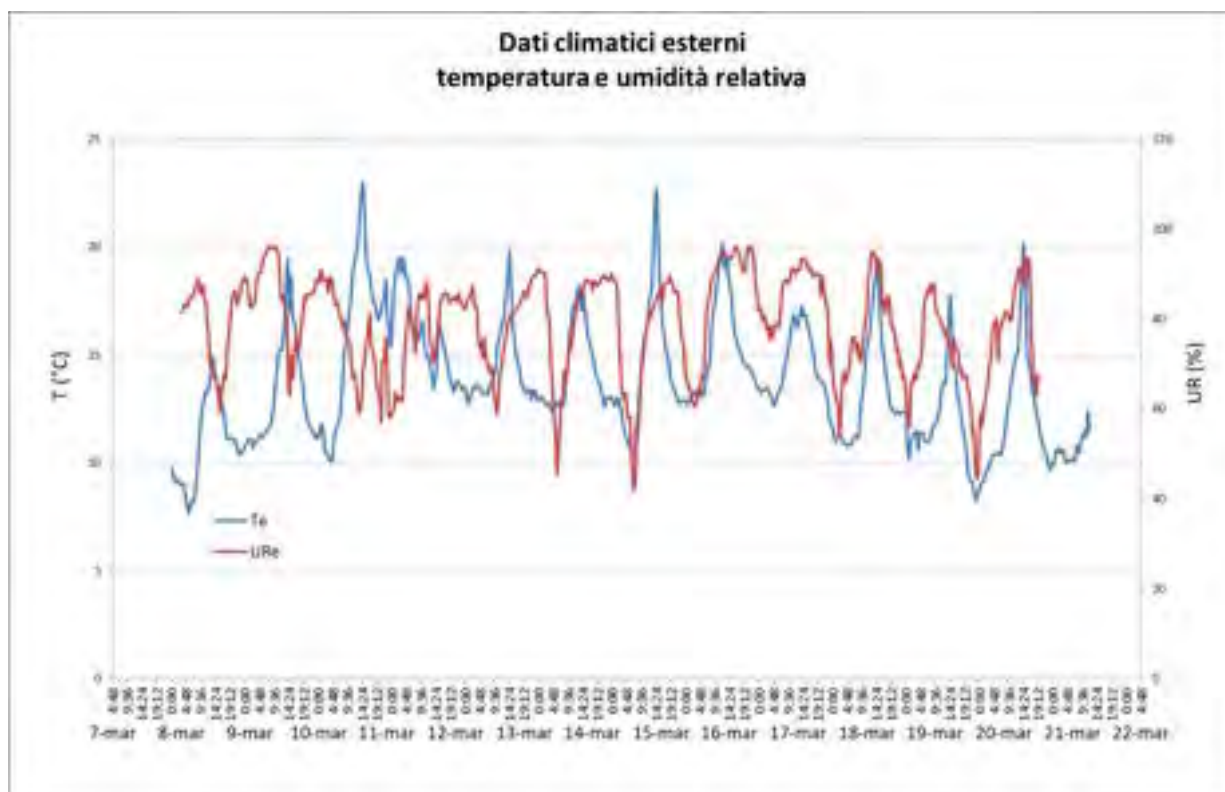


Figura 5.3.5. Andamento dei dati climatici esterni – 08/3/18 – 19/3/18

Nelle tabelle seguenti, in cui è evidenziato il posizionamento della strumentazione, sono riportati, per i vari ambienti esaminati, i valori medi delle seguenti variabili indoor, calcolati nell'orario di occupazione:

- temperatura dell'aria T_{aria} (°C);
- temperatura radiante T_{rad} (°C);
- umidità relativa dell'aria UR_{aria} (%);
- velocità dell'aria V_{aria} (m/s);
- concentrazione di anidride carbonica CO_2 (ppm).

La variazione dei parametri indoor e outdoor è mostrata nelle grafiche sottostanti.

Tabella 5.3.5. Valori medi giornalieri - Libreria

Libreria					
Periodo monitoraggio	T_{aria} (°C)	T_{rad} (°C)	UR_{aria} (%)	V_{aria} (m/s)	Posizionamento centralina (x)
08/03/2018	17,83	18,45	62,22	0,03	
09/03/2018	18,83	19,45	65,3	0,03	
10/03/2018	19,85	20,4	66,79	0,04	
11/03/2018	18,92	19,28	67,29	0,03	
12/03/2018	19,21	19,68	61,39	0,02	
13/03/2018	20,46	21,06	57,8	0,04	
14/03/2018	21,01	21,64	54,37	0,04	
15/03/2018	21,16	21,87	58,59	0,04	
16/03/2018	20,8	21,44	63,7	0,03	
17/03/2018	20,42	21,05	58,26	0,04	
18/03/2018	19,71	20,36	57,16	0,03	
19/03/2018	18,97	19,48	54,5	0,02	

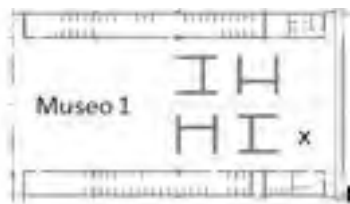
Tabella 5.3.6. Valori medi giornalieri - Ufficio

Ufficio					
Periodo monitoraggio	T _{aria} (°C)	T _{rad} (°C)	UR _{aria} (%)	V _{aria} (m/s)	Posizionamento centralina(x)
08/03/2018	19,76	18,4	57,42	0,09	
09/03/2018	20,57	19,44	60,17	0,08	
10/03/2018	21,02	20,4	63,97	0,06	
11/03/2018	19,88	19,94	64,42	0,05	
12/03/2018	18,41	18,88	70,71	0,05	
13/03/2018	20,95	20,57	59,23	0,06	
14/03/2018	21,14	21,26	55,74	0,06	
15/03/2018	20,71	21,19	61,27	0,05	
16/03/2018	20,57	21,55	62,39	0,05	
17/03/2018	20,78	20,78	60,07	0,04	
18/03/2018	20,02	20,05	59,19	0,04	
19/03/2018	17,43	17,89	64,9	0,02	

Tabella 5.3.7. Valori medi giornalieri - Bar

Bar					
Periodo monitoraggio	T _{aria} (°C)	T _{rad} (°C)	UR _{aria} (%)	V _{aria} (m/s)	Posizionamento centralina (x)
08/03/2018	23,52	24,09	44,08	0,21	
09/03/2018	25,09	25,92	45,01	0,26	
10/03/2018	25,98	26,65	46,73	0,17	
11/03/2018	19,11	19,62	67,19	0,02	
12/03/2018	21,41	21,62	54,64	0,06	
13/03/2018	26,41	27,15	40,44	0,19	
14/03/2018	26,82	27,44	38,3	0,2	
15/03/2018	27,85	28,41	39,85	0,2	
16/03/2018	25,56	25,97	48,66	0,18	
17/03/2018	25,84	26,15	42,78	0,25	
18/03/2018	25,55	25,77	40,66	0,29	
19/03/2018	20,77	20,87	49,19	0,06	

Tabella 5.3.8. Valori medi giornalieri - Museo 1

Museo 1					
Periodo monitoraggio	T _{aria} (°C)	T _{rad} (°C)	UR _{aria} (%)	V _{aria} (m/s)	Posizionamento centralina (x)
08/03/2018	16,12	16,7	68,58	0,07	
09/03/2018	17,29	17,86	71,85	0,07	
10/03/2018	18,99	19,7	70,08	0,06	
11/03/2018	17,98	18,58	70,53	0,07	
12/03/2018	17,88	18,57	65,71	0,07	
13/03/2018	19,05	19,65	63,01	0,07	
14/03/2018	19,7	20,39	59,99	0,06	
15/03/2018	19,52	20,15	64,53	0,06	
16/03/2018	19,1	19,69	70,62	0,07	
17/03/2018	18,54	19,27	64,51	0,08	
18/03/2018	17,68	18,43	63,08	0,08	
19/03/2018	17,9	18,58	57,14	0,08	

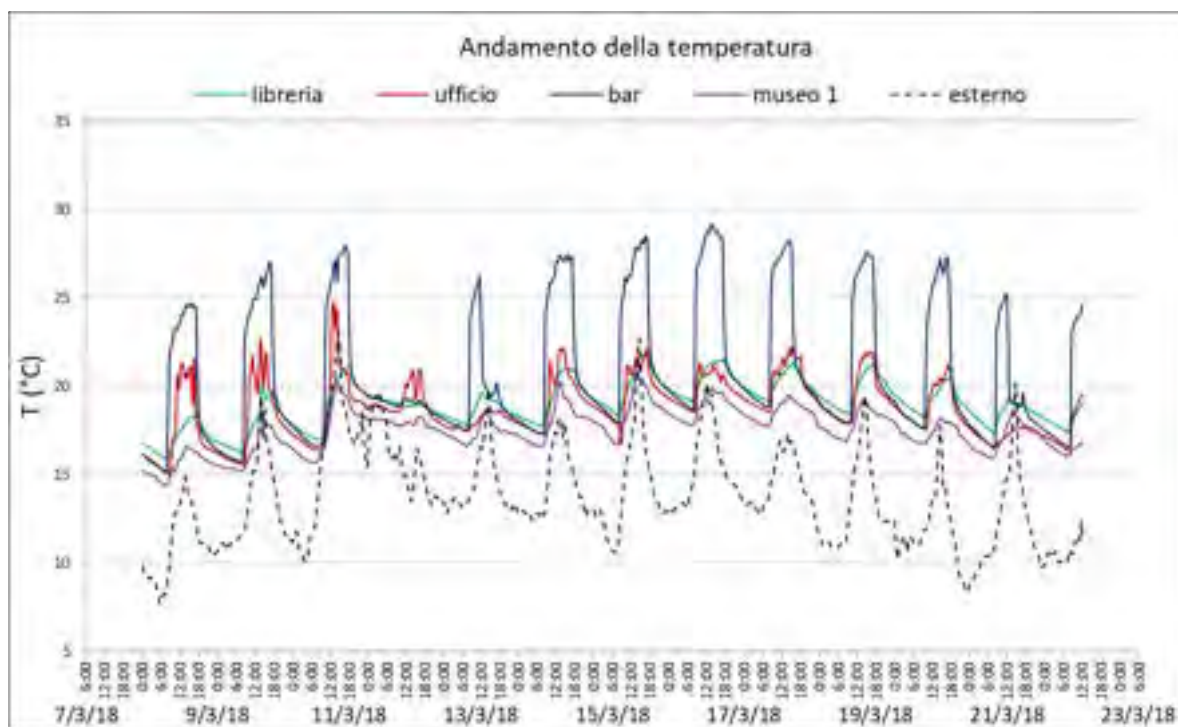


Figura 5.3.6. Profilo di temperatura all'esterno e all'interno degli ambienti del museo del carbone– 08-19 mar 2018.

Tabella 5.3.9. Statistica delle variabili di temperatura

Temperatura (°C)		
Ambiente	Media	Deviazione Standard σ
Bar	24,5	3,3
Ufficio	20,2	1,54
Libreria	19,8	1,18
Museo 1	18,31	1,15
Esterno	16,2	2,26

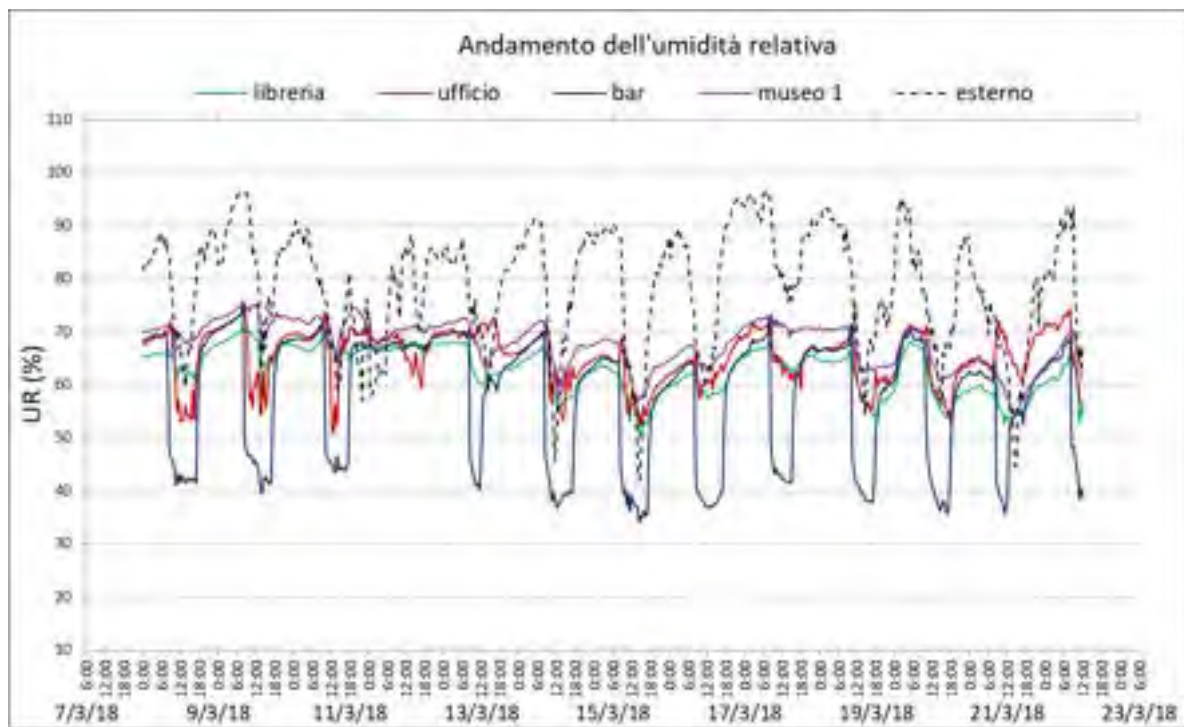


Figura 5.3.7. Profilo di umidità all'esterno e all'interno degli ambienti del museo del Carbone – 08-19 mar 2018.

Tabella 5.3.10. Statistica delle variabili di umidità relativa

Umidità relativa (%)		
Ambiente	Media	Deviazione Standard σ
Bar	46,46	9,80
Ufficio	61,64	5,38
Libreria	60,61	4,79
Museo 1	65,80	4,87
Esterno	78,90	11,07

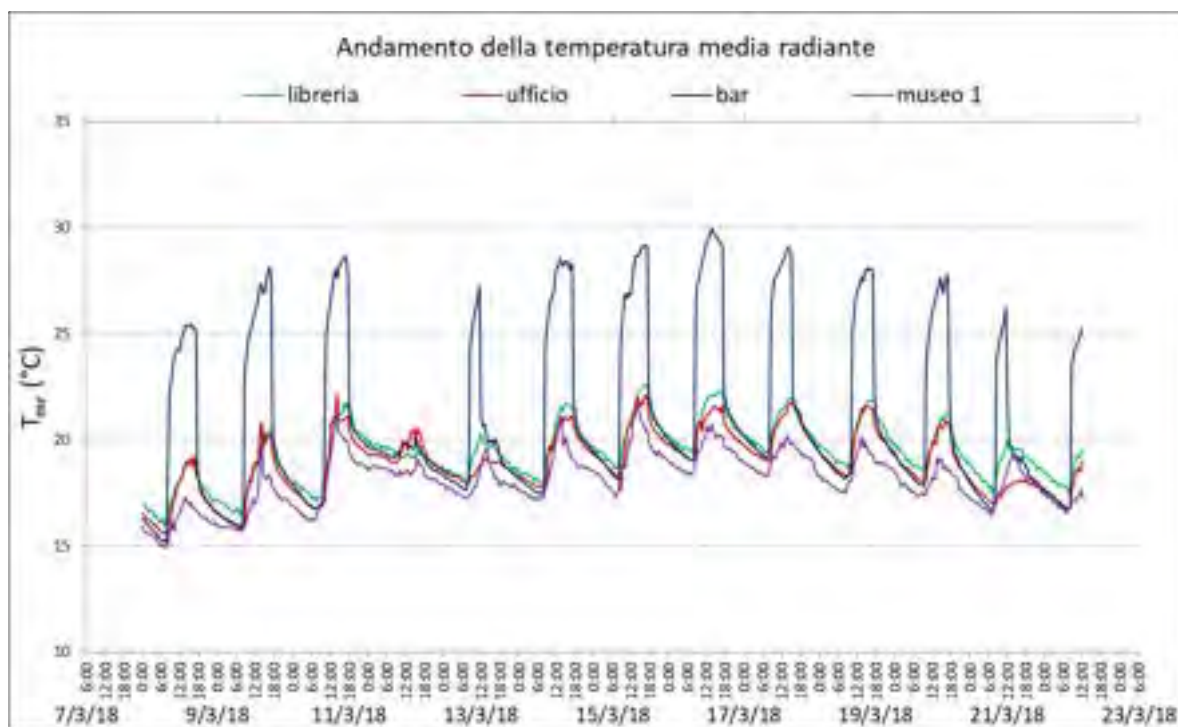


Figura 5.3.8. Andamento della temperatura radiante nei locali del museo del Carbone – 08-19 mar 2018.

Tabella 5.3.11. Statistica delle variabili della temperatura radiante

Temperatura radiante (°C)		
Ambiente	Media	Deviazione Standard σ
Bar	24,97	3,59
Ufficio	20,01	1,27
Libreria	20,35	1,23
Museo 1	18,96	1,17



Figura 5.3.9. Andamento della velocità nei locali del museo del Carbone - 08-19 mar 2018.

Tabella 5.3.12. Statistica delle variabili della velocità dell'aria

Velocità dell'aria (m/s)		
Ambiente	Media	Deviazione Standard σ
Bar	0,17	0,14
Ufficio	0,05	0,04
Libreria	0,03	0,02
Museo 1	0,07	0,03

Tabella 5.3.13. Valori medi giornalieri di concentrazione di CO₂ negli ambienti del museo del carbone

Periodo monitoraggio	CO ₂ (ppm)			
	Libreria	Ufficio	Bar	Museo 1
08/03/2018	673,47	477,82	657,7	393,64
09/03/2018	664,71	476,35	652,05	382,7
10/03/2018	681,12	475,82	659,41	403,88
11/03/2018	680,82	455,23	672,47	412,35
12/03/2018	685,67	494,2	664	400,67
13/03/2018	686,76	501,53	670,29	399,94
14/03/2018	667,13	466,26	645,8	385,6
15/03/2018	683,5	510,5	655,71	398,57
16/03/2018	690,87	509,94	655,18	397,37
17/03/2018	678,26	526,6	653,46	402,73
18/03/2018	691,58	465,53	673,12	412,76
19/03/2018	677,47	505,94	676,94	399,29

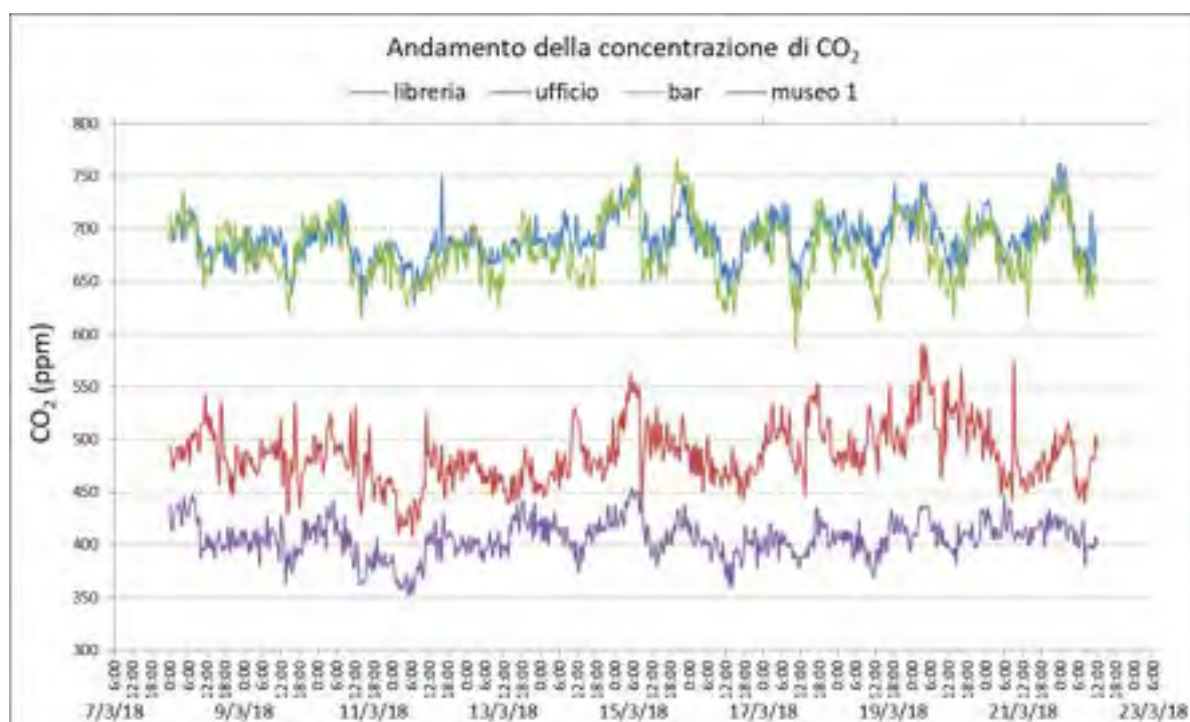


Figura 5.3.10. Andamento della concentrazione di anidride carbonica negli ambienti del museo del Carbone 8-19 mar 2018.

Tabella 5.3.14. Statistica delle variabili della concentrazione di anidride carbonica

Concentrazione di CO ₂ (ppm)		
Ambiente	Media	Deviazione Standard σ
Bar	661,68	22,31
Ufficio	488,15	29,48
Libreria	680,10	17,12
Museo 1	399,23	15,92

Nelle grafiche seguenti si riporta la variazione degli indici PMV e PPD e della temperatura operativa calcolati per la zona *ufficio*.

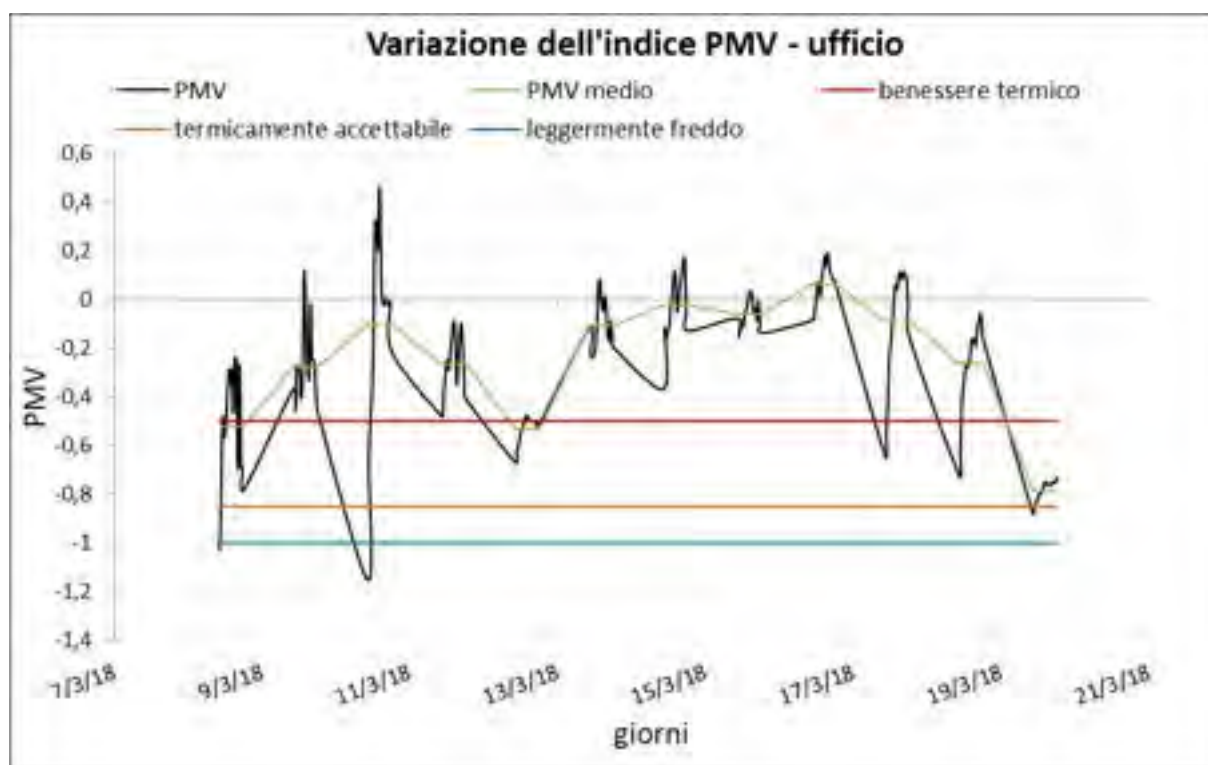


Figura 5.3.11. Andamento del voto medio previsto nel locale ufficio – Periodo 8-19 mar 2018

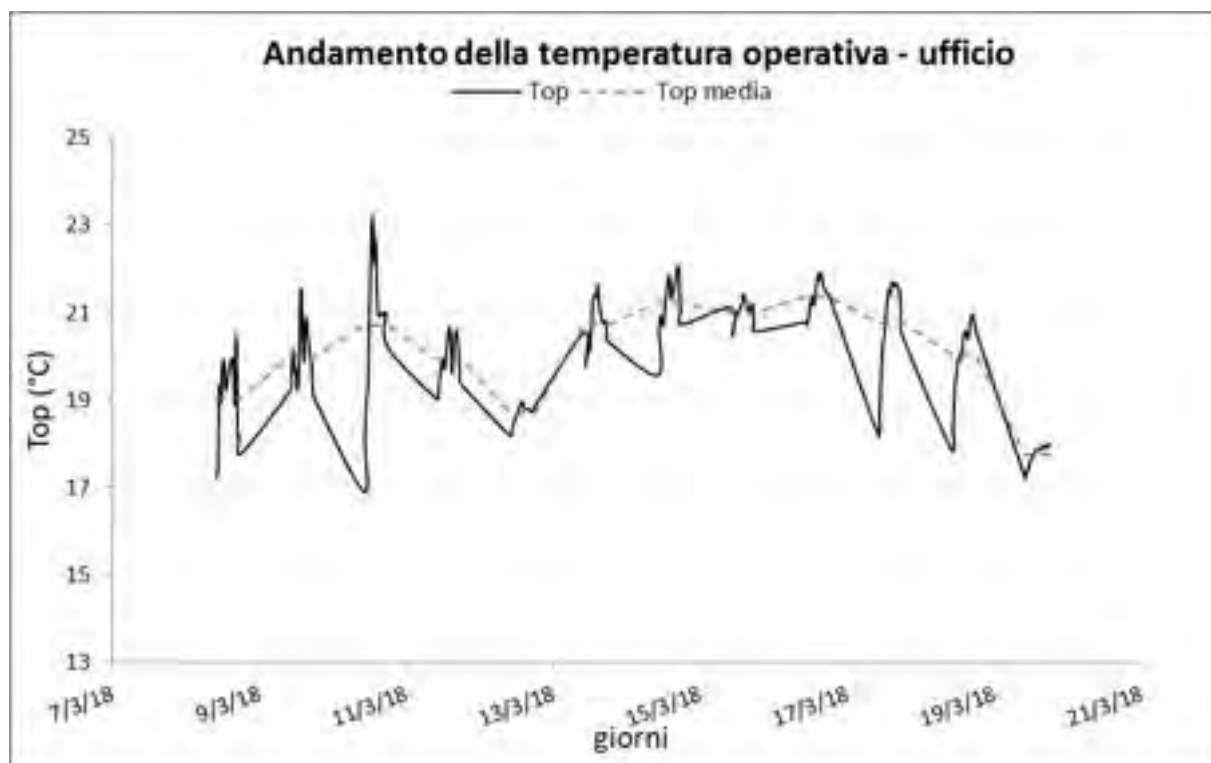


Figura 5.3.12. Profilo di temperatura operativa nel locale ufficio – Periodo 8-19 mar 2018

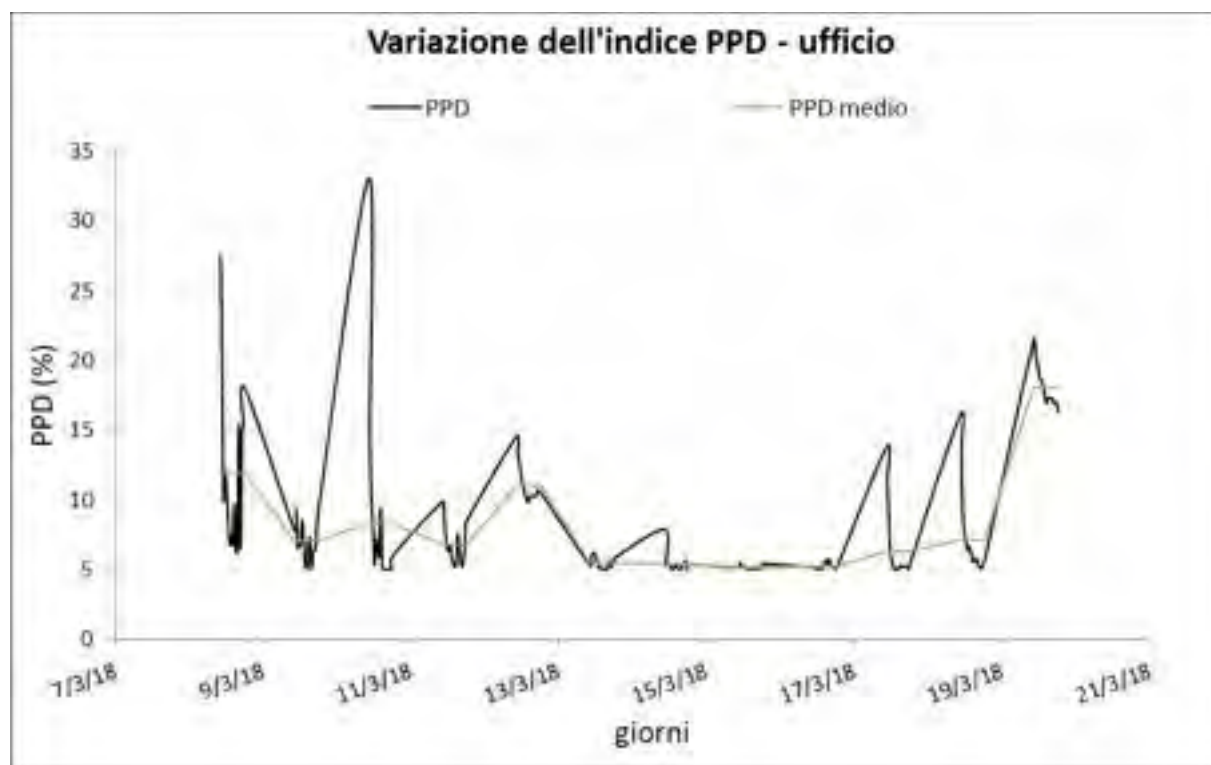


Figura 5.3.13. Andamento della percentuale degli insoddisfatti nel locale ufficio - Periodo 8-19 mar 2018



Figura 5.3.14. Percentuale di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto medio previsto (PMV). Ufficio - 8-19 mar 2018

5.4 Esito del monitoraggio

Dall'analisi del grafico riportato alla figura 5.3.6., si evincono variazioni di temperatura omogenee e confinate in un range piuttosto ristretto di valori per gli ambienti *museo 1*, *libreria* e *ufficio* con una deviazione standard media di circa 1 °C. Considerazioni differenti vanno fatte per il locale *bar*, il quale presenta variazioni marcate con $\Delta T_{\max}$ registrate dell'ordine dei 7 °C. Nel medesimo ambiente, per l'intero periodo di monitoraggio, la temperatura media calcolata è di 24, 5 °C, con deviazione standard di 3,3 °C. Tra tutti gli ambienti monitorati questo risulta essere il più caldo in quanto beneficia sia di un'esposizione solare favorevole che dell'apporto di calore del sistema di condizionamento.

Dall'analisi dei dati si sono identificati:

- i locali *ufficio* e *bar* come i più caldi, con variazioni marcate e di poco inferiori ai 10 °C;
- gli ambienti *museo1* e *libreria* intermedi, con scostamenti inferiori ai 4 °C.

Nel *museo1* e nell'*ufficio* vi sono delle infiltrazioni d'acqua meteorica che aumentano la percentuale di umidità relativa, mancando di conseguenza, i valori dettati dalle linee guida, che prevedono per la stagione invernale una percentuale compresa tra 35 e 45. Nello specifico, nel *museo1* si raggiungono valori giornalieri di umidità relativa medi compresi tra 60 e 70 %, mentre nell'*ufficio* ricadenti nell'intervallo 55 – 64 %. La zona espositiva principale non è dotata di un sistema di condizionamento, mentre la zona ufficio, avendo il ventilconvettore in manutenzione, è stata unicamente riscaldata con l'utilizzo di apparecchi elettrici. Il locale *libreria* tuttavia, pur avendo il sistema di condizionamento, ma in mancanza di un sistema di regolazione dell'umidità, non rispetta i valori indicati dal decreto, e tale parametro risulta mediamente compreso tra i 54 e i 66 punti percentuali.

La velocità dell'aria risulta minima in tutti gli ambienti, in concomitanza con i giorni di chiusura (11-12-19 mar - domenica e lunedì). I valori medi giornalieri sono adeguati per tutti gli ambienti ad eccezione per la *libreria*, in cui i movimenti d'aria risultano uguali o al di sotto del minimo consigliato (0,05 m/s), e per la zona *bar*, in cui si eccedono i 1,5 m/s.

Come evidenziato in tabella 5.3.13., i valori medi giornalieri della concentrazione di anidride carbonica risultano mediamente compresi tra, 400 e 500 ppm per il locale ufficio, 300 e 400 ppm per il *museo1* e tra 600 e 700 ppm per la *libreria* e per il *bar*. Tali concentrazioni risultano ampiamente al di sotto dei valori ammissibili.

Dai rilievi condotti sul comfort termico si è evidenziato che l'ambiente *ufficio* è tale da consentire, anche in assenza di sistema di condizionamento, un riscaldamento adeguato col solo ausilio di stufette elettriche in riferimento all'esigua volumetria.

Dalla tabella 5.4.1 riassuntiva, emerge che la valutazione dell'ambiente ricade all'interno dell'intervallo di benessere termico, con valori del voto medio previsto compresi tra $-0,53 \leq PMV_m \leq 0,06$ e della percentuale di insoddisfatti sempre inferiore al 20%.

Tabella 5.4.1. Valori medi degli indici PMV e PPD, della temperatura operativa e valutazione ambiente.

Periodo 08-19 mar (h. 10 -18)	Ufficio			Valutazione ambiente
	PMV _m	PPD _m	Top _m	
08/03/2018	-0,52	11,88	19,04	Benessere termico
09/03/2018	-0,28	7,08	19,99	Benessere termico
10/03/2018	-0,11	8,31	20,7	Benessere termico
11/03/2018	-0,27	6,78	19,93	Benessere termico
12/03/2018	-0,53	11,01	18,69	Benessere termico
13/03/2018	-0,11	5,45	20,72	Benessere termico
14/03/2018	-0,03	5,39	21,21	Benessere termico
15/03/2018	-0,06	5,14	21	Benessere termico
16/03/2018	0,06	5,22	21,35	Benessere termico
17/03/2018	-0,09	6,29	20,76	Benessere termico
18/03/2018	-0,26	7,13	20,04	Benessere termico
19/03/2018	-0,78	18,06	17,74	Termicamente accettabile

Nello specifico, dall'analisi degli aerogrammi, l'ufficio ricade in riferimento al tempo di monitoraggio, per il 90,2 % nell'intervallo di benessere termico, per il 9,5 % in "termicamente accettabile", mentre solo lo 0,3% nelle condizioni termiche di "leggermente freddo".



Anche l'analisi della temperatura operativa conferma i risultati ottenuti dal calcolo degli indicatori di comfort. Infatti, in riferimento alla stagione invernale i valori delle temperature operative rientrano, per quasi tutto il tempo considerato, nel range 20-24 °C, consigliato dalla UNI 15251.

5.5 Monitoraggio estivo

L'indagine microclimatica ha interessato, anche per il museo del Carbone, la stagione estiva. I rilievi sono stati condotti dal 27 luglio al 5 agosto 2018, nelle zone caratterizzate da un uso continuativo da parte dei dipendenti (*ufficio*), nei locali adibiti ad attività commerciale (*libreria* e *BAR*) e nella sala espositiva principale (*museo1*).

Alla tab. 5.5.2. si evidenziano condizioni climatiche pressoché stabili per la quasi totalità del tempo di monitoraggio, ad eccezione delle giornate del 4 e del 5 agosto nelle quali si registrano temporali e schiarite. Le specifiche sulla strumentazione utilizzata sono riportate in maniera sintetica alla tabella 5.5.1.

Tabella 5.5.1. Strumentazione adoperata per il monitoraggio ambientale negli ambienti oggetto di studio

Ambienti monitorati	Esposizione	Centraline microclimatiche indoor			Tinytag	Calcolo degli indici PMV e PPD
		C1	C3	C4		
Ufficio	SO - SE	x				x
Libreria	nessuno			x		
Bar	SO				x	
Museo 1	SO - NE		x			

Tabella 5.5.2. Condizioni meteorologiche 27 lug – 5 ago 2018 - meteo.it

Condizioni meteo								
Periodo monitoraggio	Fenomeni	T min (°C)	T max (°C)	Ur _{min} (%)	Ur _{max} (%)	V _{media} (km/h)	V _{max} (km/h)	
27-lug	 Poco nuvoloso	21	37	32	94	7	24	
28-lug	 Sole e caldo	20	39	24	94	9	15	
29-lug	 Poco nuvoloso	21	40	26	100	12	24	
30-lug	 Poco nuvoloso	21	37	23	94	10	22	
31-lug	 Poco nuvoloso	21	37	39	100	10	21	
01-ago	 Poco nuvoloso	23	38	42	94	10	30	
02-ago	 Poco nuvoloso	23	41	35	94	8	18	
03-ago	 Poco nuvoloso	23	38	27	94	9	24	
04-ago	 Temporale e schiarite	22	32	62	100	8	28	
05-ago	 Temporale e schiarite	21	33	49	94	8	18	

Nell'intervallo di tempo considerato 10:00-18:30 il profilo di temperatura esterna è caratterizzato da modeste oscillazioni, con valori di minimo compresi tra 27 e 30 °C e massimi tra 33 e 43,6 °C. Il $\Delta T_{e_{max}}$ registrato è < 15 °C, con forti escursioni termiche, dell'ordine dei 20 °C, tra il dì e la notte. Nelle ultime due giornate si ha un abbassamento delle temperature esterne con fenomeni di temporali e schiarite.

Tabella 5.5.3. Valori minimi, medi e massimi della temperatura e dell'umidità relativa esterna

Periodo monitoraggio	Time h 10:00 – 18:30	$T_{e_{min}}$ (°C)	Time h 10:00 – 18:30	$UR_{e_{max}}$ (%)	Time h 10:00 – 18:30	$T_{e_{max}}$ (°C)	Time h 10:00 – 18:30	$UR_{e_{min}}$ (%)
27-lug	10:30	28,9	10:30	56,8	15:00	42,7	15:30	22,3
28-lug	10:00	28,8	10:00	47,8	15:30	43,6	15:30	17
29-lug	10:00	29,4	10:00	46,2	15:00	43	15:00	17,7
30-lug	10:00	28,4	11:00	57,8	15:00	41,4	15:30	28
31-lug	10:00	28,4	10:00	56,6	15:30	40,7	16:00	33,7
01-ago	10:00	28,9	11:00	56,2	15:00	39,1	14:30	39,6
02-ago	10:00	30	10:00	55,2	15:30	42,2	15:30	28,1
03-ago	10:00	30,6	18:30	50,9	14:30	40,2	14:00	29,4
04-ago	14:30	24,8	14:30	75,2	11:30	31	11:00	55,7
05-ago	10:00	27,2	10:00	66,7	15:00	33	12:00	51

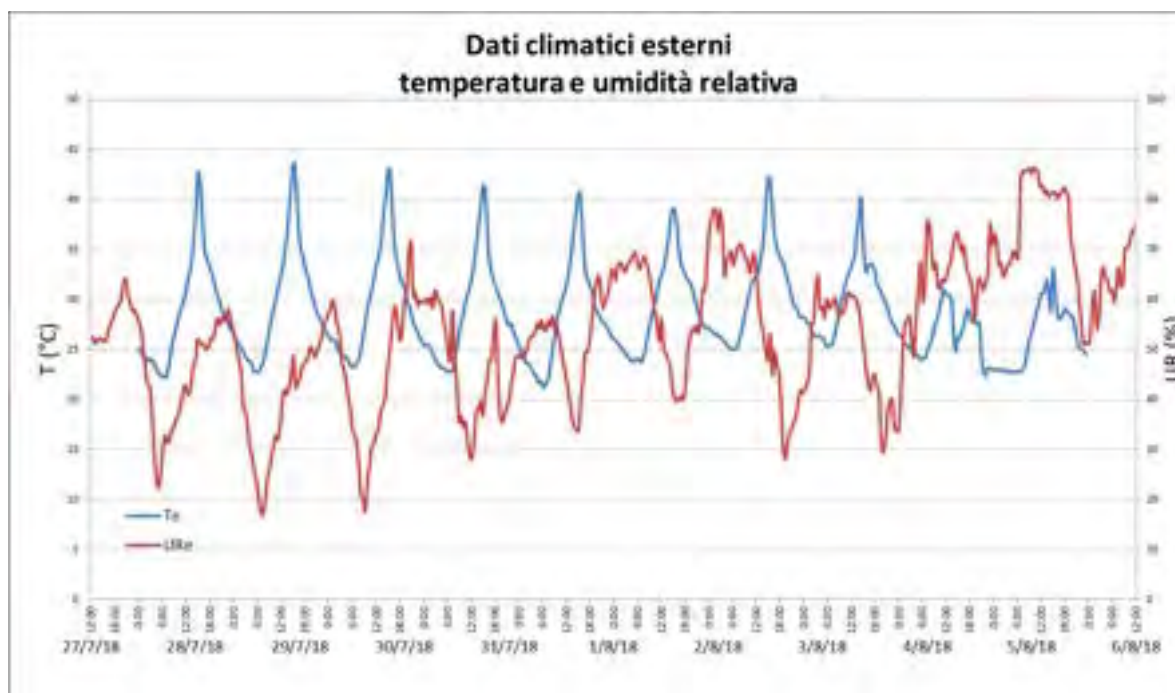


Figura 5.5.1. Andamento dei dati climatici esterni – 27/7/18 – 6/8/18

Per gli ambienti oggetto di studio, sono stati calcolati i valori medi giornalieri delle variabili indoor (T_{aria} , UR_{aria} , T_{rad} , v_{aria}) riportati nelle tabelle seguenti.

Tabella 5.5.4. Valori medi giornalieri - Libreria

Libreria					
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	T_rad (°C)	UR_aria (%)	V_aria (m/s)	Posizionamento centralina (x)
27/07/2018	28,22	26,91	53,00	0,27	
28/07/2018	28,64	27,35	41,95	0,30	
29/07/2018	29,41	27,97	44,43	0,20	
30/07/2018	28,65	27,24	53,48	0,21	
31/07/2018	28,50	27,11	60,15	0,17	
01/08/2018	29,24	27,89	62,11	0,21	
02/08/2018	29,72	28,34	57,18	0,18	
03/08/2018	29,62	28,12	52,35	0,20	
04/08/2018	28,05	26,45	66,10	0,28	
05/08/2018	27,43	25,95	66,35	0,25	

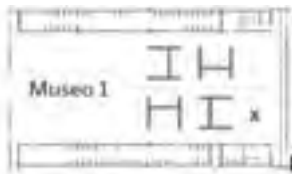
Tabella 5.5.5. Valori medi giornalieri - Ufficio

Ufficio					
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	T_rad (°C)	UR_aria (%)	V_aria (m/s)	Posizionamento centralina (x)
27/07/2018	30,09	29,20	47,52	0,10	
28/07/2018	30,88	29,98	36,22	0,17	
29/07/2018	30,94	29,99	40,44	0,12	
30/07/2018	30,79	29,78	46,92	0,12	
31/07/2018	29,79	28,99	54,99	0,11	
01/08/2018	30,80	29,85	57,70	0,10	
02/08/2018	31,27	30,33	53,32	0,13	
03/08/2018	31,70	30,65	45,81	0,11	
04/08/2018	30,01	29,03	61,19	0,12	
05/08/2018	29,31	28,53	60,20	0,11	

Tabella 5.5.6. Valori medi giornalieri - Bar

Bar			
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	UR_aria (%)	Posizionamento centralina (x)
27/07/2018	27,01	56,75	
28/07/2018	27,62	45,35	
29/07/2018	28,26	46,87	
30/07/2018	27,65	54,44	
31/07/2018	27,46	60,54	
01/08/2018	27,95	62,95	
02/08/2018	28,54	59,84	
03/08/2018	28,05	54,62	
04/08/2018	27,58	63,39	
05/08/2018	26,62	65,52	

Tabella 5.5.7. Valori medi giornalieri – Museo 1

Museo 1					
Periodo monitoraggio	T_aria (°C)	T rad (°C)	UR_aria (%)	V_aria (m/s)	Posizionamento centralina (x)
27/07/2018	32,25	31,19	41,53	0,07	
28/07/2018	32,84	31,74	33,45	0,10	
29/07/2018	33,21	32,03	37,12	0,07	
30/07/2018	32,47	31,33	42,48	0,11	
31/07/2018	31,98	30,86	50,41	0,12	
01/08/2018	33,12	31,99	51,49	0,08	
02/08/2018	33,21	32,03	37,12	0,07	
03/08/2018	33,51	32,37	42,63	0,07	
04/08/2018	30,97	29,91	59,92	0,07	
05/08/2018	31,17	30,20	56,37	0,06	

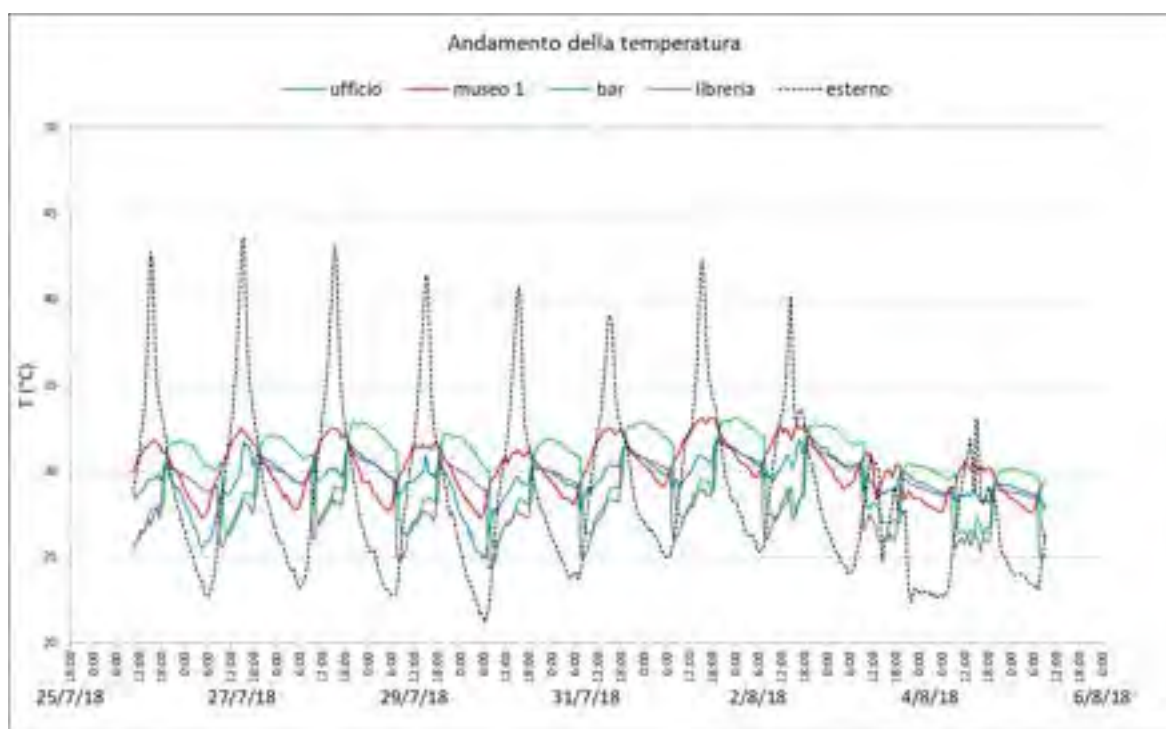


Figura 5.5.2. Profilo di temperatura all'esterno e all'interno degli ambienti del museo del carbone 27/7/18 – 05/8/18.

Tabella 5.5.8. Statistica delle variabili di temperatura

Temperatura (°C)		
Ambiente	Media	Deviazione Standard σ
Bar	29,83	2,14
Ufficio	29,57	1,29
Libreria	28,69	1,78
Museo 1	30,20	1,47

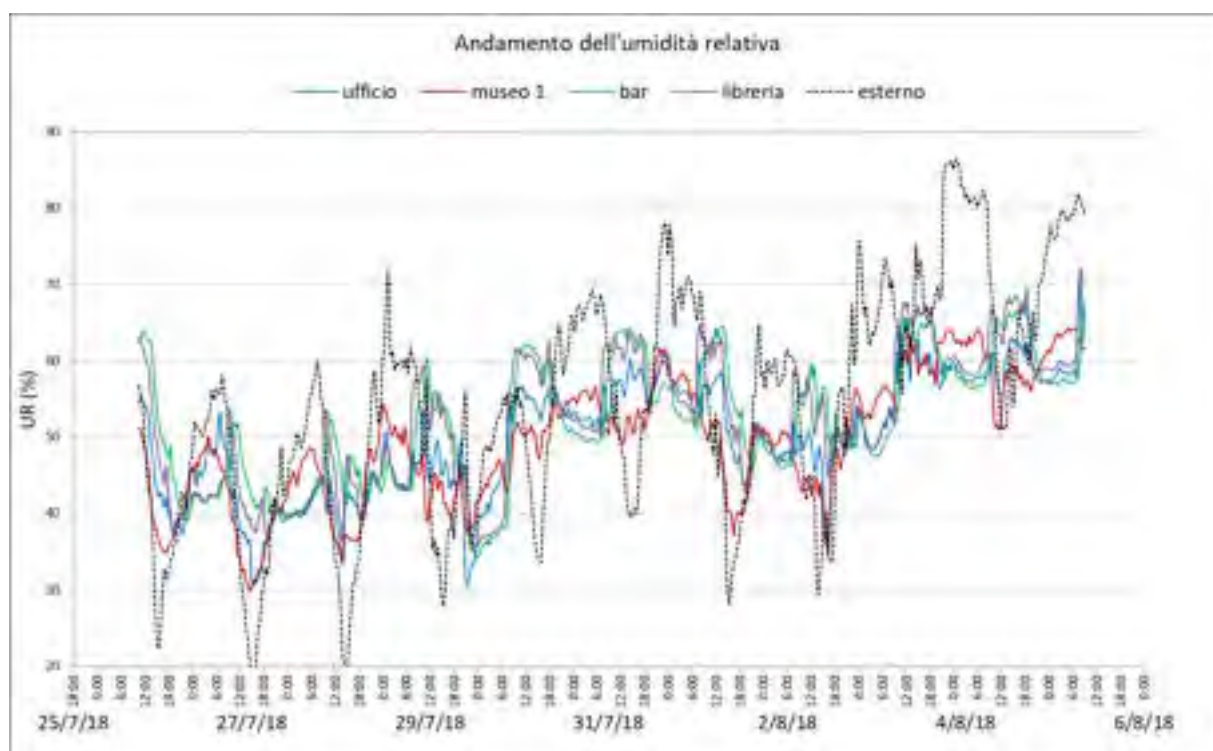


Figura 5.5.3. Profilo di umidità all'esterno e all'interno degli ambienti del museo del Carbone – 27/7/18 – 05/8/18.

Tabella 5.5.9. Statistica delle variabili di umidità relativa

Umidità relativa (%)		
Ambiente	Media	Deviazione Standard σ
Bar	52,02	8,21
Ufficio	50,13	7,80
Libreria	52,34	8,81
Museo 1	49,67	35,77

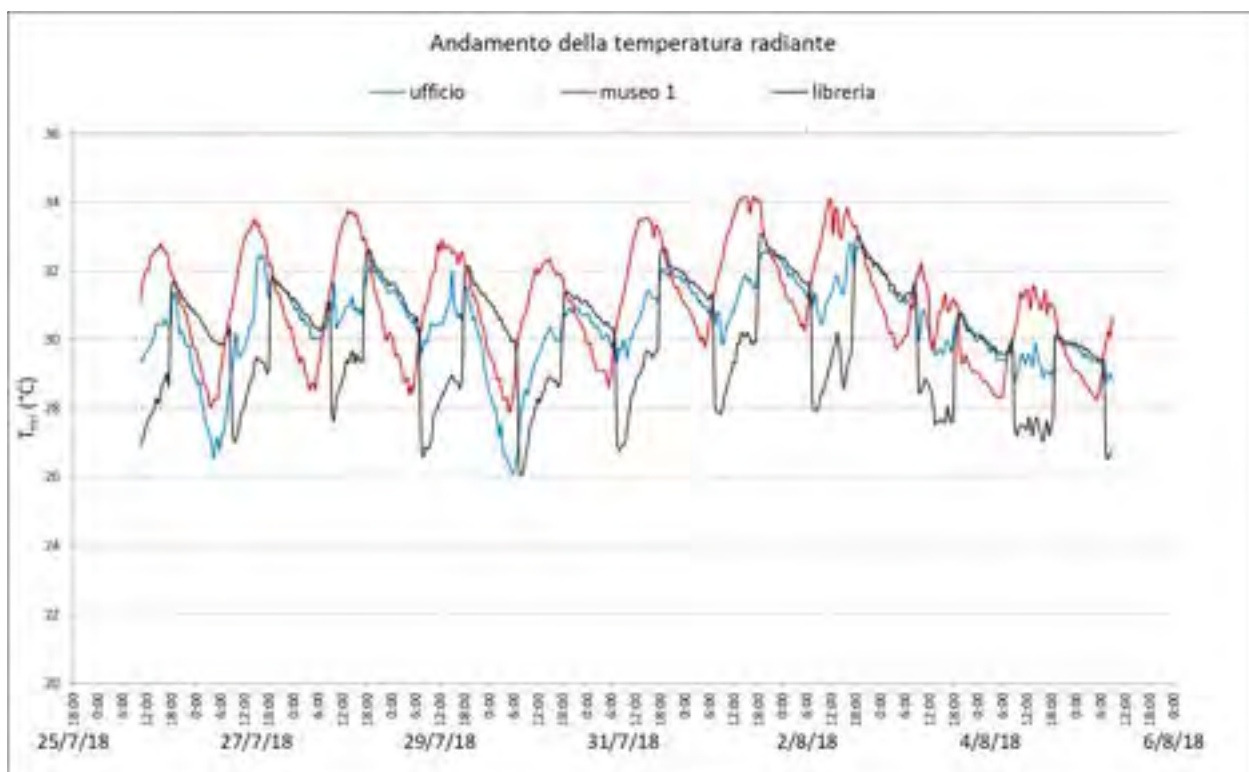


Figura 5.5.4. Andamento della temperatura radiante nei locali del museo del Carbone – 27/7/18 – 05/8/18.

Tabella 5.5.10. Statistica delle variabili della temperatura radiante

Temperatura radiante (°C)		
Ambiente	Media	Deviazione Standard σ
Ufficio	30,44	1,27
Libreria	29,95	1,64
Museo 1	31,09	1,58

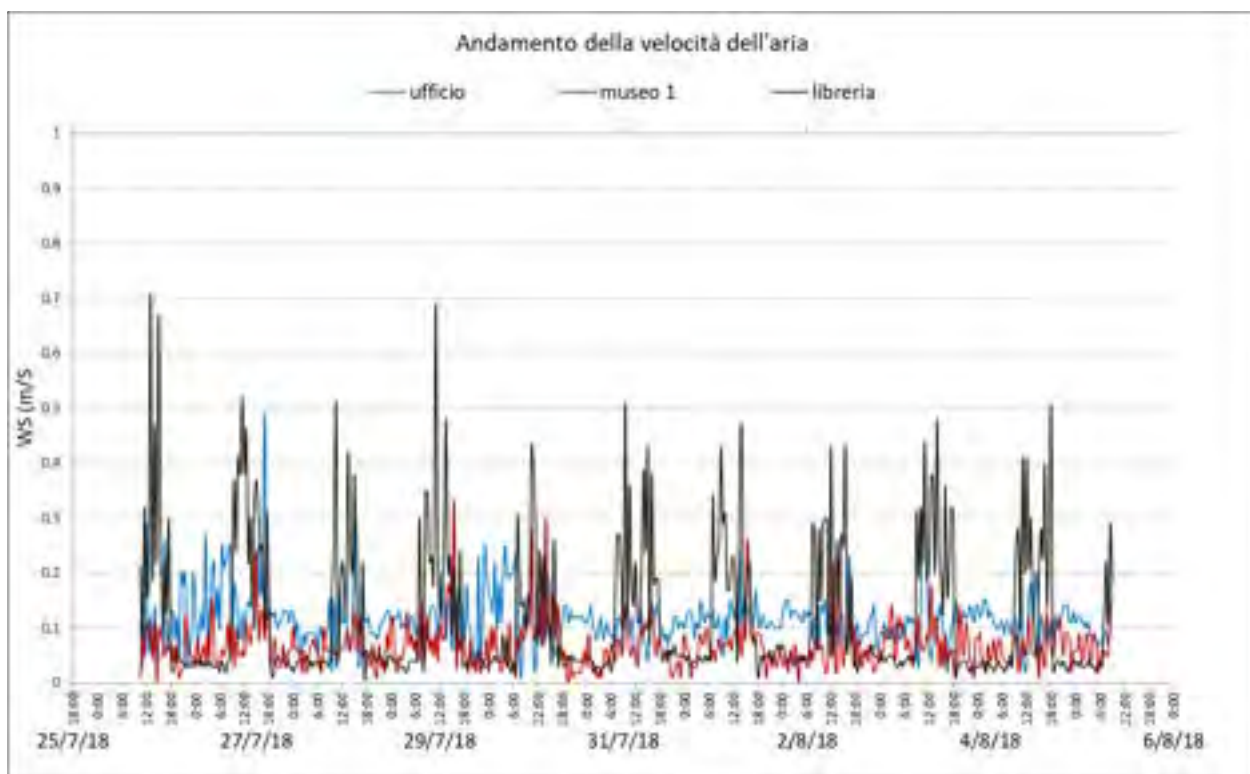


Figura 5.5.5. Andamento della velocità dell'aria nei locali del museo del Carbone 27/7/18 – 05/8/18.

Tabella 5.5.11. Statistica delle variabili della velocità dell'aria

Velocità dell'aria (m/s)		
Ambiente	Media	Deviazione Standard σ
Ufficio	0,12	0,05
Libreria	0,12	0,13
Museo 1	0,07	0,04

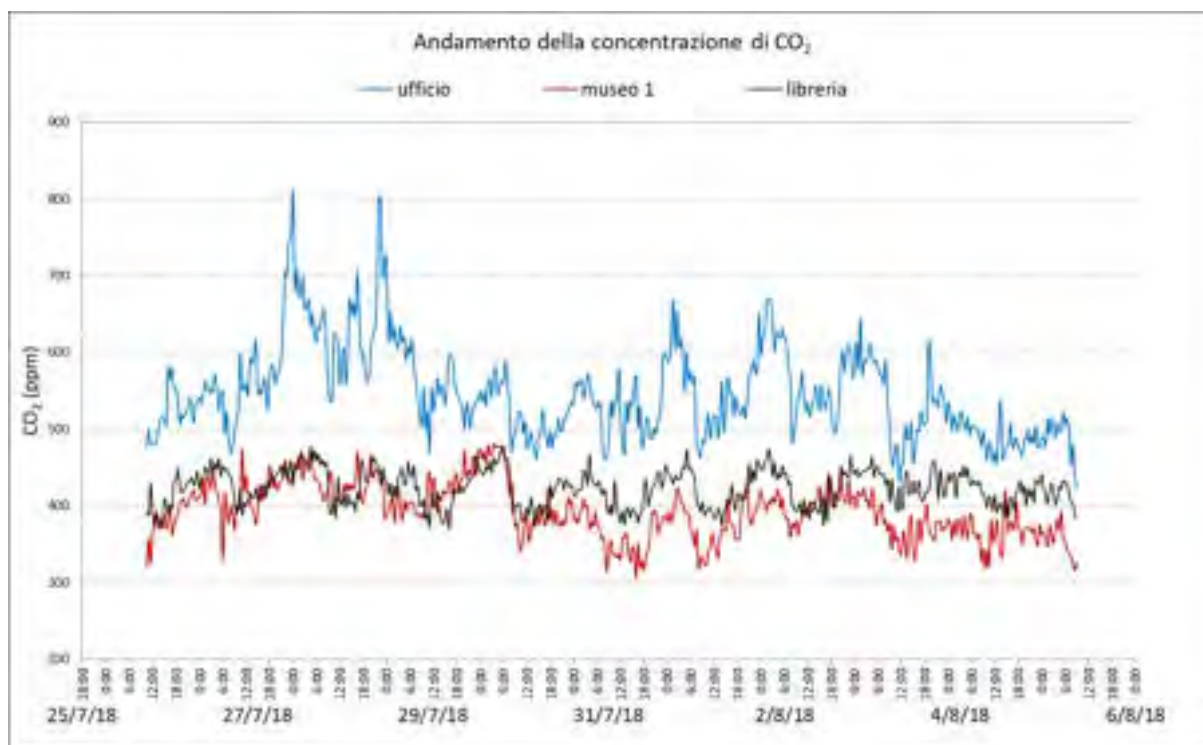


Figura 5.5.6. Andamento della concentrazione di anidride carbonica negli ambienti del museo del Carbone - 27/7/18 – 05/8/18.

Tabella 5.5.12. Valori medi giornalieri di concentrazione di CO₂ negli ambienti del museo del carbone

Periodo monitoraggio	CO ₂ (ppm)			
	Libreria	Ufficio	Bar	Museo 1
27/07/2018	398,13	517,81	429,56	370,69
28/07/2018	412,47	563,71	429,53	415,24
29/07/2018	411,88	617,00	431,35	421,18
30/07/2018	395,88	547,65	432,65	420,18
31/07/2018	395,00	493,94	426,82	377,59
01/08/2018	394,06	521,94	430,71	337,12
02/08/2018	397,35	523,00	440,53	421,18
03/08/2018	400,47	539,94	426,35	404,00
04/08/2018	416,71	482,12	451,71	359,35
05/08/2018	403,12	480,47	438,35	367,41

Tabella 5.5.13. Statistica delle variabili della concentrazione di anidride carbonica

Ambiente	Concentrazione di CO ₂ (ppm)	
	Media	Deviazione Standard σ
Bar	465,96	33,15
Ufficio	547,33	60,83
Libreria	422,93	23,66
Museo 1	393,12	35,77



Figura 5.5.7. Andamento del voto medio previsto nel locale ufficio - Periodo 27 lug - 5 ago 2018

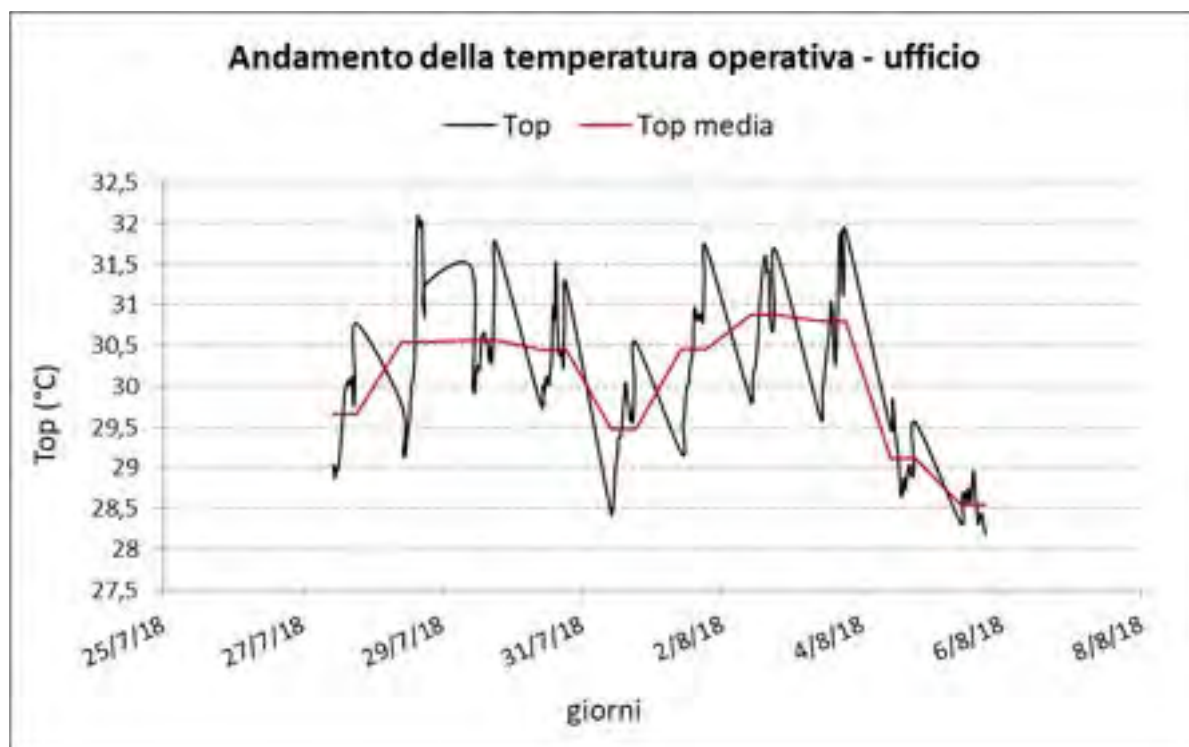


Figura 5.5.8. Profilo di temperatura operativa nel locale ufficio - Periodo 27 lug - 5 ago 2018

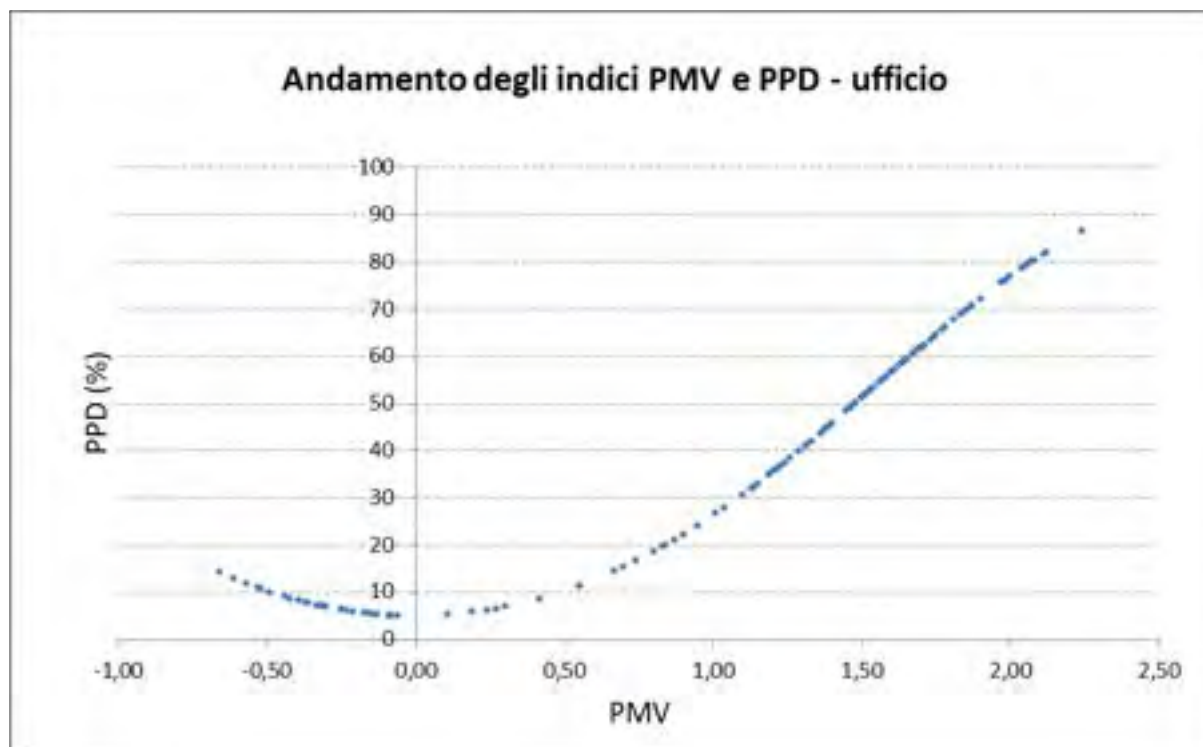


Figura 5.5.9. Percentuale di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto medio previsto (PMV). Ufficio – 27 lug – 5 ago 2018

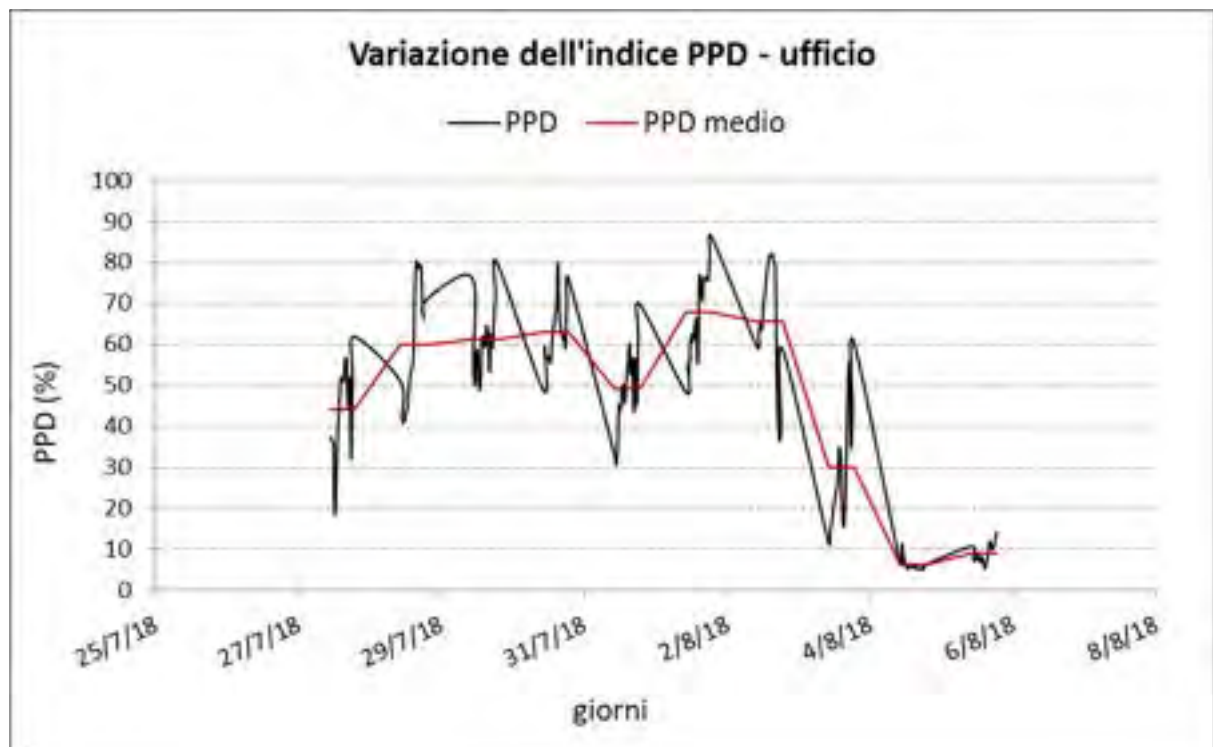


Figura 5.5.10. Andamento della percentuale degli insoddisfatti nel locale ufficio - Periodo 27 lug - 5 ago 2018

5.6 Esito del monitoraggio

L'analisi delle temperature ha permesso di individuare il tempo necessario affinché il sistema di condizionamento sia in grado di apportare miglioramenti sulle condizioni ambientali. Da un focus sulle temperature (Fig. 5.6.1.), riferito ad una giornata campione della settimana di monitoraggio, è possibile dedurre alcune considerazioni.

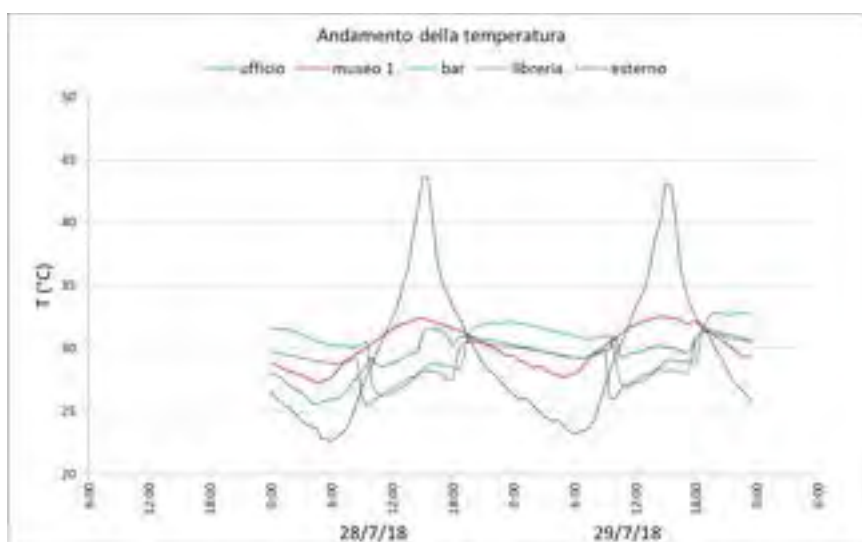


Figura 5.6.1. Variazione della temperatura indoor e outdoor – 28-29 ago 2018

Tabella 5.6.1. Analisi delle temperature - 28 -29 ago 2018

	Ora (hh:mm)	T (°C) Ufficio	T (°C) Libreria	T (°C) Bar	T (°C) Museo 1	T (°C) Esterno
Accensione impianto raffrescamento	08:00	27,21	29	30,1	29,36	24,6
	08:30	27,7	29,19	30,2	29,64	25,7
	09:00	28,14	26	30,4	29,8	26,8
	09:30	28,73	25,5	30,5	30,1	27,9
Apertura museo	10:00	29,27	25,6	27,2	30,38	28,8
	10:30	28,68	26,2	26,5	30,7	29,7
	12:00	28,87	26,8	26,5	31,55	32,5
	13:30	29,46	27,57	27,2	32,07	36,2
	15:00	31,05	28,21	28,4	32,39	43,5
Spegnimento impianto raffrescamento	16:30	31,55	28,05	28,7	32,03	36,8
	18:00	30,33	27,7	28,5	31,8	33,3
Chiusura museo	18:30	30,8	29,73	28,4	31,48	32,6
	19:00	30,98	30,45	29,1	31,35	31,9
	21:00	30,75	30,43	31,9	30	28,8

Dall'accensione dell'impianto - prefissata per le 8:30 si osserva, nell'ambiente di ubicazione dello stesso (*libreria*), una riduzione delle temperature dell'ordine dei 3 °C già dalla prima mezz'ora successiva. Di contro, nell'ambiente adiacente (*bar*) i primi benefici apportati dal sistema di raffrescamento si manifestano dopo un lasso di tempo maggiore e coincidente con l'orario di apertura della struttura. Tuttavia nelle ore successive l'impianto non riesce a garantire un mantenimento costante della temperatura all'interno degli stessi, in cui la variabile ha una crescita lineare. Tale aspetto è da ricercarsi sia negli ampi volumi delle zone interessate che dalla mancanza di chiusure interne che rendano gli ambienti compartimentati. Quando l'impianto viene spento (h 18:00), nel locale libreria si registra un aumento repentino delle temperature, di 2 °C in poco più di trenta minuti. L'esposizione della zona bar (SO), caratterizzata da un'ampia superficie finestrata, fa sì che nella stagione estiva sia irraggiata in continuo sino alle ore 20, immagazzinando energia termica con temperature in aumento che superano i 30 °C, influenzando anche il locale adiacente (*libreria*). Se ne deduce una scarsa inerzia termica delle pareti.

Nell'intervallo 10:00 -18:30 nell'ufficio si registrano temperature elevate superiori ai 28 °C, mentre nel museo 1 maggiori di 30 °C. In tutti gli ambienti, i valori di temperatura superano di gran lunga i 26 °C previsti per la stagione estiva dalle "Linee Guida su microclima, areazione ed illuminazione (ISPESL)" del 2006. La carenza di un sistema di raffrescamento fa sì che all'interno degli stessi, nell'orario lavorativo si raggiungano temperature elevate.

La concentrazione di anidride carbonica misurata nel corso dei sopralluoghi, è risultata, per tutti gli ambienti, sempre inferiore al limite massimo di 1000 ppm.

Nella zona *libreria* il profilo di velocità presenta dei picchi in corrispondenza dei quali si raggiungono valori maggiori di 0,20 m/s, con conseguente sviluppo di correnti di disturbo. Ciò è da ricercarsi sul posizionamento delle prese d'aria e d'immissione e dall'impossibilità di poter regolare direttamente l'intensità e la velocità delle ventole. Occorrerebbe valutare una riprogettazione del sistema di condizionamento all'interno dell'ambiente e la possibilità di un utilizzare tipologie di diffusori differenti. Negli altri ambienti la velocità media dell'aria giornaliera risulta accettabile ($0,05 < v < 0,020$ m/s).

Per quanto concerne l'analisi dello stato di comfort termico, i risultati dei rilievi strumentali condotti nell'ambiente *ufficio* nelle giornate dal 27 lug al 3 ago, forniscono valori dell'indice PMV lontani dall'intervallo di benessere termico. Complessivamente la valutazione dell'ambiente è classificata come "leggermente caldo" registrando valori di PMV > 1 e della PPD > 30%. L'ambiente ricade nell'intervallo di benessere termico negli ultimi due giorni di monitoraggio con PMV < 1 e PPD < 10%.

Dalla ripartizione percentuale dell'indice PMV nelle classi di comfort, emerge che l'ambiente *ufficio* ricade, complessivamente, per l'85% nelle condizioni termiche di "leggermente caldo", per il 7% in "caldo", per il 6% in benessere termico. Solo il 2% in "termicamente accettabile".

Anche l'analisi della temperatura operativa conduce a risultati analoghi a quelli evidenziati dal calcolo degli indicatori di comfort. I valori delle temperature operative ricadono fuori dal range (23-26 °C) consigliato dalla UNI 15251.



Tabella 5.6.2. Valori medi degli indici PMV e PPD, della temperatura operativa e valutazione ambiente.

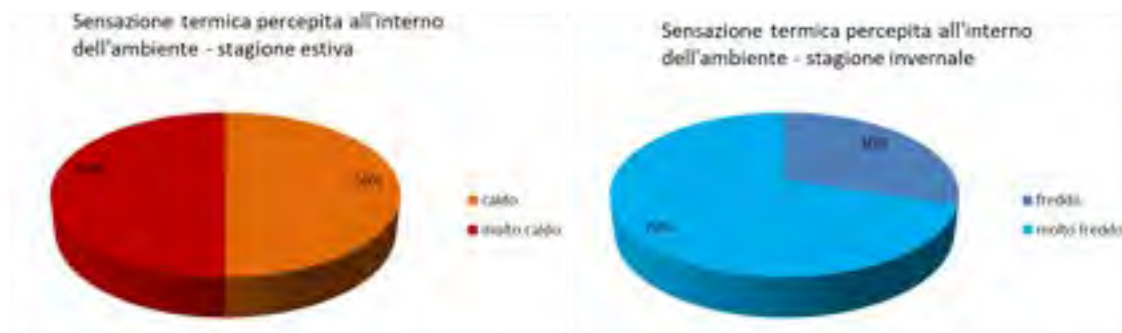
Periodo 08-19 mar (h. 10-18:30)	Ufficio			Valutazione ambiente
	PMV _m	PPD _m	Top _m (°C)	
27/07/2018	1,36	44,17	29,66	Leggermente caldo
28/07/2018	1,67	59,95	30,54	Leggermente caldo
29/07/2018	1,69	61,25	30,56	Leggermente caldo
30/07/2018	1,72	63,05	30,45	Leggermente caldo
31/07/2018	1,46	49,24	29,47	Leggermente caldo
01/08/2018	1,83	67,90	30,45	Leggermente caldo
02/08/2018	1,78	65,67	30,88	Leggermente caldo
03/08/2018	1,05	30,03	30,80	Leggermente caldo
04/08/2018	0,02	6,22	29,11	Benessere termico
05/08/2018	-0,42	9,04	28,55	Benessere termico

5.7 Qualità percepita degli ambienti interni – analisi soggettiva

Il questionario è stato sottoposto a 6 lavoratori, i quali hanno fatto emergere precarie condizioni di comfort invernali ed estive per l'ambiente *ufficio*. Nelle figure seguenti è riportato in forma grafica quanto esposto:

- nella stagione estiva il 50% dichiara di avvertire una sensazione termica di “molto caldo”, il restante percepisce l'ambiente come “caldo”;
- nella stagione invernale il 70% lamenta una sensazione termica di “molto freddo” e il 30% percepisce l'ambiente come “freddo”.

È ipotizzabile che le sensazioni di freddo denunciate dal personale e non riscontrate durante il sopralluogo, possano dipendere dal periodo in cui è stato condotto il monitoraggio. In riferimento alla stagione estiva si evidenzia, invece, una sostanziale conferma di quanto ricavato sperimentalmente con l'utilizzo delle centraline microclimatiche.



5.8 Comfort illuminotecnico

Anche per il museo del carbone si è provveduto ad effettuare un controllo del livello di illuminamento nelle postazioni di lavoro (ufficio). In generale i sistemi di illuminazione presenti rispondono bene alle esigenze specifiche degli ambienti in base alle destinazioni d'uso e complessivamente le lampade presentano un buono stato di conservazione.

L'area uffici è servita da 2 plafoniere a soffitto equipaggiate ciascuna con quattro tubi a fluorescenza, aventi una potenza complessiva di 144 W.



Figura 5.8.1. Plafoniera. Osram 36W/865

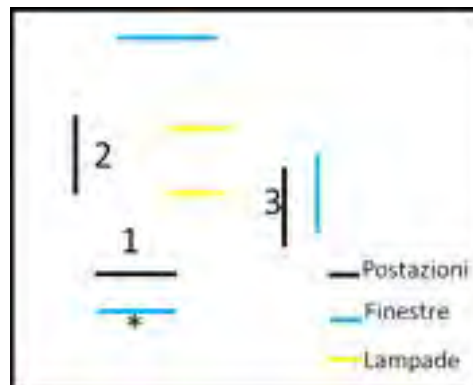


Figura 5.8.2. Riproduzione ufficio. (* finestra interna)

Tabella 5.8. Dati misure livello di illuminamento

		Luce artificiale (Lux)			Distanza dal punto di misura al corpo luce (m)
Ambiente	Postazione	Giornata soleggiata ☀			
		ON	OFF	Contributo	
Ufficio	1	630	220	410	2,8
	2	710	360	350	2,8
	3	550	350	200	2,8

I rilievi, effettuati in una giornata soleggiata relativa alla stagione estiva, hanno evidenziato, per tutte le postazioni di lavoro, che la sola luce naturale non consente il raggiungimento di un adeguato livello di illuminamento, favorito invece con il contributo della luce artificiale.

6 Conclusioni

La prestazione energetica degli edifici e il comfort ambientale sono due aspetti importanti riguardanti la variazione dei consumi e la qualità degli ambienti interni. Quest'ultimo aspetto rappresenta un requisito fondamentale che influisce non solo sulla sensazione di benessere, ma anche sulla produttività.

Il presente lavoro approfondisce e analizza la qualità globale degli ambienti interni negli edifici. Le attività previste costituiscono una base finalizzata alla caratterizzazione del patrimonio edilizio pubblico insistente sulla Regione Sardegna e allo sviluppo di una metodologia per interventi di efficienza energetica in edifici vincolati nel territorio del Sulcis.

Nell'annualità corrente sono state approfondite tematiche relative alla qualità dell'aria al comfort termico ed illuminotecnico, tenendo conto dell'influenza degli occupanti nella gestione dei parametri indoor, in alcuni edifici pubblici storici.

Nello specifico l'indagine, condotta nel Comune di Carbonia, ha riguardato due edifici risalenti alla prima metà del 900 ed attualmente adibiti a museo, collocati nella periferia sud occidentale dell'abitato della città: quello dei Paleo Ambienti Sulcitani (PAS) e del Carbone.

In riferimento agli stabili sopra citati, si è provveduto, in periodi distinti, ad attrezzare gli ambienti monitorati con centraline di misura dotate di sensori di microclima interno (in termini di temperatura, umidità, concentrazione di CO₂, velocità e direzione del vento).

La scelta degli spazi da monitorare è stata fatta considerando il profilo di utilizzo degli ambienti. Per il posizionamento delle centraline si è tenuto conto di diversi fattori, tra cui: disposizione delle postazioni di lavoro, presenza di aperture verticali, facilità di collocazione della strumentazione.

Le misurazioni sono state effettuate in alcune settimane rappresentative della stagione invernale ed estiva, nel corrispettivo orario di lavoro. La combinazione tra i parametri ambientali, ricavati con la stazione microclimatica (temperatura dell'aria, temperatura radiante, umidità relativa e velocità dell'aria), e i due parametri soggettivi (coefficiente di attività metabolica (Met), coefficiente di resistenza termica dovuta all'abbigliamento (Clo)) ha permesso di valutare lo stato di comfort termico all'interno degli edifici in termini di Voto medio Previsto (PMV) e di Percentuale di insoddisfatti (PPD). Il calcolo degli indici di comfort è stato effettuato assumendo valori pari a 1 clo (in condizioni di abbigliamento invernale) e a 1,2 met (attività sedentaria in ufficio) per la stagione invernale e 0,5 clo (in condizioni di abbigliamento estivo leggero) e 1,2 met per la stagione estiva.

Si è infine provveduto ad effettuare un'indagine relativa al comfort illuminotecnico nelle postazioni di lavoro all'interno degli ambienti oggetto di studio.

Per quanto concerne il PAS, l'indagine ha riguardato, sia per la stagione estiva che per quella invernale, un totale di 4 spazi di lavoro, per i quali si è osservato l'andamento delle variabili microclimatiche. La valutazione delle condizioni di comfort termico è stata condotta considerando unicamente gli ambienti ad uso ufficio, vale a dire: *ingresso* e *ufficio 1*.

Nello specifico dai rilievi effettuati è emerso che:

Stagione invernale

- le variabili all'interno degli ambienti - temperatura, umidità e velocità dell'aria - si discostano dagli standard previsti dalle Linee Guida ISPSEL, facendo registrare valori di temperatura interna ben al di sotto dei 20 ° e di umidità relativa ricadenti nell'intervallo 50 -70%.
- la velocità dell'aria si attesta nel range ottimale, assumendo valori quasi sempre inferiori a 0,1 m/s, con picchi superiori a 0,2 m/s negli ambienti più affollati e ventilati (museo1 e ingresso).

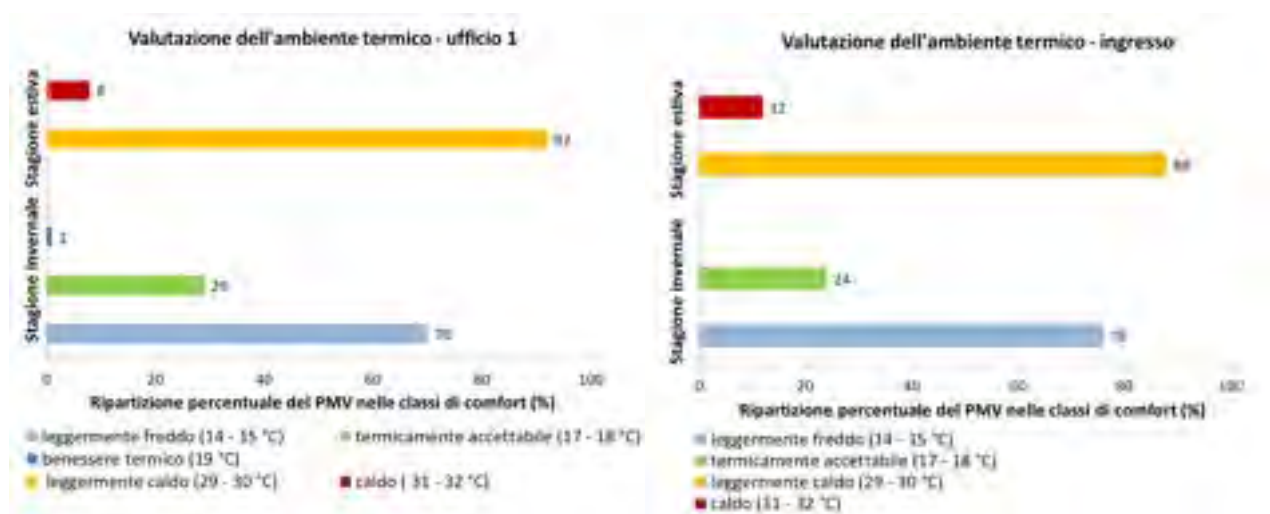
- le indagini hanno inoltre rilevato una qualità dell'aria ottimale per tutti gli ambienti, con concentrazioni di anidride carbonica fortemente inferiori ai 1000 ppm.

Stagione estiva

- la temperatura dell'aria all'interno degli ambienti si discosta notevolmente dai 26 °C previsti dalle Linee Guida ISPSEL, assumendo valori maggiori ai 30 °C, condizione tuttavia determinata dalla mancanza di un sistema di raffrescamento.
- l'umidità relativa e la velocità dell'aria, sono invece sempre risultate comprese entro range di valori medi giornalieri accettabili: $40\% < RH < 60\%$, $0,05 < WS < 0,2$.
- i rilievi sulla concentrazione di CO₂ hanno mostrato valori adeguati in tutti i locali, evidenziando un soddisfacente ricambio dell'aria.

I livelli di illuminamento nelle postazioni di lavoro sono risultati inferiori ai 500 lux previsti dalla norma UNI EN 12464-1; tuttavia il contributo della luce artificiale è tale da consentire il soddisfacimento dei limiti prefissati dalla direttiva.

Le grafiche riassuntive evidenziano la ripartizione percentuale dell'indice PMV nelle classi di comfort, rispettivamente per la stagione estiva ed invernale nei due ambienti, confermando lo scarso livello di comfort evidenziato anche dalle indagini soggettive dovuto alla mancanza di un sistema efficace di climatizzazione.



Come ulteriore indagine, in concomitanza dell'inaugurazione di una mostra tenutasi nella stagione primaverile, si è investigato sul grado di incidenza dei visitatori sulle grandezze termo-igrometriche misurate e sul comfort termico da essi percepito, coinvolgendo circa 70 persone. Adoperando come indice di abbigliamento 0,7 clo e come tasso metabolico 1,6 met (attività leggera in piedi) è emerso che, all'interno della sala mostre, si raggiungono condizioni di benessere termico nonostante la presenza di numerose persone.

L'analisi microclimatica nell'edificio ospitante il Museo del Carbone ha interessato un totale di 4 ambienti di lavoro. Lo studio è stato condotto sia nelle zone caratterizzate da un uso continuativo da parte dei

dipendenti (ufficio), nei locali adibiti ad attività commerciale (libreria e BAR) e nella sala espositiva principale (museo 1).

Dai rilievi effettuati nella stagione invernale è emerso che:

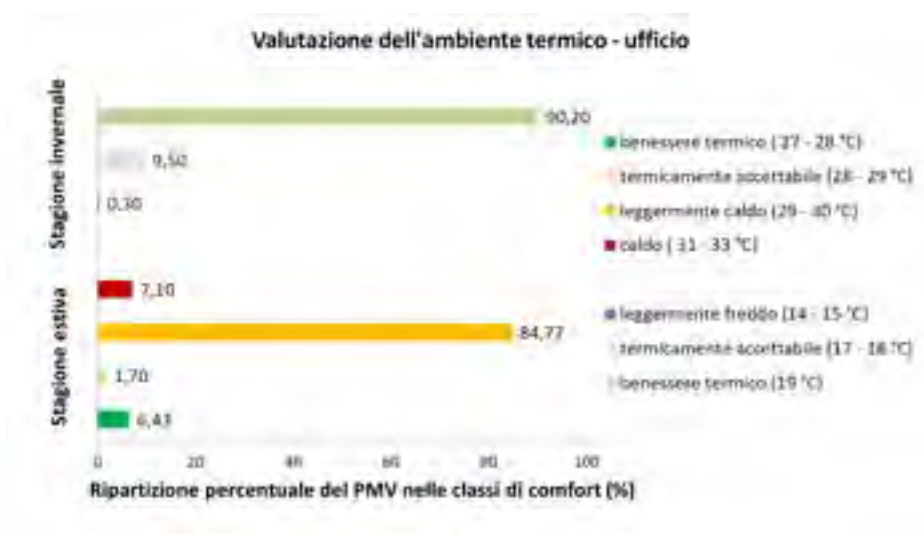
- in nessuno degli ambienti i valori di umidità relativa rientrano in quelli dettati dalle linee guida, sia per la mancanza di un sistema di controllo di questo parametro, sia a causa di infiltrazioni meteoriche all'interno degli stessi;
- variazioni di temperature omogenee in tutti i locali, ad eccezione della zona bar che con ΔT elevati rappresenta l'ambiente più caldo;
- valori di velocità media adeguati tranne per la zona libreria in cui risultano inferiori a quelli consigliati (0,05 m/s) e per la zona bar con picchi maggiori di 1,5 m/s.

Nella stagione estiva è emersa l'inadeguatezza del sistema di raffrescamento con il raggiungimento, all'interno dei locali, di temperature non omogenee e superiori ai 26 °C, condizioni favorite anche dalle generose volumetrie degli ambienti, dalla mancanza di chiusure interne che rendano gli ambienti compartimentali e dalla mancanza di schermature solari.

Nella zona libreria si raggiungono velocità elevate con conseguente sviluppo di correnti d'aria di disturbo. Occorrerebbe pertanto valutare una riprogettazione del sistema di condizionamento e la possibilità di utilizzo di tipologie differenti di diffusori.

I livelli di illuminamento sono risultati adeguati così come la qualità dell'aria all'interno degli ambienti, registrando valori di concentrazione di CO₂ sempre al di sotto dei 1000 ppm.

Dal calcolo degli indici di benessere termico globale la stagione più critica è risultata essere quella estiva, evidenziando uno scarso livello di comfort termico per l'ambiente ufficio. I risultati ottenuti per la stagione invernale non rispecchiano invece le condizioni di disagio termico lamentate dagli occupanti. Ciò potrebbe derivare dal mese in cui è stata condotta l'indagine invernale (marzo), che non risultando generalmente tra i più freddi della stagione, può portare ad ottenere valutazioni positive degli ambienti monitorati. Ne consegue che, un quadro d'insieme più esaustivo in termini di risposta termica potrebbe essere ottenuto analizzando anche i mesi di gennaio e febbraio, con criticità presumibilmente maggiori.



L'indagine microclimatica ha evidenziato le criticità relative agli ambienti monitorati e i risultati ottenuti andranno ad integrare quanto emerso dalla diagnosi energetica degli edifici, rappresentando un elemento preliminare in relazione ad una possibile riqualificazione energetica degli stessi.

7 Riferimenti bibliografici

1. “Studio sperimentale del microclima interno in edifici pubblici del Sulcis” C. Frau, E. Loria, A. Madeddu, F. Poggi, Report RdS/PAR2015/133.
2. “Analisi del comfort microclimatico in un edificio pubblico ad uso ufficio del territorio del Sulcis” F. Poggi, C. Frau, E. Loria, A. Madeddu, , Report RdS/PAR2016/xxx (in attesa di pubblicazione).
3. Eurostat, Final Energy Consumption, 2015 (Accessed June 3, 2017).
4. A.M. Papadopoulos, Forty years of regulations on the thermal performance of the building envelope in Europe: achievements, perspectives and challenges, Energy Build. 127 (2016) 942-952.
5. European Commission, Directive /91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings, Off.J.Eur.Union 2002 65-71.
6. European Commission, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Off. J. Eur. Union (2010) 13-35.
7. J.Kurnitski, K. Kuusk, T. Tark, A. Uutar, T. Kalamees, E. Pikas, Energy and investment intensity of integrated renovation and 2030 cost optimal savings, Energy Build. 75 (2014) 51-59.
8. E. Pikas, M. Thalfeldt, J. Kurnitski, Cost optimal and nearly zero energy building solutions for office buildings, Energy Build. 74 (2014) 30-42.