

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di laurea magistrale in Analisi e Gestione dell'Ambiente

*Analisi del microclima e valutazione integrata
del rischio per ambienti confinati e sensibili:
il caso della Biblioteca Classense*

Relatore

Prof. Massimo Andretta

Presentata da

Floriana Coppola

Correlatore

Prof. Leonardo Seccia

II sessione

Anno Accademico 2013/2014

Indice

RIASSUNTO

1. INTRODUZIONE	1
1.1 Il concetto di rischio	2
1.1.1 Definizione generale di rischio	5
1.2 L'analisi del rischio ambientale	13
1.2.1 L'analisi del rischio sanitario	15
1.2.2 L'analisi del rischio ecologico	18
1.3 L'analisi del rischio per i beni culturali	26
1.3.1 Le diverse metodologie per l'analisi del rischio per i beni culturali	27
1.4 Il microclima per i beni culturali	32
1.4.1 Il ruolo dei parametri termoigrometrici.....	37
1.4.2 Principali inquinanti presenti in ambienti confinati	43
1.5 La situazione normativa nazionale	50
1.6 La situazione normativa internazionale	54
1.7 Le norme UNI sul microclima	55
1.7.1 UNI 10829.....	56
1.7.2 UNI 10586.....	56
2. SCOPO DELLA RICERCA	59
3. MATERIALI E METODI	60
3.1 Campagna di monitoraggio	60
3.1.1 Area di studio	64
3.1.2 Strumenti di misurazione dei parametri termoigrometrici e degli inquinanti...	84

4. PRESENTAZIONE E DISCUSSIONE DEI RISULTATI	117
4.1 Risultati della campagna di monitoraggio.....	117
4.1.1 Confronto inquinamento indoor-outdoor.....	133
4.2 Proposta metodologica di valutazione del rischio per i beni culturali	155
4.2.1 Applicazione della metodologia proposta al caso della Biblioteca Classense.....	162
5. CONCLUSIONI	180
APPENDICE	182
BIBLIOGRAFIA.....	195

Riassunto

Il presente lavoro nasce dall'esigenza maturata, oramai da diversi decenni, di conoscere l'ambiente che circonda i beni culturali, in virtù della loro intrinseca natura non rinnovabile. La ricerca si compone di due parti: l'analisi microclimatica e lo sviluppo di una metodologia innovativa di analisi relativa del rischio, che vede come bersagli, i beni culturali, con particolare riferimento a quelli librari. In particolare, sulla base dei dati di temperatura, umidità relativa, concentrazioni di NO₂ e O₃, misurati in alcune sale della Biblioteca Classense di Ravenna, nel periodo dal 21 luglio al 7 agosto, è stato possibile caratterizzare diversi ambienti confinati, tra loro eterogenei e confrontare le dinamiche che s'instaurano tra l'ambiente *indoor* e quello *outdoor*, mediante, ad esempio, il calcolo del cosiddetto rapporto Indoor/Outdoor (I/O) e la stima del tasso di ventilazione.

È stata poi proposta una metodologia di analisi del rischio che valuta i suddetti parametri microclimatici, come fattori di rischio. Attraverso tale metodologia, che identifica gli eventuali stati anomali nel sistema, è possibile giungere ad una definizione delle priorità per quegli aspetti esaminati che potrebbero discostarsi dalle condizioni di benessere, provocando un'accelerazione dei processi di degrado dei beni librari. Tale metodologia, infine, è stata applicata alle sale oggetto dell'analisi microclimatica, allo scopo di identificare eventuali fattori di rischio microclimatici.

1. INTRODUZIONE

Nel corso degli studi ambientali è stato possibile esaminare, in più occasioni, la differenza tra risorsa rinnovabile e non rinnovabile: alcuni beni culturali e ambientali sono indissolubilmente legati dalla delicata caratteristica che li rende non rinnovabili. Il problema della conservazione del patrimonio culturale e ambientale, infatti, sancito dalla nostra Costituzione¹, negli ultimi decenni, si è acuitizzato a causa delle variazioni delle condizioni ambientali (con l'uso sconsiderato di impianti di condizionamento o per l'inquinamento atmosferico) negli ambienti confinati. Oggigiorno bisogna fronteggiare anche il problema derivato dalla ampia fruizione di massa che, fortunatamente, contraddistingue il patrimonio culturale, aspetto prima riservato a pochissimi. Preme quindi l'esigenza di conservare preventivamente, espressione che, seppur semplice all'apparenza, nasconde una serie di valutazioni ed azioni multidisciplinari. "Conservare" significa creare un ambiente idoneo attorno all'opera d'arte. "Conservare preventivamente" significa pianificare interventi di tipologia naturale e/o antropica agenti sulle cause di alterazione delle condizioni ambientali idonee. Ciò si fonda sui concetti propri della fisica, per cui nessun fenomeno fisico spontaneo è reversibile ma, qualsiasi azione, incluso il naturale invecchiamento, causa una modificazione irreversibile. Pertanto, la direzione intrapresa a livello di tutela dei beni culturali prevede la realizzazione di un ambiente idoneo intorno ai manufatti, in modo da non accelerare eventuali processi di degradazione, dovuti alla non conformità degli ambienti ospitanti.

Per poter garantire la tutela del patrimonio culturale presente in un ambiente confinato, bisogna prendere in considerazione la vasta gamma di rischi ai quali potenzialmente è esposto, come il rischio sismico, quello proveniente da incendi, da attività illegali etc. In questa tesi, sulla base delle conoscenze maturate durante gli studi universitari, sono stati analizzati i rischi derivanti dall'ambiente di conservazione e, in particolare, i seguenti fattori fisici e chimici: variabili termoisometriche, illuminamento e concentrazione di ozono e biossido di azoto. In questo settore, infatti, non è sempre possibile elaborare delle considerazioni *a priori*, ma è necessario lo studio del contesto specifico che tenga conto di parametri quali: oggetti presenti, caratteristiche dell'edificio, clima esterno etc.

¹ Art.9 della Costituzione Italiana: "La Repubblica promuove lo sviluppo della cultura e la ricerca scientifica e tecnica. Tutela il paesaggio e il patrimonio storico e artistico della Nazione".

Nei seguenti paragrafi saranno approfonditi i concetti-chiave per l'elaborazione dello studio microclimatico e della proposta metodologia del rischio.

Iniziando dal concetto di rischio e delle sue più diffuse applicazioni (rischio ambientale e sanitario) si passerà ad analizzare alcuni esempi di procedure di analisi dei beni culturali.

Al fine di poter elaborare una metodologia per i parametri chimico fisici è necessario conoscerne il contesto microclimatico; motivo per cui, in uno specifico capitolo di questa tesi, sarà investigato il concetto di microclima.

Infine, segue una sintetica descrizione del panorama normativo, nazionale ed internazionale, nel quale s'inserisce lo studio, con particolare riferimento alle norme UNI utilizzate nella metodologia proposta.

1.1 Il concetto di rischio

Nella società moderna si avverte, più o meno consapevolmente, di convivere quotidianamente con i rischi; qualsiasi attività, da quella lavorativa a quella ludica, ci espone a pericoli. Per questo motivo, con il passare del tempo, l'attenzione nei confronti di questa tematica è via via aumentata. Ai giorni nostri è possibile definire diverse tipologie di rischio, a seconda delle cause che lo generano, del meccanismo, delle vie di trasporto, del bersaglio, del contesto in cui agisce. In più, la consapevolezza, ormai raggiunta, circa l'esistenza di tali rischi e le conseguenze economiche, e non solo, dei danni prodotti, ha indotto l'uomo a porre maggior attenzione alle ripercussioni delle proprie azioni sull'ambiente ed ad applicare sempre più i principi dell'analisi del rischio nei più svariati ambiti.

In questa parte introduttiva saranno quindi descritte diverse tipologie e caratteristiche del rischio, per contestualizzare l'argomento prima di passare ad una sua definizione formale.

In generale, i meccanismi di azione che determinano il rischio possono essere distinti in due gruppi:

- Fattori di rischio *fisici*, ossia forme di *energia* che, interagendo con tutto o parte dell'organismo, possono provocare danni; in tal caso, le misure di difesa dipendono dalla natura dell'energia e dell'elemento bersaglio. In generale, al rischio fisico possono essere ricondotti il rischio industriale, rischio idraulico, il rischio da campi elettromagnetici etc.
- Fattori di rischio chimici, ovvero sostanze, che penetrano nell'organismo attraverso diverse vie (inalazione, ingestione, contatto dermico etc.) e possono determinare danni di diversa natura; il tipo di danno provocato dipende dal tipo di sostanza in

oggetto e dalla modalità di ingresso nell'organismo. In generale, a tale tipologia di rischio possono essere ricondotti, ad esempio, i rischi generati da un sito contaminato da sostanze tossiche per l'uomo e l'ecosistema.

Sebbene possa risultare più chiaro dopo averlo definito, è bene sottolineare fin dall'inizio un concetto di fondamentale importanza: un certa percentuale di rischio in natura è intrinseca ed ineliminabile. Ipotizzando, ad esempio, un grado di antropizzazione pari a zero (ossia un contesto in cui l'uomo non è intervenuto con le sue attività a modificare l'ambiente che lo circonda) non si può escludere la possibilità che si verifichino calamità naturali. Per la sua natura, quindi, il rischio "naturale" deve essere considerato e valutato relativamente alle frequenze di accadimento ed alla gravità delle conseguenze nelle diverse aree, affinché sia possibile, ad esempio, mettere a punto adeguate strategie per la sua riduzione.

In generale, l'iterazione che genera un rischio si manifesta come uno scambio di materia/energia - meccanismo chimico o fisico, come accennato in precedenza - più o meno rapido.

Inoltre, il rischio, in una accezione più moderna del termine, si definisce sempre più per essere sito-specifico. In passato, quando si avvertiva meno il problema dei siti contaminati e le conoscenze tecnico-scientifiche erano meno approfondite, il corpo normativo di molti Paesi si fondava sull'uso di limiti di accettabilità fissi, talvolta differenziati sulla base della destinazione d'uso del sito. Di questo approccio comunemente definito "tabellare puro" si evidenzia soprattutto una carente capacità di adattarsi ad una situazione territoriale specifica per propria complessità e peculiarità, in quanto non prende in considerazione le caratteristiche inerenti al sito. Ad esempio, nel caso di bonifica di siti contaminati, omogeneizzare le caratteristiche di un'area vasta può condurre a sottostimare la contaminazione nelle zone a maggior rischio e al contempo sopravvalutare le porzioni con minor grado di criticità. Non solo, ma dal momento che, come spesso avviene, le risorse economiche destinate ai piani di bonifica sono limitate, quindi limitanti, potrebbe verificarsi il caso in cui si intervenga su siti poco pericolosi a svantaggio di altri più compromessi. Da questa ultima considerazione emerge anche che l'impiego di capitali non sempre produce una proporzionale diminuzione del rischio. All'approccio tabellare si è sostituito, nel tempo, l'approccio sito-specifico, che contraddistingue anche l'analisi del rischio per i beni culturali, oggetto di questa ricerca.

Come già accennato, i contesti nei quali applicare le considerazioni circa il concetto di rischio sono molteplici e nell'elencarli è impossibile essere esaustivi. Tuttavia, se ne individuano alcuni più evoluti dal punto di vista normativo e delle metodologie applicate per la valutazione del rischio (il cosiddetto *risk assessment*): tra questi, per esempio, ritroviamo

il contesto ambientale (ecologico e sanitario), quello industriale, finanziario e informatico. In ognuno di questi settori è possibile specificare alcune caratteristiche in funzione della specificità delle applicazioni: come il rischio sismico o idrogeologico in ambito ambientale, chimico o di incidenti rilevanti in ambito industriale, di insolvenza o di investimento per il settore finanziario etc. In un periodo storico in cui si sente particolarmente discutere sulle tematiche connesse ai rischi, si pensi: alla sentenza della Corte di Appello dell'Aquila che, in data 10 novembre 2014, ha assolto i membri della Commissione Grandi Rischi per il sisma del 6 aprile 2009; o ancora alle alluvioni che assediano città come quella di Genova; alla più grande epidemia di Ebola fino ad oggi registrata, che minaccia la Liberia, Sierra Leone e Nigeria; allo *spread*, termine noto anche ai meno esperti della finanza dall'estate 2011 e i connessi rischi di bancarotta; alla *querelle* intorno alla questione del trasferimento dei Bronzi di Riace per l'Expo 2015.

In una cornice così ampia, inevitabilmente, si introduce il concetto dell'accettabilità, tema molto delicato perché - accertato che il rischio zero non esiste - si pone il problema di stabilire qual è il livello di sicurezza che può essere considerato accettabile². Ne consegue che un ruolo importante è affidato anche alla percezione del rischio, ovvero alla valutazione, sia razionale sia emotiva, che il pubblico ha nei confronti di un dato evento. Tale percezione è il risultato della sua cultura, della comunicazione tramite mass-media, dell'atteggiamento psicologico nei confronti delle difficoltà della vita. Questi fattori rendono spesso il rischio percepito diverso da quello reale. Un esempio molto emblematico, che descrive la percezione del rischio, è la cosiddetta sindrome NIMBY (*yes, but Not In My Back Yard*) per cui la percezione del rischio è legata al conflitto di interessi fra pubblico e privato; il che porta ad accettare una scelta opinabile dal punto di vista ambientale ma, di riconosciuta utilità pubblica, purché non vengano intaccati i propri interessi. La percezione del rischio è molto soggettiva: la necessità di basi oggettive per valutare e gestire i rischi ambientali ha portato ad un processo noto, appunto, come *risk assessment*. Per valutare un rischio è richiesta una competenza specifica che non può essere improvvisata, poiché non può basarsi su giudizi soggettivi di tipo intuitivo e/o emozionale. In prima approssimazione, l'analisi del rischio ha come obiettivo fondamentale la stima della probabilità che si verifichino effetti avversi sull'uomo, sui sistemi ecologici, sui beni librari etc. in seguito all'esposizione ad agenti chimici e fisici del sistema o malfunzionamenti e guasti dei suoi sottosistemi. Come vedremo in seguito, per la valutazione del rischio si considera uno scenario e si analizzano le situazioni ad esso connesso, come le cause che possono determinare il danno che può, a

² *How safe is safe enough?*

sua volta, produrre un rischio. In generale, la valutazione del rischio è stata definita in modi diversi dai molti autori che hanno affrontato la materia. In termini tecnici, il risk assessment viene definito come “il processo sistematico per la stima di tutti i fattori di rischio significativi che intervengono in uno scenario di esposizione causato dalla presenza di pericoli”; in altre parole, la valutazione del rischio è la stima delle conseguenze sulla salute umana di un evento potenzialmente dannoso, in termini di probabilità che le stesse conseguenze si verifichino (APAT, 2008).

Appare evidente che in base ai *target* e, più in generale, alla sfera scientifica, sociale, politica o economica coinvolta, derivano diversi approcci ed obiettivi. L’ambito industriale, ad esempio, è stato tra i primi ad essere interessato dallo sviluppo di tecniche *ad hoc*. Si pensi, ad esempio, all’analisi di operabilità (*HAZard and OPerability analysis*, HAZOP), nata e sviluppata per grandi impianti industriali, secondo la quale vengono individuate anomalie di funzionamento che possono comportare incidenti rilevanti e successivamente vengono definite azioni di prevenzione e di protezione da intraprendere. Alla base di quest’analisi vi è lo studio degli schemi di un impianto da tutti i punti di vista meccanico, di processo etc. (Confessore, 2010).

1.1.1 Definizione generale di rischio

Nonostante l’indubbio successo Risk Assessment, (RA) in molti ambiti disciplinari delle scienze moderne, come la valutazione di rischio ambientale ed ecologica, la valutazione del rischio industriale e dei luoghi di lavoro, finanziario e bancario etc., appare evidente come manchi una definizione consolidata e universalmente accettata dei suoi principi e dei concetti fondamentali (Andretta, 2013). Le ragioni di ciò possono essere ricondotte a diversi fattori: è possibile ritrovare, ad esempio, una certa ambiguità in molte delle definizioni che si sono susseguite nel tempo oltre che un’interpretazione operativa in funzione del contesto di applicazione. Queste difficoltà possono essere anche giustificate dall’eterogeneità delle specializzazioni di *background* degli esperti, in contrasto con l’intrinseca natura multidisciplinare delle competenze richieste per la *risk analysis*.

In particolare, i diversi settori di rischio risentono di una mancanza di chiarezza per quanto riguarda le basi scientifiche, in grado di definire, in un unico quadro teorico, i concetti generali nei diversi ambiti di applicazione. A tal proposito, cercheremo qui di definire il concetto di rischio da un punto di vista formale, ripercorrendo diverse definizioni susseguite nell’ambito del RA negli ultimi decenni. Storicamente, la prima definizione di rischio si fa risalire al 1711 con la cosiddetta “definizione di de Moivre”; tuttavia, focalizzandoci su periodi a noi più vicini, ricordiamo come, nel XX secolo, si susseguono molte altre

definizioni di rischio, soprattutto negli ultimi 40 anni. Una tra le più chiare definizioni del termine è stata formulata da Lowrance: *“Risk is a measure of the probability and severity of adverse effects”* (Lowrance, 1976). Tale definizione rappresenta il fondamento per molte altre che si sono susseguite. Per comprendere la difficoltà che si incontra nel riuscire a formulare una definizione di rischio onnicomprensiva e il più possibile generale, è sufficiente pensare ai risultati del primo meeting della *“Society Risk Analysis”* (SRA), un episodio davvero emblematico. Dopo due anni di lavoro, nel 1987, i membri della *“Risk Definition Committee of the Society for Risk Analysis”*, nell’impossibilità di dare una definizione unica di rischio, decisero di ammettere molteplici definizioni in uso tra le diverse discipline coinvolte nell’analisi e nella gestione del rischio. Nella Newsletter pubblicata dalla SRA nel 1987 vengono citate ben 13 definizioni di rischio (SRA, 1987), molte delle quali sono connesse alla definizione proposta da Lowrance:

- 1) *“Possibility of loss, injury, disadvantage or destruction; to expose to hazard or danger; to incur risk or danger”.*
- 2) *“An expression of possible loss over a specific period of time or number of operational cycles”.*
- 3) *“Consequence/unit time = Frequency (events/ unit time) × magnitude (consequence/event).*
- 4) *Measure of the probability and severity of adverse effects.*
- 5) *Conditional probability of an adverse event (given that the causative events necessary have occurred).*
- 6) *Potential for unwanted negative consequences of an event or activity.*
- 7) *Probability that a substance will produce harm under specified conditions.*
- 8) *Probability of loss or injury to people and property.*
- 9) *Potential for realization of unwanted, negative consequences to human life, health, or the environment.*
- 10) *Product for a probability of an adverse event time the consequences of that event were it to occur (dimensions of consequences x time).*
- 11) *Function of two major factors: (a) probability that an event, or series of events of various magnitudes, will occur, and (b) the consequences of the events.*
- 12) *Probability distribution over all possible consequences of a specific cause which can have an adverse effect on human health, property or the environment.*
- 13) *Measure of the occurrence and severity of an adverse effect to health, property or the environment.*

Per fare chiarezza sulla definizione del rischio, ai fini di sviluppare una proposta metodologica per il risk assessment dei beni culturali, ci è sembrato opportuno seguire una definizione avulsa dalle peculiari connotazioni operative in uno specifico ambito e, quindi, di inquadrarlo in un unico, ampio e generale contesto teorico. Di seguito si riporta in sintesi quanto emerge da un articolo di recente pubblicazione circa la definizione del rischio basata sui concetti della teoria dei sistemi e della probabilità (Andretta, 2013).

L'idea che è alla base della definizione riportata in questa ricerca è che un'ampia classe di RA può essere eseguita in maniera più rigorosa dal punto di vista teorico, se, al momento dell'elaborazione del modello concettuale preliminare, fosse possibile procedere seguendo l'approccio metodologico per cui è necessario:

- I. Identificare il sistema che rappresenta la fonte del danno potenziale;
- II. Identificare la natura di ogni potenziale pericolo provocato dai possibili stati anomali del sistema di origine;
- III. Scegliere i bersagli di interesse e valutare il tipo di effetti avversi che possono essere determinati.

Innanzitutto, dall'approccio metodologico appena descritto, consegue, ancor prima di definire il rischio, la necessità di chiarire il concetto di sistema. In un'interpretazione generale, un sistema "S" può essere descritto come un complesso di componenti interagenti, attraverso interscambi reciproci di energia, materia e/o informazione, chiamati sottosistemi, unitamente alle relazioni tra questi, che consentono l'identificazione di un'entità o di un processo confinati (Laszlo e Krippner, 1998) (Andretta et al., 1986). In altre parole, un sistema può essere definito come un oggetto di studio che, sebbene sia costituito da elementi diversi mutualmente interconnessi e interagenti tra di loro e/o con l'ambiente esterno, reagisce come un tutt'uno con le proprie regole generali. I sottosistemi, ossia gli elementi costituenti e facenti parte di un sistema di studio, interagiscono quando il comportamento di uno tra questi influenza gli altri. L'influenza reciproca avviene, come accennato in precedenza, mediante scambi di energia, materia o informazioni. Il processo di modellizzazione di un sistema si fonda sulla descrizione matematica degli elementi costitutivi principali del modello stesso: input, output, variabili di stato, variabili di controllo, variabili esogene, variabili aleatorie (Haimes, 2009). Nella teoria classica dei sistemi, tutti gli elementi finora menzionati sono rappresentati da variabili precisamente misurabili e note in ogni istante. In particolare, ad ogni istante, i livelli delle variabili di stato sono influenzati dai valori degli elementi costituenti e questi livelli determinano gli output del sistema. In ogni sistema è possibile, poi, identificare un sottoinsieme di possibili valori delle variabili di stato, siano esse di controllo, esogene o aleatorie, per le quali gli output del sistema possono

essere considerati in una condizione “anomala” o “*out of range*”. Se un sistema è in uno “stato anomalo” può determinare un pericolo, nel senso che può generare un pericolo per i sottosistemi e, più in generale, per ciascun bersaglio di interesse (anche esterno al sistema). Ciò che lega gli stati anomali del sistema e il pericolo per i bersagli di interesse è il danno e la sua grandezza quantificabile, detta anche magnitudo del danno, causata dalle condizioni anomale del sistema. In particolare, i valori anomali delle variabili di stato $\{ST_a\}$ possono provocare al sistema $\{S\}$ un danno $\{D\}$, il quale può essere quantificato in termini della sua magnitudo $\{M_d\}$.

I concetti finora definiti di $\{ST_a\}$, $\{D\}$ e $\{M_d\}$ sono in relazione con il sistema di origine $\{S\}$, il quale può provocare potenziali effetti avversi (ossia può rappresentare un pericolo) per i bersagli di interesse $\{T_i\}$. E' opportuno precisare che i bersagli possono essere elementi esterni al sistema $\{S\}$.³

Schematizzando quanto detto finora risulta che:

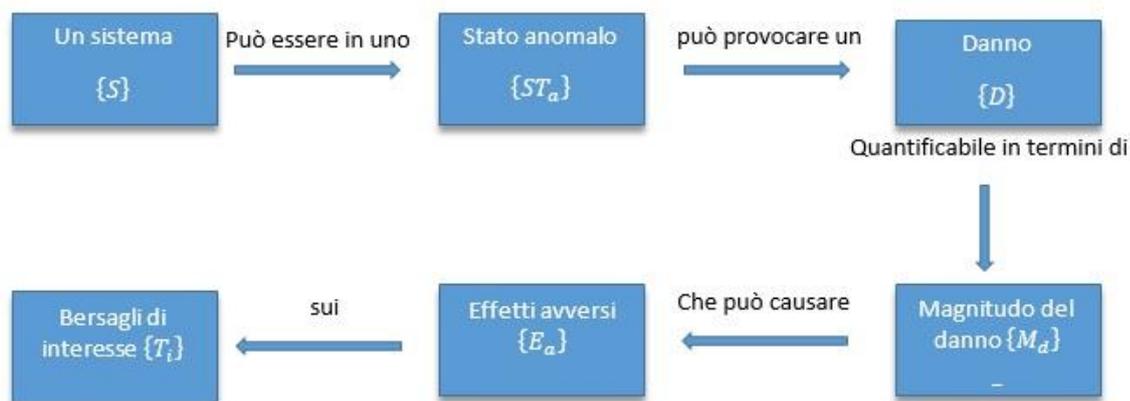


Figura 1-1: schema della definizione di rischio riportata e delle relazioni concettuali. Da (Andretta, 2013).

A questo punto, è possibile definire il rischio come segue: il rischio $\{R\}$ per i bersagli di interesse $\{T_i\}$, dovuto ad uno stato anomalo $\{ST_a\}$ del sistema $\{S\}$, che provoca il danno $\{D\}$ di magnitudo $\{M_d\}$, è dato dalla probabilità $P(E_a)$ che si verifichi un effetto avverso $\{E_a\}$ sui bersagli di interesse.

$$R = P(E_a)$$

Appare ora evidente come la probabilità che si verifichi un effetto avverso sui bersagli di interesse dipenda dallo scenario di rischio considerato. Ciò significa che il rischio è strettamente connesso a molteplici fattori che devono essere definiti prima dell’elaborazione del modello concettuale di valutazione del rischio. Ad esempio, è necessario definire: il pericolo in oggetto tra tutti quelli possibili connessi agli stati anomali; i bersagli di interesse

³ In molti casi, sebbene ne facciano fisicamente parte, può comunque risultare utile considerarli, almeno dal punto di vista teorico, esterni al sistema $\{S\}$.

e le loro caratteristiche principali (esseri umani, *endpoint* ecologici, infrastrutture, beni artistici/monumentali etc.); la posizione dei bersagli rispetto al sistema; la natura dei possibili effetti avversi ed i percorsi di esposizione dei bersagli alla magnitudo del danno nell'ambiente esaminato. Per queste ragioni, l'equazione precedente può essere riscritta in maniera tale da evidenziare la significativa dipendenza dal tipo di scenario del rischio in considerazione:

Scenario di Rischio: $\{ST_a\}, \{M_d\}, \{E_a\}$

$$R_{\{T_i\}} = P_{\{T_i\}}(ST_a, M_d, E_a)$$

Uno scenario del rischio è caratterizzato dalle proprietà degli stati, della magnitudo del danno e dagli effetti sui bersagli. E' chiaro, quindi, che a parità di stato anomalo e magnitudo del danno, se cambia il bersaglio di interesse, possono cambiare anche i possibili effetti avversi e, con loro, anche la probabilità che definisce il rischio.

Inoltre, il rischio complessivo per gli specifici bersagli è dato dalla somma delle probabilità di tutti i possibili effetti avversi considerati, funzione dei vari scenari collegati con il sistema di interesse.

$$R_t = \sum R_{scenari}$$

In uno scenario ben definito, è possibile focalizzarsi sugli effetti avversi che investono i bersagli di interesse, senza considerare i singoli stati anomali. Si cerca, in questo caso, di arrivare a determinare la relazione causale (ossia funzionale) tra il danno di magnitudo M_d nel sistema esaminato ed il rischio degli effetti negativi E_a sui bersagli T_i . L'equazione, in questo modo, può essere riscritta nel modo seguente:

$$R = P(E_a, M_d)$$

Per cui $P(E_a, M_d)$ è la probabilità che si verifichi un effetto avverso E_a in relazione a tutti i possibili stati anomali ST_a che producono un danno di magnitudo M_d . Questa probabilità risulta, così, il risultato di tutti gli stati anomali ST_a che possono provocare un danno di magnitudo M_d nel sistema indagato.

Per le proprietà della probabilità incondizionata e congiunta, l'equazione precedente può essere scritta come segue:

$$R = P(E_a, M_d) = P(E_a | M_d) \cdot P(M_d)$$

Dove:

$P(M_d)$ è la probabilità incondizionata che un danno di magnitudo M_d si verifichi nel sistema S .

$P(E_a | M_d)$ è la probabilità condizionata⁴ che si manifestino effetti avversi E_a sui bersagli di interesse, causata dal danno D di magnitudo M_d .

Tale equazione può essere considerata come la formalizzazione matematica della quinta definizione generale⁵ del rischio data dalla SRA durante il già citato primo meeting costitutivo del 1987. Inoltre, secondo tale equazione il rischio R – definito come una probabilità $P(E_a)$ che si verifichino effetti avversi causati dal danno D – così come $P(E_a, M_d)$ e $P(M_d)$, elementi della sua definizione, sono numeri adimensionali definiti in un intervallo tra [0,1].

I domini di queste funzioni sono gli insiemi degli scenari di rischio: [$\{ST_a\}$, $\{M_d\}$, $\{E_a\}$]: il dominio per $P(E_a)$ è costituito dall'insieme di tutti gli effetti avversi $\{E_a\}$ sui bersagli di interesse; per $P(E_a, M_d)$, l'insieme rappresentato da $\{\{E_a\} \cup \{M_d\}\}$ ossia gli effetti avversi condizionati alla magnitudo del danno; mentre per $P(M_d)$, gli eventi statistici dei possibili danni caratterizzati da una magnitudo M_d .

La definizione di rischio così formulata è una probabilità, ovvero è un numero puro compreso fra:

$$0 \leq R \leq 1$$

Il valore per cui $R = 0$ delinea una situazione idealistica, di nessun rischio possibile per i bersagli di interesse nello scenario analizzato; mentre il valore $R = 1$ rappresenta la certezza di effetti avversi .

La funzione $P(M_d)$ è stata definita come la probabilità incondizionata che si verifichi un danno D di magnitudo M_d nel sistema. Questa probabilità dipende da tutti gli stati anomali che provocano il danno di magnitudo M_d . Ciononostante, è utile, oltre che corretto fisicamente, considerare M_d al posto di ST_a come variabile statistica indipendente. La determinazione di $P(M_d)$ si ottiene mediante analisi dettagliate del sistema esaminato e dei suoi possibili stati anomali.

Infine, il prodotto $P(M_d) \cdot M_d$ rappresenta la magnitudo prevista del danno e può essere vista come una misura del pericolo (*harzard – Haz*) che è generato dagli stati anomali ST_a del sistema S .

$$Haz = P(M_d) \cdot M_d$$

Da questa relazione, per un hazard costante, il rischio varia in funzione dei bersagli. Si consideri, ad esempio, il caso estremo per cui un *Haz* senza bersagli sensibili non produce rischi. In altre parole, il pericolo consiste nella presenza di condizioni potenzialmente

⁴ E' condizionata dal verificarsi del danno D di magnitudo M_d nel sistema S .

⁵ Conditional probability of an adverse event (given that the causative events necessary have occurred).

dannose. A tal proposito, in relazione ai fenomeni naturali, la pericolosità è stata definita come probabilità di occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso in un determinato intervallo di tempo e in una certa area (Varnes, 1984). La definizione di pericolosità include, quindi, una dimensione spaziale e temporale del fenomeno investigato ma, a differenza del rischio, non prende in esame il potenziale dannoso degli effetti avversi sui bersagli. La distinzione tra questi due concetti (rischio e pericolo) non sempre risulta chiara, generando spesso una certa confusione terminologica e, di conseguenza, metodologica.

La funzione $P(E_a | M_d)$, invece, è stata definita come la probabilità condizionata che si verifichi un effetto avverso E_a sui bersagli di interesse T_i , dovuto al danno D di magnitudo M_d , dato che gli eventi causali si siano verificati nel sistema S . Questa funzione è coerente con la definizione della Royal Society del 1992, che intende il rischio come combinazione della probabilità con cui si manifestano effetti avversi e dell'entità (magnitudo) degli effetti avversi.

Una volta che lo scenario di analisi è stato definito, $P(E_a | M_d)$ è una funzione della magnitudo del danno M_d . In altre parole $P(E_a | M_d)$ può essere interpretata come una funzione di M_d che prende in considerazione le grandezze fisiche che possono provocare effetti avversi nell'ambiente in cui sono collocati i bersagli di interesse.

Ad ogni modo, è possibile supporre di riuscire ad esprimere la dipendenza funzionale di $P(E_a | M_d)$ da M_d , nel seguente modo:

$$R(M_d) = f(M_d) \cdot P(M_d)$$

Dato un E_a , espandendo la precedente equazione in serie di Taylor al primo ordine, in un intervallo adeguato di continuità e in corrispondenza di specifici valori di M_d , si ottiene che l'incremento del rischio ΔR rispetto a $R(M_d)$:

$$\Delta R = \Delta P(E_a) = K \cdot \Delta M_d + O(\Delta M_d^2)$$

Dove

$$K = \left. \frac{\partial (f(M_d) \cdot P(M_d))}{\partial M_d} \right|_{M_d}$$

La costante K è, a sua volta, una funzione di probabilità. Più precisamente può essere definita come la funzione densità di probabilità della variabile casuale M_d , associata agli eventi stocastici: "il verificarsi di effetti negativi E_a sui bersagli, nello scenario di analisi del rischio in considerazione".

Per comprendere l'approccio adottato per la metodologia di valutazione dei rischi proposta, è opportuno aprire una piccola digressione riguardo la teoria della probabilità, la quale può fornire un quadro teorico generale su cui basare la definizione generale di rischio appena

descritta e la metodologia proposta. Il concetto di probabilità⁶ applicato fin dal 1600 è divenuto, con il passare del tempo, la base di molteplici discipline scientifiche, come il risk assessment. In tutti questi casi, un fenomeno osservabile si considera solo dal punto di vista della possibilità che questo si verifichi o meno tra i due casi estremi, la certezza (come quella che si ha quando, lanciando un dado, si ottiene un numero compreso tra 1 e 6) e l'evento impossibile (si ottiene 0 da un lancio). Pertanto, la probabilità di un evento è sempre un numero compreso tra 0 e 1 e indica il grado di confidenza circa l'accadimento reale di un evento. A seconda del modo in cui può essere calcolata la probabilità, vi sono diverse definizioni che la descrivono.

Secondo la definizione classica, se in N test⁷ di un esperimento⁸, gli outcome⁹ sono ugualmente probabili e incompatibili l'uno con l'altro, presi gli N_a test che producono outcome positivi per un certo evento¹⁰ A , la probabilità di A è data dal rapporto N_a/N tra il numero di esiti positivi e il numero totale di test. Questa definizione, che rappresenta la prima moderna interpretazione di probabilità, è stata enunciata nel XVII secolo da Pascal e Fermat ed è fondata su un metodo di calcolo valido per specifiche situazioni; si noti come tale definizione ha un difetto di "circolarità"; si basa, infatti, sull'ipotesi di risultati equiprobabili, utilizzando il concetto di probabilità ancor prima di fornirlo (Andretta, 2013). L'approccio frequentista prevede, invece, che se un esperimento è ripetuto per n test e l'evento B si verifica n_b volte, la frequenza relativa n_b/n tende a una quantità finita, detta probabilità di B , per n che tende all'infinito. Per questa definizione anche conosciuta come legge dei grandi numeri di Bernoulli (XVII secolo), si assume possibile la ripetibilità di un esperimento per un numero notevole di volte.

Infine Kolmogorov, nei primi anni '30, fornì una definizione assiomatica di probabilità, basata sulla teoria degli insiemi. Questa teoria è stata formulata attraverso un processo logico deduttivo a partire da una serie di assiomi, ossia proposizioni assunte come vere (non dimostrabili). Si consideri che la funzione di probabilità Pr ha come dominio l'insieme degli elementi che costituiscono lo spazio degli eventi S e come codominio l'insieme dei numeri reali nell'intervallo $[0,1]$. Gli assiomi per definire la Pr sono:

⁶ Storicamente si fa risalire alla descrizione di una distribuzione di fenomeni naturali che assumevano una forma "a campana" nel *Phaedo* di Platone.

⁷ Test: ogni ripetizione dello stesso esperimento.

⁸ Esperimento: qualsiasi processo che produce un risultato misurabile.

⁹ Outcome: risultato di ogni test.

¹⁰ Evento: gli eventi costituiscono le differenti categorie in cui possono essere classificati gli outcome degli esperimenti.

1. Per ogni evento $\rightarrow A \in S : Pr(A) \geq 0$
2. Per lo spazio degli eventi $\rightarrow S: Pr(S) = 1$
3. Se gli eventi A e B di S sono mutualmente esclusivi
 $A \cap B \neq 0 \rightarrow Pr(A \cup B) = Pr(A) + Pr(B)$

1.2 L'analisi del rischio ambientale

All'inizio del XX secolo il monitoraggio ambientale era indirizzato verso parametri fisici come (temperatura, correnti, maree etc.) e costituenti chimici (salinità, nutrienti). Negli anni '60 si inizia a comprendere come gli inquinanti possano avere effetti negativi sull'ecosistema e, di conseguenza, s'intraprendono attività per identificare microinquinanti organici e inorganici, la loro distribuzione nell'ambiente etc. L'attenzione nei confronti di queste tematiche aumenta con il passare del tempo, tanto che nei primi anni '70 si monitora l'inquinamento mediante tecniche di chimica analitica e negli anni '80 si inizia a far uso di sentinelle animali (*Mussel Watch Contaminant Monitoring*)¹¹.

Il risk assessment ambientale può essere applicato seguendo o uno dei seguenti approcci o entrambi contemporaneamente. Si distinguono pertanto:

- Analisi retrospettiva: si valutano gli effetti delle esposizioni avvenute in passato o presente.
- Analisi prospettiva: si stimano rischi provocati da azioni future, pesando ad esempio i rischi derivanti da scenari alternativi¹².

Il rischio ambientale è associato ad eventi che possono causare danni a persone o agli ecosistemi con ripercussione, quindi, sulla flora, fauna e sulle componenti ambientali in generale. Relativamente ad un inquinamento ambientale, di natura chimica o fisica (ad esempio connesso alla presenza di campi E.M. o a radiazioni, ionizzanti e non), il rischio

¹¹ Si tratta di uno tra i più longevi programmi di monitoraggio continuo dei contaminanti in acque costiere degli Stati Uniti e dei Grandi Laghi. Il progetto è stato sviluppato per analizzare le tendenze di contaminanti chimici e biologici nei sedimenti e nei tessuti di bivalvi in oltre 300 località costiere dal 1986 ad oggi. In questo periodo sono monitorati diversi parametri (oltre 100 contaminanti organici e inorganici, istologia dei bivalvi, concentrazione del *Clostridium perfringens* etc.).

<http://ccma.nos.noaa.gov/about/coast/nsandt/musselwatch.aspx>

¹² Ad esempio, il *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)* è entrato in vigore il 1° giugno 2007, ha come obiettivo principale quello di assicurare un elevato livello di protezione della salute umana e dell'ambiente contro i rischi che possono derivare dalle sostanze chimiche.

non è una proprietà intrinseca di un fattore contaminante, ma è il prodotto della sua tossicità e della relativa esposizione.

Tra i rischi ambientali si distinguono il rischio ecologico ed il rischio sanitario, descritti in seguito. L'*Ecological Risk Assessment* (ERA) e l'*Human Health Risk Assessment* (HHRA) sono concettualmente simili e, allo stesso tempo, profondamente diversi. Appare subito chiaro che ciò contraddistingue le due tipologie di analisi del rischio sono i bersagli considerati: nell'HHRA l'identificazione del pericolo è correlata alla identificazione e alla caratterizzazione dei contaminanti di interesse per l'uomo e la sua salute; per ERA, gli endpoint di valutazione prendono in considerazione interi insiemi o comunità di specie; possono esserci, quindi, diversi obiettivi a riflesso dell'ampia diversità di sistemi ecologici (e la fase di formulazione del problema diventa molto delicata).

La valutazione degli endpoint si basa su approcci diversi; nel caso di rischio ecologico si fonda sul concetto di rischio relativo, mentre l'HHRA su un concetto di rischio assoluto:

- Analisi di rischio **relativa** è la tipologia di procedura che, oltre a valutare il grado di inquinamento di un sito, definisce le priorità di intervento sul sito stesso. Vengono a tal proposito elaborate le strategie di gestione del rischio evitando di disperdere risorse economiche in situazioni che non comportino effettivi rischi (Aglietto, 1999). Vi sono diverse metodologie mediante le quali è possibile svolgere un'analisi di rischio relativa; molto diffuse sono i cosiddetti "modelli a punteggio" che consentono di creare un sistema di classificazione ordinale dei siti potenzialmente contaminati in rapporto alla loro pericolosità, con l'obiettivo di creare una lista di priorità degli interventi da eseguire (Felli e Benvegù, 1993). Tale analisi può anche avere una funzione propedeutica per metodologie di analisi assolute di rischio.
- Analisi di rischio **assoluta** porta all'effettiva quantificazione numerica degli indici di rischio (descritti in seguito) attraverso una modellizzazione matematica dei percorsi e delle modalità di esposizione dei bersagli. Si tratta di analisi estremamente complicate per la numerosità dei fattori che sono coinvolti. L'analisi assoluta di rischio può essere definita come una metodologia scientifica e sistematica per valutare lo stato di contaminazione delle matrici ambientali in termini di quantificazione dei rischi attuali e/o potenziali per l'uomo e per l'ambiente. Il criterio di tale analisi porta ad una valutazione del rischio per un sito, in funzione delle conseguenze che possono derivare dalla situazione qualitativa, definendo degli obiettivi di risanamento vincolati alle condizioni specifiche del sito. Si tratta di un'analisi che è rivolta e si conduce per quei siti che rappresentano un pericolo cronico per l'uomo, stimando un livello di rischio e, quindi, valori limite di concentrazione di un dato inquinante a seconda delle

caratteristiche della sorgente, dei meccanismi di trasporto e dei bersagli di interesse (APAT, 2008).

In generale, l'analisi di rischio ha assunto un ruolo sempre più dominante nella gestione sostenibile delle risorse, sia in ambito internazionale, sia nelle politiche internazionali.

Da un punto di vista normativo, ad esempio, la disciplina dei siti inquinati introdotta dall'abrogato D.Lgs. 22/1997, cosiddetto Decreto Ronchi, è attualmente conferita con importanti modifiche nel D.Lgs. 152/2006, Titolo V della Parte IV. Il Testo Unico dell'Ambiente ha segnato il passaggio ai procedimenti di analisi sito specifica, costituendo una grande innovazione sul panorama legislativo italiano. Con il D.M. 471/1999, infatti, l'accertato superamento di uno solo dei parametri riportati obbligava alla messa in sicurezza e alla bonifica del sito. Le stesse concentrazioni limite accettabili, indicate nel D.M. 471/1999, risultano, tranne qualche piccola modifica dovuta ad errori presenti nel D.M. 471/99 ed all'evoluzione delle conoscenze sugli effetti sanitari degli inquinanti, uguali alle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC) previste dal D.Lgs. 152/2006. Quest'ultime sono differenti in funzione della destinazione d'uso (ad uso verde pubblico, privato e residenziale o ad uso commerciale e industriale).¹³ La procedura dettata dal D.Lgs. 152/2006¹⁴ prevede che le CSC vengano individuate tramite indagine preliminare; in caso di superamento, anche per singola sostanza inquinante, il sito viene etichettato come potenzialmente contaminato e si procede con la sua caratterizzazione. In seguito, valutati i risultati della caratterizzazione, si individuano le Concentrazioni Soglia di Rischio (CSR), ovvero i livelli di contaminazione delle matrici ambientali, da determinare caso per caso, mediante analisi di rischio sito specifica, tenendo conto dei potenziali bersagli, percorsi, obiettivi in base alla destinazione d'uso del sito prevista dagli strumenti di programmazione territoriale.

1.2.1 L'analisi del rischio sanitario

Attualmente si tratta dello strumento di supporto più avanzato alle decisioni nella gestione dei siti contaminati, che consente di valutare, in via quantitativa, i rischi per la salute umana connessi alla presenza degli inquinanti nelle matrici ambientali (APAT, 2008). In realtà, il rischio sanitario è dato dall'incremento di rischio a cui il recettore umano è soggetto per effetto dell'esposizione ad un determinato stato di contaminazione ambientale. Il valore del rischio è funzione del valore di concentrazione nel punto d'esposizione, dei meccanismi di

¹³ Tabella 1A e 1B dell'Allegato 5 alla Parte IV del Titolo V del D.Lgs. 152/2006.

¹⁴ Art. 242 alla Parte IV del Titolo V del D.Lgs. 152/2006.

migrazione, del tasso di esposizione e della natura tossicologica del contaminante. L'esposizione descrive il modo in cui la sostanza in esame entra in contatto con gli essere umani; nel caso in cui il punto di esposizione non coincide con la sorgente dell'inquinante, sarà necessario elaborare modelli per schematizzare i meccanismi di trasporto.

L'analisi del rischio sanitario si fonda sul modello concettuale per cui:



La natura tossicologica del composto in esame è una discriminante fondamentale. Tenendo presente che la tossicità è funzione di molteplici fattori (solubilità, caratteristiche chimico-fisiche, vie di esposizione, frequenza e durata dell'esposizione etc.) per il calcolo del rischio è necessario distinguere se si tratti di una sostanza tossica, cancerogena o non cancerogena. A livello internazionale, l'*International Agency for Research on Cancer (IARC)*, agenzia dell'Organizzazione mondiale della Sanità, propone la seguente classificazione delle sostanze:

Tabella 1-1: classificazione sostanze cancerogene e non. Da (IARC, 2013)¹⁵

Gruppo	Caratteristica	Sostanze classificate
1	Cancerogeno per l'uomo	114
2A	Probabilmente cancerogeno per l'uomo	69
2B	Forse cancerogeno per l'uomo	283
3	Non classificabile in base alla sua cancerogenicità per l'uomo	504
4	Probabilmente non cancerogeno per l'uomo	1

La distinzione tra sostanze cancerogene e non avviene sulla base delle correlazioni esistenti tra dose assorbita e risposta (figura 1-2):

¹⁵ Ultimo aggiornamento dei dati riportati in tabella 23 ottobre 2014

<http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>

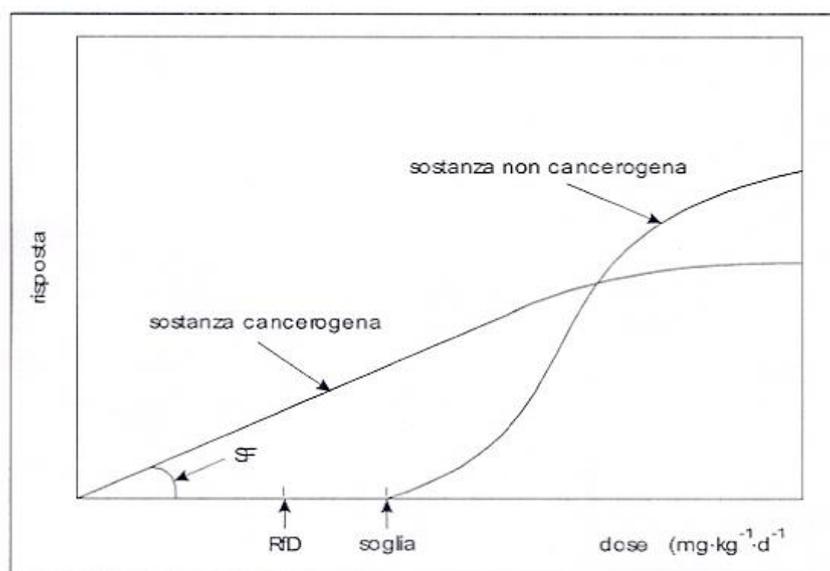


Figura 1-2: relazione dose-risposta per sostanze cancerogene e non.

- la forma sigmoide è tipica dei composti non cancerogeni ed implica una soglia minima di effetto, al di sotto della quale non si verificano effetti dannosi per la popolazione esposta. Il principale indice di tossicità per sostanze non cancerogene è la *reference dose* (RfD) definita come la soglia di esposizione giornaliera per unità di peso corporeo, capace di non provocare effetti sulla popolazione esposta durante uno specifico intervallo temporale, di solito corrispondente alla durata media di vita (70 anni). In questo caso, il rischio è espresso dal parametro “quoziente di rischio” *Hazard Quotient* (HQ), adimensionale. Tale indice è espressione di quanto l’esposizione alla sostanza (E) superi la dose tollerabile o di riferimento (RfD): $HQ = \frac{E}{RfD}$.

Per $HQ < 1$ il rischio non sussiste, mentre per $HQ > 1$ c’è la probabilità di osservare effetti sulla popolazione esposta. E’ possibile inoltre definire l’*Hazard Index* (HI) che tenga conto dei contributi dovute a diverse sostanze non cancerogene N per tutte le vie di esposizione attive M , per cui: $HI_{tot} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M HI_{i,j}$
- la correlazione di tipo lineare descrive le sostanze cancerogene, per le quali non è possibile definire un limite di esposizione al di sotto del quale non siano rilevabili effetti per la salute. Per la stima del rischio si procede con l’individuare lo *slope factor* (SF) ossia la tangente del tratto rettilineo, estrapolata a basse dosi, che rappresenta il rischio di sviluppo di tumori riferito ad una dose unitaria della sostanza per tutta la vita del soggetto esposto. La stima del rischio, in questo caso tiene conto del prodotto per cui $IELCR = E \cdot SF$, dove il parametro *IERC* (*Individual Excess Lifetime Cancer Risk*) quantifica il numero di eventi tumorali probabilmente rilevabile in un individuo rappresentante una popolazione esposta, rispetto al confronto con una non esposta. Per

mantenere le caratteristiche di conservatività dell'analisi del rischio, si procede alla sommatoria dei singoli valori di rischio di tutte le sostanze considerate N e le loro vie di esposizione M , per cui: $IELRC_{tot} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M IELRC_{i,j}$

E' interessante notare che, per la definizione generale di rischio precedentemente riportata e incentrata sui concetti della probabilità, nel caso della valutazione del rischio sanitario richiesta dalle normative vigenti in diversi paesi industrializzati, si verifica la seguente condizione:

$$P(M_d) = 1$$

Ciò significa che sappiamo con certezza, ad esempio, per la normativa italiana, dall'analisi delle CSC previste dal D.Lgs. 152/2006, che un danno nel sistema esaminato è già accaduto. Pertanto possiamo scrivere, semplificando:

$$R = P(E_a | M_d)$$

In questi casi, la presenza nel suolo o nell'acqua anche di un singolo valore di concentrazione di un inquinante superiore ai valori stabiliti per legge (in riferimento alla lista di circa 100 sostanze chimiche) comporta il dovere di considerare il suolo potenzialmente contaminato¹⁶. Nel caso di suolo potenzialmente contaminato, il decreto legislativo 152/06 richiede un'analisi del rischio che valuti gli impatti sulla salute, al fine di determinare se il sito debba essere considerato effettivamente contaminato o meno, prendendo in considerazione diversi fattori come la dimensione della contaminazione e la vicinanza degli abitanti.

1.2.2 L'analisi del rischio ecologico

In passato, una visione più antropocentrica ha sempre determinato una direzione degli sforzi atti a limitare i rischi che avesse, come unico beneficiario, l'uomo. Questo atteggiamento (dettato anche dalla maggiore percezione che gli uomini hanno nei confronti dei rischi che li coinvolgono) ha generato obblighi normativi che imponevano di considerare l'uomo come unico recettore per l'analisi del rischio. Tuttavia, col passare del tempo, ci si è resi conto che spesso non è l'uomo a subire i danni maggiori. Con questa ostentata superficialità e con le sue azioni, l'uomo ha costituito e costituisce tuttora una grande minaccia nei confronti degli ecosistemi e della biodiversità. E' in questo scenario che nel corso degli anni '90 s'inserisce l'Analisi di Rischio Ecologico (*Ecological Risk Assessment*, ERA). Suter la definisce come un processo sistematico per analizzare dati, informazioni, assunzioni ed incertezze; il tutto finalizzato alla stima e alla valutazione della probabilità che si manifestino effetti avversi sull'ecosistema analizzato (Suter, 1993). Diverse sono state le proposte internazionali per

¹⁶ Parte IV, Titolo V e ss. mm. ii.

quanto riguarda le metodologie di rischio ecologico: in questa ricerca, saranno menzionati il metodo promosso dall'U.S. *Environmental Protection Agency* (EPA)¹⁷ e dall'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA).

L'EPA definisce la valutazione del rischio come il processo che stima la probabilità che possano avvenire o stiano avvenendo effetti ecologici avversi, come risultato dell'esposizione ad uno o più agenti stressanti (EPA, 1998). Si riferisce quindi ad una valutazione rivolta a recettori non umani.

In questa definizione si evidenziano alcuni concetti che sono stati introdotti già a proposito della definizione del rischio e rappresentano dei concetti chiave generali; ovvero: probabilità (calcolabile, ad esempio, quantitativamente con un approccio frequentista), effetto avverso (inteso come alterazioni chimiche, fisiche o biologiche delle caratteristiche strutturali e funzionali del sistema esaminato) ed agente stressante (azione indesiderata in grado di determinare un effetto avverso). Infine, l'elemento che lega gli effetti avversi agli agenti stressanti è l'esposizione, che descrive il fattore di stress, la sua sorgente, le possibilità di esposizione, le vie di trasporto, le possibili trasformazioni ed eventualmente tiene conto della formazione di fattori di stress secondari (che possono essere ancora più tossici dei composti parentali).

Innanzitutto, secondo quanto suggerito dall'EPA (EPA, 1998), è necessario procedere con l'Analisi del Rischio Ecologico nel caso in cui sia stata riscontrata la presenza di un agente stressante, di un effetto avverso o vi sia l'interesse di proteggere un'entità ecologica di particolare valore. Le linee guida dell'EPA descrivono che il processo di valutazione si fonda su due elementi principali: caratterizzazione degli effetti e caratterizzazione dell'esposizione. Questi forniscono il punto di riferimento per condurre le tre fasi della valutazione del rischio (figura 1-3):

- Formulazione del problema: si definiscono gli scopi dell'analisi e i tipi di dati rilevanti a questo fine. E' necessario definire i parametri ecologici da valutare, le possibili vie di esposizione agli agenti stressanti, gli effetti che possono avere luogo e i metodi per misurarli (*assessment endpoint* e *measurement endpoint*). Viene quindi a delinarsi un modello concettuale, grazie al quale è possibile descrivere le relazioni accertate e quelle previste fra gli endpoint e gli agenti stressanti. Questo schema definito a partire da informazioni riguardanti gli agenti stressanti, i processi di esposizione e gli effetti riscontrati o previsti sarà il "canovaccio" sul quale basare l'analisi di rischio, oltre che

¹⁷ L'Agenzia fu fondata nel dicembre del 1970, a seguito della proposta del Presidente degli Stati Uniti Nixon.
www.epa.gov

evidenziare eventuali lacune conoscitive che saranno poi indagate nella fase successiva di analisi. Si delinea, così, un diagramma di esposizione che collega un'eventuale sorgente al relativo agente stressante che, seguendo un determinato percorso, provoca un effetto misurabile tramite una variazione nell'attributo dell'assessment endpoint. Al termine della fase di formulazione del problema viene pianificato il piano di indagini, oggetto della fase successiva.

- **Analisi:** in questa fase sono contestualmente condotte due attività, ossia caratterizzare l'esposizione e gli effetti. In primo luogo, vengono descritte la tipologia di esposizione (primaria o secondaria), i fattori che la controllano, le dinamiche in termini di spazio, tempo e intensità, il trasporto etc, elementi che servono a delineare il cosiddetto *stressor-response profile*¹⁸. Talvolta, non è sempre possibile calcolare il rischio, in termini di effetti dovuti agli agenti stressanti, per tutte le risorse ecologiche. In questi casi si procede con la selezione di alcune specie sulle quali sviluppare misure specifiche per la caratterizzazione degli effetti (indice di mortalità o di fecondità).
- **Caratterizzazione del rischio:** è la fase finale che ha come obiettivo la descrizione del rischio sulla base degli endpoint identificati nella prima fase. I dati ricavati dalla seconda fase, invece, per quanto riguarda esposizione ed effetti sono integrati per formulare una stima del rischio, in forma di probabilità che gli effetti avversi accadano o accadranno come risultato di esposizioni reali o possibili. La stima e la descrizione valutativa del rischio, assieme agli elementi ricavati dalle precedenti fasi, saranno sintetizzate nel rapporto conclusivo di analisi del rischio, allo scopo di fornire uno strumento chiaro.

¹⁸ Ad esempio, ipotizzando che il fattore stressante sia una sostanza chimica tossica per alcuni organismi, si definisce una curva di distribuzione cumulativa delle concentrazioni di questa sostanza nelle matrici ambientali. Si analizza, infine, una curva dose-risposta all'aumentare della concentrazione della sostanza tossica.

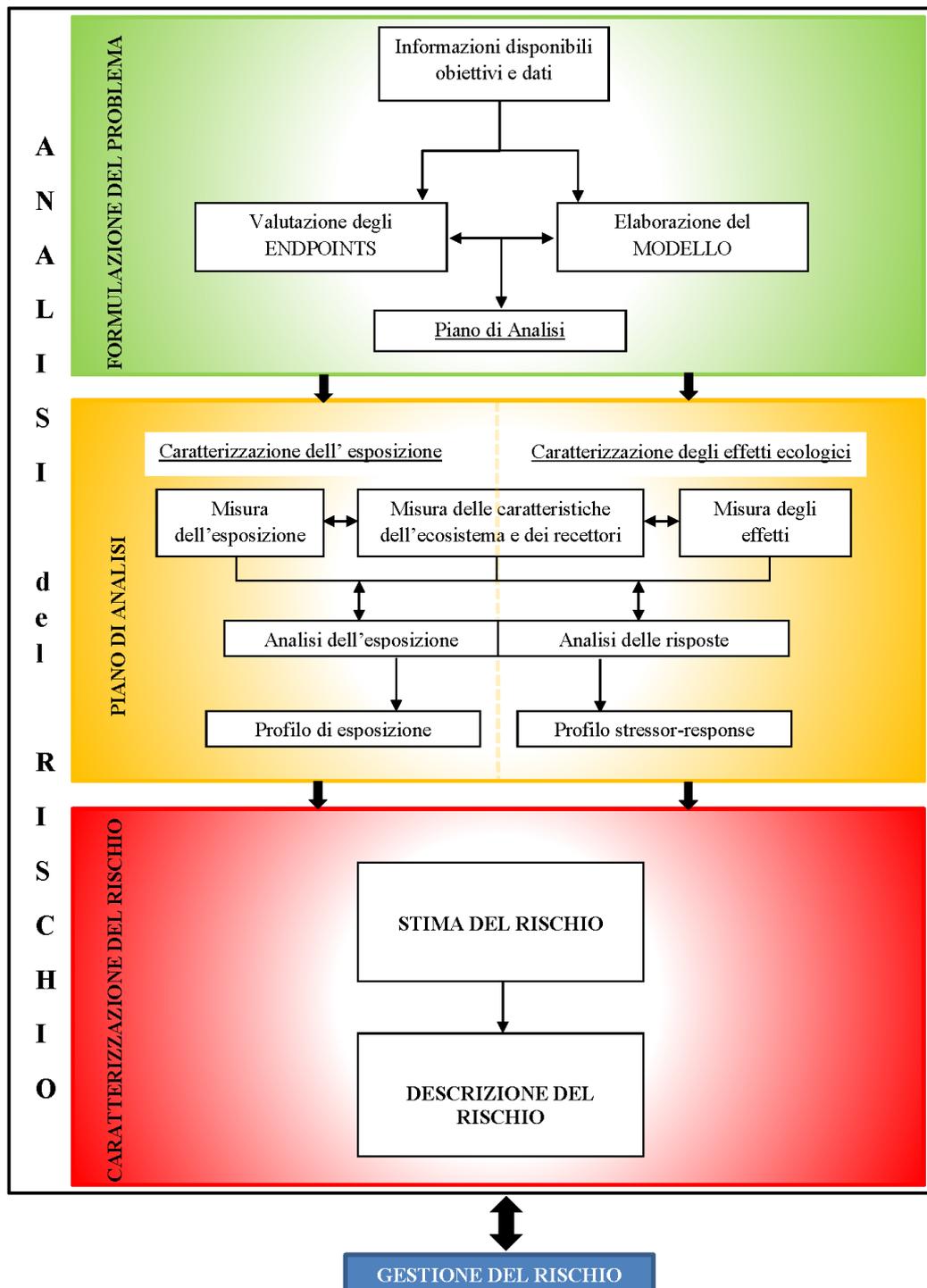


Figura 1-3: schema e descrizione sintetica delle fasi di Analisi del rischio. Da (EPA, 1998), modificata.

L'obiettivo, come si evince dallo schema dell'ERA riportato in figura 1-3, è utilizzare le informazioni ottenute come supporto per decisioni rivolte alla gestione del rischio. La gestione del rischio (*risk management*) tiene conto anche di fattori addizionali come i costi ed i benefici sociali.

Si tratta di una metodologia sviluppata all'interno di un contesto di gestione del rischio come strumento di supporto alle decisioni; pertanto si compone di parti come interattività del

processo, confronto e priorità tra i rischi esaminati e unione di aspetti scientifici e gestionali nella scelta del “valore ambientale da proteggere”. Quest’ultima espressione (valore ambientale da proteggere, in inglese assesement endpoint) indica i bersagli nell’analisi del rischio e devono essere intese come espressioni esplicite dell’attuale valore ambientale che ha necessità di essere protetto (EPA, 1992). La scelta degli endpoint si basa su diverse considerazioni; di solito, sono elementi che riflettono i valori ambientali stabiliti dalla normativa oppure costituiscono esempi per le funzioni ecologiche, che potrebbero essere danneggiate. Affinché un elemento sia considerato endpoint è necessario che abbia almeno due caratteristiche, ossia la possibilità di ricondurlo direttamente o meno ad entità-risorse ecologiche valutabili (specie, funzione ecosistemica, habitat etc.); deve essere misurabile, in qualche sua funzionalità o attributo, in maniera tale che sia deducibile l’esposizione ad un agente stressante (indice di mortalità, superficie ricoperta da un habitat etc.) (EPA, 1992). Al fine di favorire il confronto fra casi specifici è preferibile l’identificazione di parametri standard. Solitamente, le misure di sensibilità sono riferite ad indici di mortalità di specie biotiche, indici di alterazione delle capacità produttive, di variazione delle strutture delle comunità biotiche.

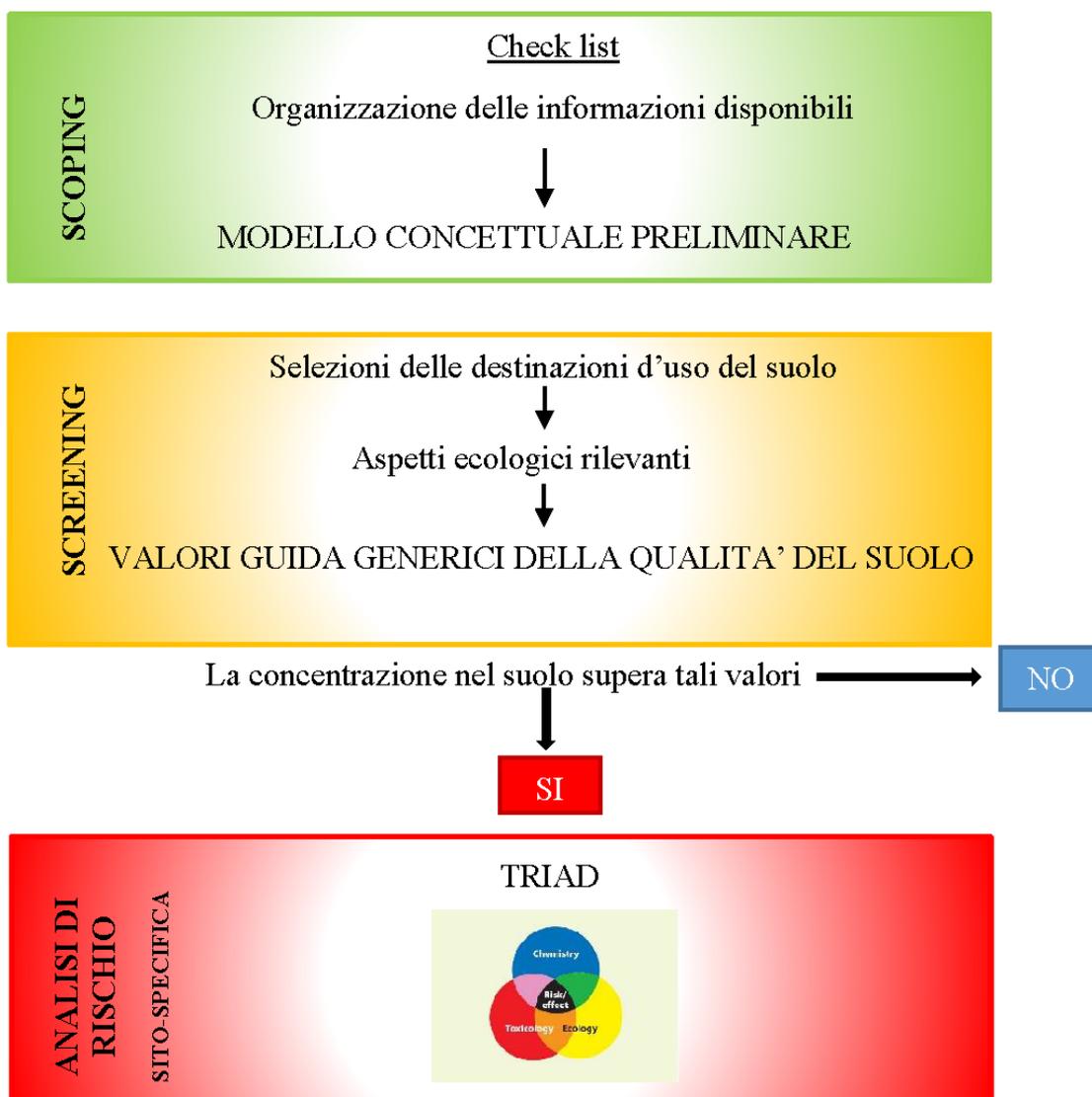


Figura 1-4: schema per analisi del rischio ecologico dei siti contaminati. Da (ANPA, 2002), modificato.

Nel 2002 l'Agencia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA) ha proposto lo schema riassunto in figura 1-4. La metodologia può essere applicata nelle diverse fasi di valutazioni previste: al momento della caratterizzazione per la stima del rischio ecologico, durante la progettazione degli interventi per la stima degli obiettivi di qualità ecologica, in funzione della destinazione d'uso del sito in seguito a bonifica o, ancora, per condurre la fase di monitoraggio ecologico prima e dopo l'intervento di risanamento.

Lo schema si articola in tre livelli:

1. Scoping: si procede con la compilazione di apposite *check-list*, in modo da giungere ad una preliminare descrizione dell'ecosistema in esame. In tale fase sarà formulato il modello concettuale preliminare attraverso cui saranno selezionati criteri e valori ecologici che si ripercorreranno nelle fasi successive.

Qualora nella fase successiva non fosse evidenziato un rischio potenziale, in tale fase è possibile individuare peculiarità del sito non contemplate nell'approccio generici, che possono suggerire un approfondimento sito-specifico (fase 3).

2. Screening: si definiscono le potenzialità di rischio del sito in oggetto in base alla sua destinazione d'uso e si evidenzia eventualmente la necessità di condurre la successiva fase di approfondimento. Ad ogni funzionalità vengono associati specifici criteri ecologici e valori ambientali da proteggere. Per ogni assessment endpoint devono essere determinati (mediante ricerca bibliografica o dati sperimentali) i parametri ecotossicologici di interesse (NOEC, LOEC, EC_x, LC_x etc.)¹⁹ su cui verranno calcolati i PNEC (*Predicted Not Effect Concentration*)²⁰, che confrontati con le concentrazioni al suolo permetteranno di evidenziare la necessità di condurre un'ERA sito-specifica.

¹⁹ NOEC: *No-Observed Effect Concentration*, ovvero la concentrazione maggiore alla quale non si è manifestato alcun effetto. A partire da questo parametro è possibile registrare una serie di effetti provocati dalla sostanza chimica.

LOEC: *Lowest Observed Effect Concentration*, indica la concentrazione più bassa di una sostanza tale per cui sono rilevati, in seguito a test di tossicità, effetti statisticamente significativi sui bersagli esposti.

EC_x: *Effective Concentration*, è la quantità di sostanza alla quale corrisponde un effetto che si manifesta, in percentuale della popolazione sperimentale esposta, in un numero di casi pari al numero indicato. Ad esempio, spesso si utilizza l'ED50, ossia la dose che produce un effetto diverso dalla morte (come immobilizzazione), in saggi sia acuti che cronici, misurabile sul 50% della popolazione degli organismi analizzati.

LC_x: *Lethal Concentration* rappresenta la concentrazione che determina la morte per una certa percentuale di individui indicata. Ad esempio, LC50 indica la concentrazione che causa la morte nel 50% degli individui della popolazione in saggi di tossicità acuta per esposizione ambientale.

²⁰ PNEC: *Predicted No Effect Concentration*, ossia la concentrazione di una sostanza per la quale si stima che non derivino effetti indesiderati sugli organismi o sull'ecosistema. La PNEC viene calcolata mediante la seguente formula $PNEC = \frac{\text{valore più basso di LC50 (o EC50, NOEC, LOEC)}}{\text{fattore di sicurezza}}$, dove per fattore di sicurezza s'intende un valore adimensionale (come 10, 100, 1000) che riflette il grado di incertezza nell'estrapolazione dei dati ecotossicologici rappresentativi per la protezione dell'ambiente a partire da test di laboratorio per un numero limitato di specie.

3. Approfondimento sito-specifico: in quest'ultima fase, per ognuno degli assessment endpoint selezionati nelle fasi precedenti, dovranno essere individuati gli attributi misurabili ed i test ecotossicologici (*bioassay*) necessari per una caratterizzazione

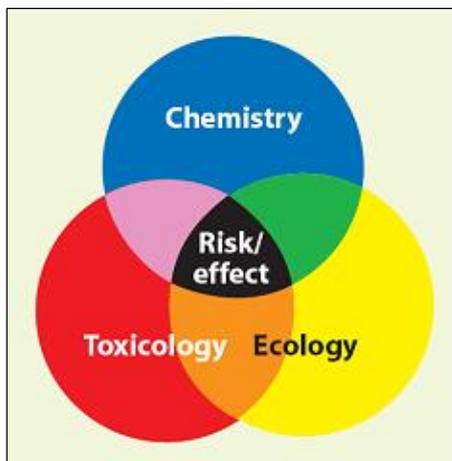


Figura 1-5: rappresentazione schematica dei campi del TRIAD.

degli effetti.

Le linee guida dell'ANPA propongono di seguire il modello denominato *TRIAD* (figura 1-5), specificatamente dedicato all'analisi ecotossicologica dei sedimenti. Secondo Chapman è difficile stabilire le relazioni di causa-effetto che risultano dall'insieme degli inquinanti presenti nei sedimenti. Tuttavia, tali rapporti devono tenere in considerazione la biodisponibilità dei composti investigati e così può essere indagata

un'eventuale corrispondenza tra la sostanza stessa e gli effetti biologici; in particolare tale corrispondenza è basata su misure sintetiche e implica una valutazione *Quality Triad*. In altre parole, è necessario un approccio multidisciplinare, un processo di valutazione della qualità dell'ambiente attraverso tre tipologie di analisi (Chimica, Ecologica e Tossicologica), anche dette linee di evidenza.²¹ Queste analisi possono essere condotte a diversi livelli fino a che il grado di conoscenze raggiunte non risulta accettabile (Chapman, 1990). Con il passare del tempo, questa procedura è stata via via ritenuta incompleta, principalmente perché gli effetti deleteri su una popolazione sono spesso difficili da indentificare poiché si manifestano nel lungo periodo. L'approccio TRIAD avanzato prevede di sviluppare la linea tossicologica in ulteriori sotto-linee: *bioassay* e *biomarker*.

²¹ Vie indipendenti per arrivare ad una conclusione per fornire un'evidenza più forte. Questo approccio è stato applicato per la prima volta sui sedimenti e poi per altre matrici.

1.3 L'analisi del rischio per i beni culturali

Precedentemente abbiamo definito il rischio come la probabilità che si verifichi un effetto avverso causato da un danno di magnitudo nota sui bersagli di interesse. Se ipotizziamo che nell'ambito della conservazione dei beni culturali l'effetto avverso possa essere il degrado e i bersagli di interesse le opere d'arte, i manufatti e gli oggetti tutti, allora, in queste condizioni, abbiamo introdotto il contesto nel quale s'inserisce questa ricerca. Come già detto, il concetto di rischio può essere connesso a molteplici situazioni, alcune meno e altre più discusse. Pertanto, se ai beni culturali è associato il concetto di degrado non ci sorprende che l'analisi del rischio per i beni culturali, in letteratura e in diverse organizzazioni nazionali ed internazionali, sia stata affrontata più volte. Prima di passare, però, alla descrizione di queste metodologie, può essere utile soffermarci sull'idea della conservazione preventiva, che arricchisce l'analisi di rischio di una componente pratica, oltre che scientifica. Recentemente si è posto l'accento sul fatto che azioni di carattere preventivo, come la tutela, provvedimenti sull'oggetto considerato e sul suo contesto climatico, ambientale, rimozione dei pericoli etc. evitino interventi di maggiore ampiezza e riducano il rischio di danneggiamento, prima che una situazione di pericolo si verifichi (Lorusso et al., 2014). La conservazione preventiva assume così un ruolo fondamentale nella gestione e nella programmazione delle strategie, sempre che si riesca ad intervenire sulle cause del danno piuttosto che sui loro effetti. Sulla base dei risultati dell'analisi del rischio è fondamentale che, dalla gestione dei beni sotto osservazione, come accade per il rischio ecologico e sanitario, risulti il modo migliore per impiegare al meglio le risorse umane ed economiche a disposizione, per stabilire le migliori politiche di salvaguardia possibile dei beni di interesse. Già nel 1998, l'ICCROM (International center for the study of the preservation and restaration of cultural property) invita, con la pubblicazione del manuale *Risk Preparedness*, a valutare l'importanza dell'approccio preventivo nel campo della conservazione: "L'analisi e la mitigazione del rischio garantiscono l'uso migliore di scarse risorse, e le condizioni ottimali per estendere la vita dei beni culturali. In più, uno schema di patrimonio culturale e rischio offre a coloro che si occupano della conservazione [...] la possibilità di radicare completamente i loro sforzi nel problema della prevenzione, per la prima volta nella storia del movimento" (Luxen, 1998). In passato, la preoccupazione maggiore per i responsabili della conservazione nei musei, ad esempio, legavano il concetto di "perdita di bene culturale" ad episodi come incendi, furti, danni di guerra o disastri naturali. Oggi, questa accezione deve comprendere la probabilità di perdite intese nel senso più generale, che includono, ad esempio: il danno causato da temperatura, umidità, insetti, inquinanti, luce etc.

L'esperienza del risk management delle collezioni ha mostrato che un intervallo temporale tipico per valutare i rischi sia quello dei 100 anni. L'abilità nella gestione del rischio è quella di essere in grado di identificare tutte le possibili ragioni per cui le collezioni potrebbero essere in condizioni peggiori in un arco temporale futuro di 100 anni (Lorusso et al., 2014). Un'analisi di rischio completa per i beni culturali considera 10 agenti di deterioramento (Costain, 1994):

1. Forze fisiche dirette: sia improvvise che graduali, sia a lungo che a breve termine. Danni dovuti a queste forzanti sono, ad esempio, riconducibili ad improprie procedure di maneggiamento.
2. Ladri e vandali
3. Dislocazione
4. Fuoco
5. Acqua
6. Parassiti
7. Contaminanti
8. Illuminazione
9. Temperatura
10. Umidità Relativa

Da questi presupposti nasce l'esigenza di osservare le condizioni microclimatiche.

1.3.1 Le diverse metodologie per l'analisi del rischio per i beni culturali

Sul panorama internazionale sono state proposte diverse metodologie di analisi del rischio applicata ai beni culturali. In questa sezione saranno descritte sinteticamente alcune di queste procedure, per offrire una visione di insieme prima di sviluppare la proposta metodologica. Innanzitutto, è opportuno riportare quanto stabilito nell'Ambito V (Sicurezza del Museo) dell' "Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei" – approfondito in seguito, per definire l'analisi di rischio: "Fermi restando i requisiti essenziali e gli obiettivi da soddisfare, è necessario allora fare ricorso ad un moderno approccio che commisuri di volta in volta la strategia di sicurezza alle specifiche realtà [...]" (MiBACT, 2001). Lo stesso decreto sottolinea come, nel settore dei beni culturali, sia fondamentale l'utilizzo di impianti tecnologici e sistemi di protezione, unitamente alle azioni intraprese dagli addetti in ogni momento.

In questo caso, quindi, una compiuta analisi del rischio (figura 1-6) prevede le seguenti fasi:

- individuazione e analisi dei "pericoli" e delle "azioni"
- individuazione e analisi delle corrispondenti vulnerabilità

- individuazione e analisi dei fattori di esposizione a ciascun pericolo
- valutazione dei rischi
- “compensazione” dei rischi
- “valutazione” dei rischi residui;
- individuazione degli eventi e dei relativi scenari connessi con i rischi residui;
- mitigazione degli eventi connessi con i rischi residui: sistemi di protezione attiva;
- pianificazione e la gestione delle emergenze;
- interventi correttivi della strategia

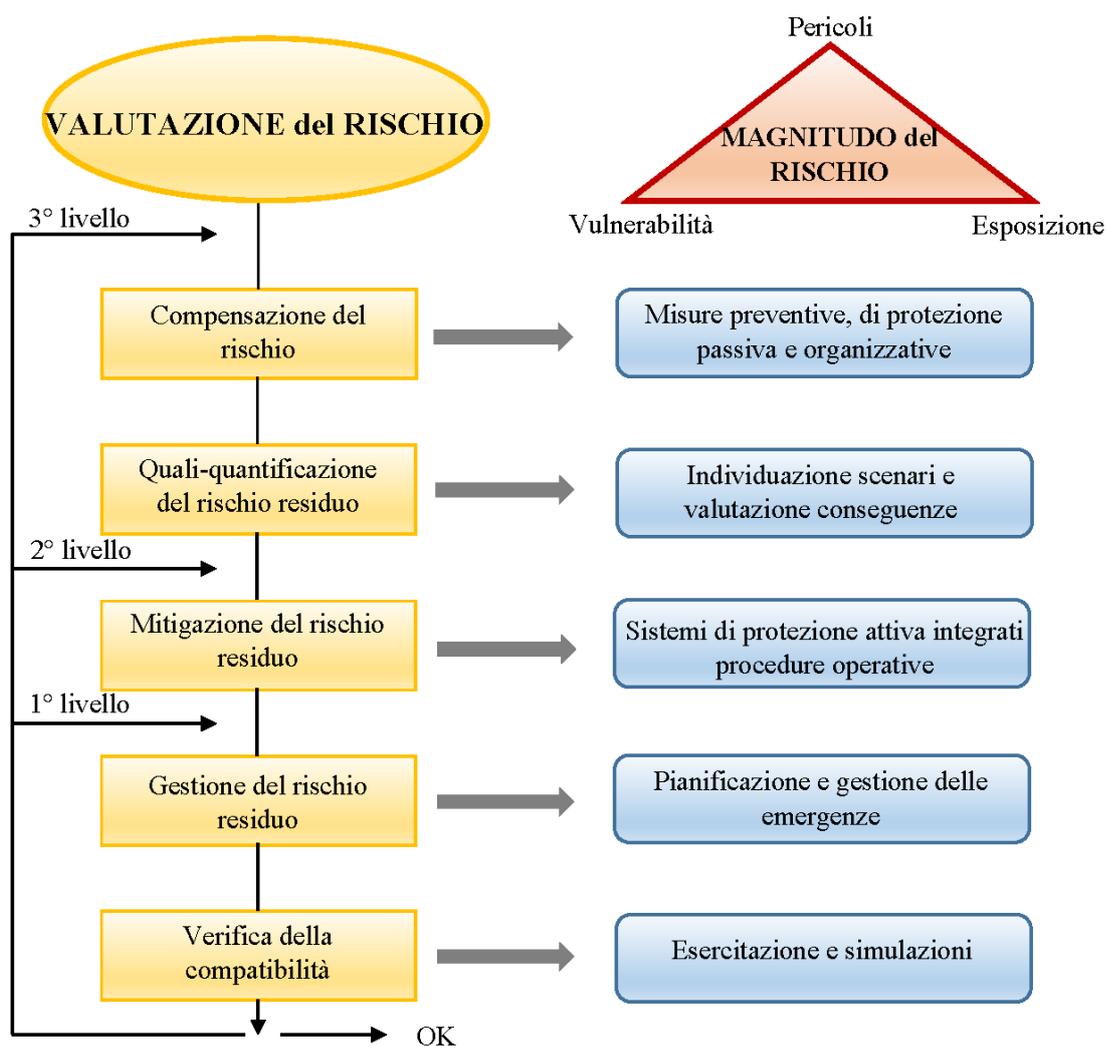


Figura 1-6: schema di analisi del rischio schema dell'analisi del rischio proposto dal (MiBACT, 2001).

Le procedure di valutazione di un progetto di sicurezza sono fondate su diverse tipologie di azioni, che valutino, di volta in volta, l'adempimento (primo livello) e l'efficacia (secondo livello).

Il ciclo del risk management per le collezioni, secondo *l'Australian-New Zeland Standard*, prevede invece l'applicazione dello schema riportato in figura 1-7 (AS/NZS ISO31000, 2009):

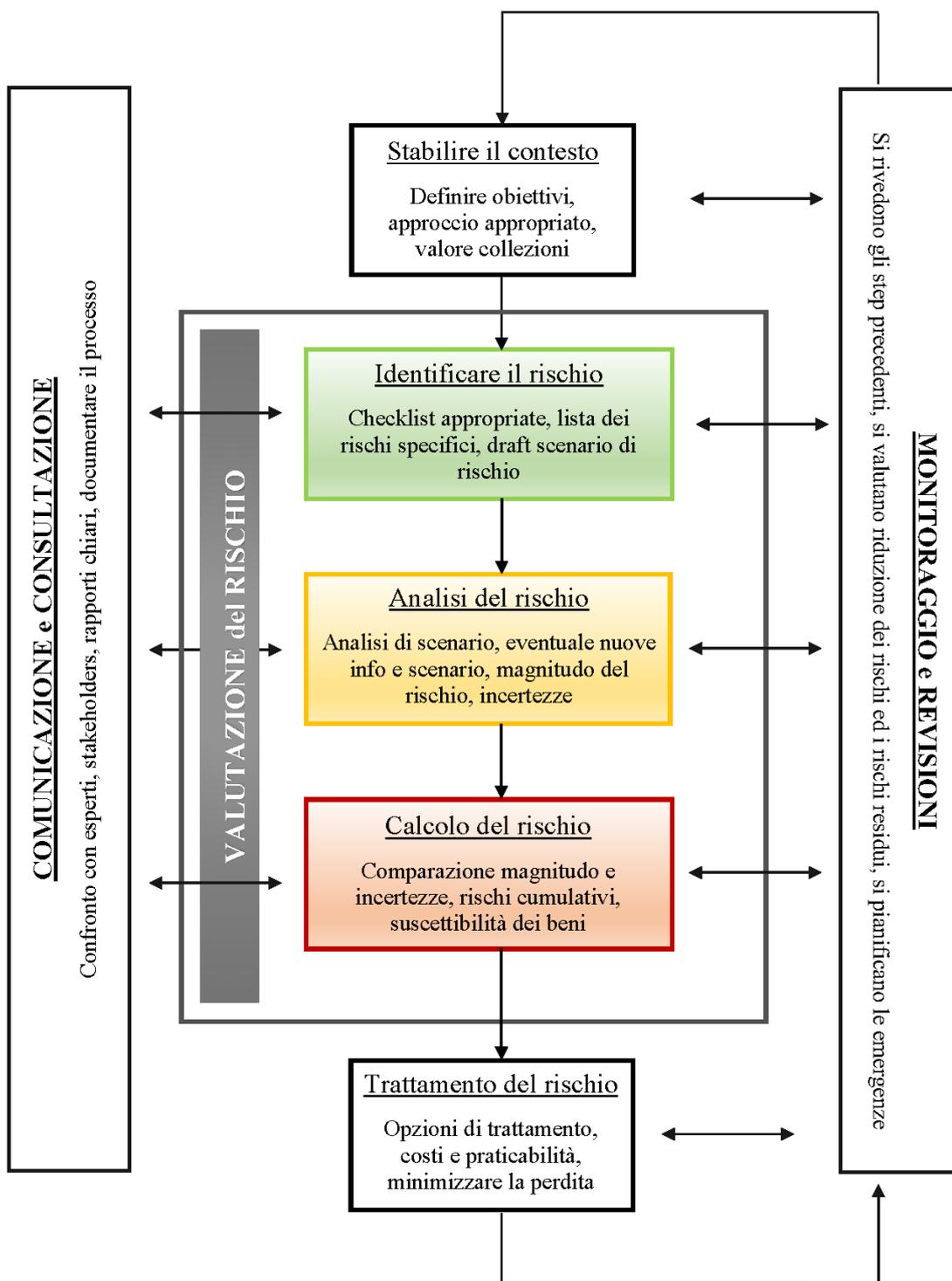


Figura 1-7: schema del Risk Management proposto dalla AS/NZS ISO 31000:2009. Da (AS/NZS ISO31000, 2009).

Queste sette fasi, descritte schematicamente in figura 1-7, costituiscono un modo per approcciare la gestione del rischio per i beni culturali, al fine di assicurare una conservazione preventiva. Come appare chiaro dallo schema, uno dei primi obiettivi è fornire una rappresentazione formale della probabilità che un danno che possa verificarsi nel sistema, con relative informazioni per una verifica delle scelte intraprese per il raggiungimento degli

obiettivi preposti. La metodologia CCI-ICCROM-ICN²², per la prevenzione e la gestione dei rischi nei musei, è stata elaborata sul processo degli standard per la gestione dei rischi AS/NZS ISO 31000:2009 (figura 1-7), per cui occorre seguire sette fasi:

- Cinque fasi:
 - Stabilire il contesto: per prima cosa bisogna stabilire una relazione con la direzione del museo, biblioteca etc. per definire lo scopo dell'analisi e la motivazione principale. Risulterà così definito un ambito di applicazione, entro i cui confini sarà effettuata l'analisi del rischio. Affinché si ottengano gli obiettivi prefissati è fondamentale conoscere il contesto di analisi.
 - Identificare il rischio: è necessario considerare tutti i possibili rischi che colpiranno gli oggetti di interesse. È possibile, in questo caso, fare riferimento alla classificazione dei possibili rischi sviluppata da Costain (1994).
 - Analizzare il rischio
 - Valutare il rischio: in maniera integrata vengono presi in considerazione i rischi calcolati e le decisioni gestionali intraprese e/o da intraprendere, in funzione degli aspetti finanziari, normativi e sociali.
 - Trattare il rischio: sono elaborati interventi volti a ridurre la magnitudo dei rischi individuati, sulla base anche di una valutazione costi e benefici per ciascuna azione da parte della struttura interessata.
- Due fasi, che accompagnano tutto il processo, in modo tale da garantire la migliore reperibilità e qualità dei dati, sono:
 - Comunicare e consultare
 - Monitorare e controllare

In queste fasi, l'analisi (fase 3) rappresenta uno step decisivo che consente di quantificare la magnitudo di ogni rischio individuato. Ogni rischio viene quantificato sulla base di tre componenti, o scale di valutazione del rischio:

- A. frequenza
- B. perdita di valore per ciascun oggetto
- C. perdita di valore per tutti gli oggetti

La frequenza si riferisce al periodo in cui un determinato stato si è verificato ed alla sua velocità. Per ottenere questi dati è necessario raccogliere molteplici informazioni, sia dirette,

²² La metodologia è stata sviluppata da tre associazioni da cui l'acronimo CCI-ICCROM.ICN:

CCI: Canadian Conservation Institute; ICCROM: International center for the study of the preservation and restaration of cultural property; ICN: Netherlands Institute for Cultural Heritage.

sia indirette. Le altre due scale sono, invece, riferite alle conseguenze che possono essere generate dagli stati. Sarà quindi necessario prendere in considerazione i processi di deterioramento che hanno o avranno luogo.

Per ciascuna di queste scale viene assegnato un punteggio, con la possibilità di aggiornarlo quando necessario. La somma di questi punteggi definisce lo scenario, in continuo aggiornamento, quindi, con le nuove informazioni, man mano che si procede con l'analisi. La somma delle tre scale, in particolare, fornisce la magnitudo della scala del rischio, il che consente di ottenere un punteggio con priorità di azione.

Secondo quanto riportato dal suddetto Atto di Indirizzo è necessario tener conto, oltre ai pericoli (hazard tecnologici e azioni naturali e antropiche), anche della vulnerabilità e dell'esposizione dei bersagli di interesse. Il concetto probabilistico del rischio è legato, come detto in precedenza, ai concetti fisici di vulnerabilità ed esposizione: dalla loro integrazione è possibile ricavare il rischio assoluto del sistema analizzato e, in base a ciò, procedere con azioni ed interventi atti a minimizzarlo.

Gli indici di attenzione e rischio per i beni archivistico-librari, invece, più in particolare, prevedono l'acquisizione e l'elaborazione di molteplici dati relativamente alla distribuzione e consistenza del patrimonio culturale, al livello di aggressività dei fattori macro e micro ambientali ed alle condizioni di vulnerabilità del bene (Lorusso et al., 2014). In sostanza, i fenomeni di pericolosità che coinvolgono l'ambiente di conservazione possono riguardare diversi fattori:

- situazione al contorno: tipologia, storia, localizzazione e contestualizzazione dell'edificio adibito alla conservazione; a tal proposito vengono presi in considerazione anche quei fenomeni che minano la sicurezza e la stabilità degli edifici come sismi, frane, esondazioni, dinamica dei litorali, subsidenza etc.
- pericolosità ambiente-aria: parametri che possono influenzare l'ambiente di conservazione. In particolare le grandezze fisiche che devono essere valutate sono: la temperatura, l'umidità, l'illuminazione e la qualità dell'aria. Queste variabili devono essere valutate non solo in un dato istante, ma, ciò sui cui si deve focalizzare particolare attenzione, sono i loro gradienti giornalieri, settimanali, stagionali. A ciascuno di questi parametri viene associato un indice di pericolosità.
- pericolosità antropica: è impossibile pensare al bene culturale come ad un qualcosa che prescindere dalla fruizione dello stesso. In questo step, quindi, sono valutate le possibili azioni che possono provocare danni al sistema considerato dalla densità dell'utenza, alla modalità di fruizione fino ad arrivare al furto.

A questo punto, dopo aver elaborato gli indici, occorre integrare le caratteristiche di vulnerabilità di ogni bene. La funzione che associa la pericolosità alla vulnerabilità dipende da un serie di fattori, come le diverse modalità di produzione della carta nel corso dei secoli e le differenti sostanze e materiali impiegati.

Infine, le diverse metodologie, qui descritte in sintesi, scandiscono le azioni da intraprendere per condurre un'analisi di rischio relativamente ai beni culturali, con particolare riferimento ai beni librari. Sebbene si differenzino per alcuni aspetti, tutte forniscono un approccio scientifico per lo sviluppo di un analisi del rischio. Non solo ma, in ogni metodologia, è possibile riconoscere che l'analisi deve essere valutata sulla base di una triade di parametri da cui deriva il rischio: ovvero quelli che definiscono le condizioni microclimatiche in cui sono immersi gli oggetti, le caratteristiche e le suscettibilità dell'edificio nel contesto in cui è localizzato, nonché gli interventi dell'uomo e dei contaminanti biologici.

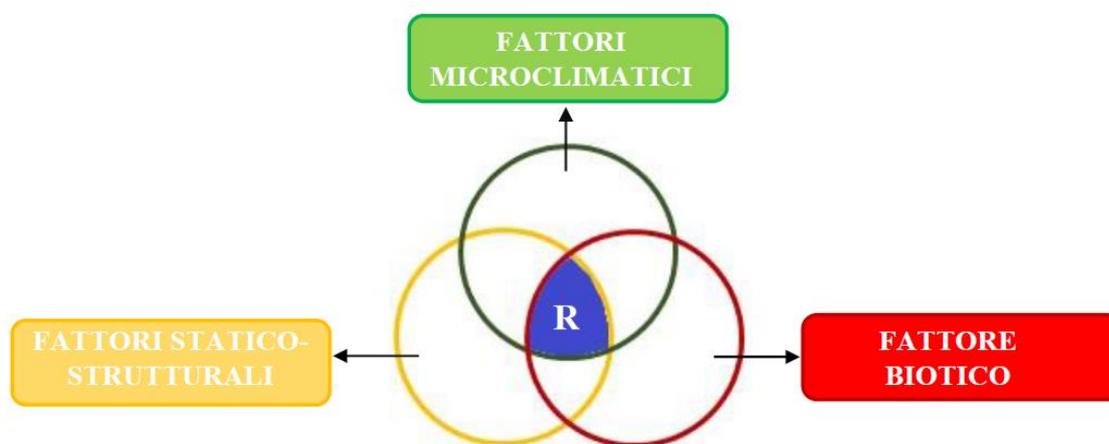


Figura 1-8: fattori presi in considerazione nelle procedure di analisi di rischio riportate.

1.4 Il microclima per i beni culturali

Il termine “microclima”, così come altre espressioni ricorrenti nella vita quotidiana, ad esempio ‘macroclima’, ‘mesoclima’, ‘nanoclima’, ‘picoclima’ sono spesso utilizzate con diverse accezioni, sebbene risulti evidente che tutte concorrono a definire il clima di una specifica area. Talvolta, i prefissi utilizzati possono creare dubbi sui loro significati, alcuni di questi appartengono al Sistema Internazionale, pertanto potremmo dedurre che parlando di micro-clima ci aggiriamo su ordini di grandezza di $10^{-6} \text{ m} = 1 \text{ mm}$, commettendo però un errore di interpretazione. In realtà, il prefisso può variare sia in virtù della dimensione dell'area analizzata, sia in relazione allo specifico interesse e alle relative applicazioni di studio.

Per poter comprendere al meglio questo concetto, potrebbe essere utile dapprima definire cosa s'intende per clima, ovvero 'la sintesi, giorno per giorno, delle condizioni meteorologiche in una data area', oppure 'descrizione statistica delle condizioni meteorologiche e atmosferiche come mostrato da modelli di tali condizioni, in una data regione, su un periodo temporale abbastanza lungo da poter essere rappresentativo', o, ancora, 'aggregato variabile delle condizioni atmosferiche definite dagli stati e dagli sviluppi del meteo in una data area' (Maunder, 1994).

Solitamente, a meno di ulteriori qualificazioni, quando si parla di microclima, s'intende la struttura dello spazio aereo che si estende dalla superficie terrestre fino ad un'altezza in cui gli effetti dovuti alle caratteristiche della superficie sottostante non possono essere distinti dal clima locale generale (meso o macroclima). Il microclima, così definito, può dunque essere suddiviso in differenti classi a seconda della tipologia di superficie sottostante: microclima urbano influenzato da edifici, inquinamento atmosferico, densità abitativa etc.; microclima vegetazionale, legato alla complessa natura dello spazio aereo occupato dalla vegetazione ed i suoi effetti sulla vegetazione stessa; il microclima degli spazi confinati, come cave, grotte, case e luoghi di lavoro (Maunder, 1994).

Prima di comprendere il motivo per il quale il mondo scientifico, dal settore ambientale e della conservazione dei beni culturali a quello ingegneristico, medico o ecologico, pone sempre più attenzione a questa tematica è doveroso ricordare che, a partire dall'aprile del 2008 con il D.Lgs. n. 81 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro, è diventato cogente interrogarsi e studiare il microclima e le condizioni microclimatiche.

In passato, nel campo della conservazione dei beni culturali, l'importanza del microclima di un ambiente confinato è stata sottolineato in numerosi studi (Benoist, 1960) (Camuffo, 1981) (De Guichen, 1984) (Michalski, 1993) (Padfield, 1994) (Camuffo e Bernardi, 1995).

In questo contesto, il concetto di microclima non implica una precisa dimensione dell'area, ma focalizza l'attenzione su un bene culturale, un artefatto, come ad esempio un edificio storico, una statua e il suo intorno. In sostanza, per microclima s'intende l'ambiente nella sua totalità che deve essere studiato per conoscere i fattori che hanno un'influenza diretta sullo stato fisico del bene e le interazioni con l'aria e gli oggetti circostanti (Camuffo, 1998). Attenendoci alla definizione di clima, è possibile definire il microclima come la sintesi delle condizioni fisiche ambientali (distribuzione nel tempo e nello spazio, trend e valori variabili, medie e valori estremi, gradienti spaziali e frequenza di oscillazioni) dovute a più variabili atmosferiche (come la temperatura, l'umidità, l'irraggiamento solare, la velocità dell'aria) o a scambi di materia ed energia con altri corpi (attraverso emissione infrarossa, calore,

illuminazione, ventilazione) per un periodo di tempo rappresentativo di tutte le condizioni determinate sia da fattori naturali, sia antropici (Camuffo, 1998).

Sebbene, in teoria, gli ambienti interni ed esterni siano considerati molto distinti tra loro, in pratica, presentano problemi simili: entrambi sono sottoposti a cicli giornalieri di temperatura e umidità, siano essi dovuti al naturale ciclo solare o a riscaldamento, ventilazione, prodotti da sistemi di aria condizionata; entrambi sono esposti a radiazioni ad onde corte dovute all'irraggiamento solare diretto o alla luce artificiale; entrambi sono influenzati da movimenti avvevativi di aria, turbolenza generata da sorgenti di quantità di moto (come spostamento di persone, fonti di calore etc.); anche la pioggia, considerata tipica dell'ambiente esterno, si rinviene in ambienti interni in diversi modi (condensa sulle finestre, su superfici particolarmente fredde, all'interno di pori etc.); inquinanti gassosi possono essere rilevati in entrambi gli ambienti, sebbene a concentrazioni diverse. E' chiaro quindi come simili problemi possono coinvolgere gli ambienti esterni e quelli interni. La distinzione fondamentale però, consiste nel fatto che il microclima interno può essere controllato, almeno in linea teorica, anche con semplici azioni, motivo per cui è necessario conoscerlo approfonditamente.

Un'indagine microclimatica viene realizzata non solo al fine di studiare il naturale microclima interno-esterno ma anche, spesse volte, per comprendere se il microclima dell'ambiente confinato è adatto al fine dell'ambiente stesso, cioè, nel nostro caso, se risulta adatto alla conservazione delle opere d'arte e librerie (Thomson, 1986).

Studiare il microclima significa perciò analizzare l'ambiente che circonda un'opera d'arte, in tutti i suoi momenti, sia nella naturale evoluzione temporale (giorno-notte, stagioni etc.), sia in presenza di forzanti esterne (condizionamento, illuminazione, aperture di porte o finestre, pulizie, visitatori etc.). Ciò al fine di intervenire per ottimizzare le condizioni ambientali, cercando di arrivare ad un'auspicabile stabilità in ogni luogo che contenga beni culturali di qualsiasi genere.

Bisogna innanzitutto considerare che ogni opera d'arte è inserita in un ambiente con il quale interagisce costantemente; studiandone il microclima e controllandolo è possibile analizzare l'ambiente in termini di stress prodotti sul bene, sia da fattori fisici (come temperatura, umidità, radiazione) che chimici (come CO₂, SO₂, O₃ etc.). Il microclima svolge un'azione continua e i suoi effetti, solitamente, appaiono nel lungo periodo, poiché sono causati dalla successione di fasi caratteristiche del sistema, come l'alternarsi del giorno e della notte e la sequenza delle stagioni (Vuerich et al., 2008). Ogni oggetto è influenzato dall'ambiente che lo circonda, in termini di stress prodotti da fattori fisici e, in senso più generale, dal microclima risultante dalla sinergia di tutti questi fattori. Così gli stati non adeguati o

cambiamenti repentini possono comportare azioni dirette sulla superficie a causa di stress termici, radiativi o igrometrici, sia attraverso eventi di evaporazione e condensazione, sia mediante fenomeni fisici e chimici più complessi, come l'avvio di reazioni chimiche dovuto all'eccessiva radiazione solare incidente. Se da un lato, l'azione costante del microclima locale conduce ad un deterioramento nel lungo periodo, dall'altro, un suo repentino cambiamento (modifiche delle precipitazioni, del regime di venti, massimi e minimi di temperatura etc.) provoca effetti su scale temporali molto più brevi (Cacace et al., 2003). Per poter garantire la conservazione bisogna fare in modo che l'ambiente sia o diventi idoneo al fine per il quale è stato predisposto.

A questo punto, un'altra questione fondamentale per la stima o interpretazione della situazione microclimatica riguarda la fruibilità di dati presi da una tipica stazione meteorologica, situata a pochi km (o anche meno) dal bene oggetto di studio. Abbiamo già detto che fenomeni analoghi hanno luogo sia in ambienti outdoor che indoor; risulta chiaro, quindi, che l'acquisizione dei dati esistenti, provenienti da stazioni meteo, può risultare utile per una più completa valutazione dei fenomeni in atto, ma solitamente le stazioni meteorologiche operano con criteri di misura e metodologie diverse, in modo che alcune di queste possono risultare utili al cospetto di altre che mostrano scarsa rilevanza per il nostro scopo. Inoltre diversi parametri fondamentali per la scienza della conservazione non sono rilevati dalle tipiche stazioni meteo e, per questa ragione, sono indispensabili indagini sul campo. Come sottolineato da Camuffo (1998), è più appropriato registrare l'insieme di dati funzionali ad uno studio specifico utilizzando gli stessi criteri e lo stesso sistema di acquisizione, per poi aggiungere o confrontare ulteriori osservazioni, se disponibili. Nel campo della conservazione, o più in generale per altri fini ambientali, l'apparato strumentale nonché le metodologie operative sono specificatamente pensate per adattarsi al problema in esame. Risulta così evidente che i dati meteorologici, il più delle volte, si rivelano poco utili dal momento che le misure potrebbero essere state acquisite al fine di raggiungere scopi diversi: gli strumenti e le metodologie sono designati per specifici problemi (Houghton, 1985). D'altra parte, è evidente che le stazioni meteorologiche sono progettate e standardizzate per misure al fine di soddisfare quanto richiesto da protocolli internazionali, in modo che tutti i dati siano confrontabili tra loro. Per di più, la posizione della stazione potrebbe verosimilmente risultare poco rappresentativa dell'area esaminata.

Ad ogni modo, è assolutamente riduttivo considerare le singole variabili, quelle interne ed esterne, separatamente, omettendo possibili relazioni e feed-back. Essendo il microclima il risultato della complessa interazione di più fattori, non è sempre possibile una corretta

interpretazione di ciò che sta accadendo, men che meno una previsione di quello che accadrà (Camuffo, 1998).

Lo studio e il controllo del microclima per la conservazione del patrimonio culturale ha bisogno di particolare cura, a causa dell'enorme varietà di opere d'arte esposte nei musei, archivi, biblioteche etc. e dei diversi materiali che le compongono, dalla pietra, al marmo, dal legno ai tessuti, dai metalli alla carta. Tale analisi diviene, infatti, tanto più importante quanto più le opere d'arte stesse sono costituite da materiali compositi e/o sensibili alle variazioni termoigrometriche: le varie parti che costituiscono un oggetto possono essere influenzate diversamente dai parametri microclimatici, sia da un punto di vista spaziale che temporale (Corgnati et al., 2009).

Fin dall'età imperiale, il clima locale è stato sapientemente osservato e valorizzato per adeguare gli edifici e le attività all'ambiente esterno, al fine di beneficiare di un naturale microclima. Plinio²³ (*Epistularum libri*, II, 17, 17-19)²⁴, Vitruvio²⁵ (*De Architectura*, VI, 4, 1-2) e Palladio²⁶ (*Quattro libri dell'Architettura*, Libro II, cap. XII) descrivono come un edificio veniva costruito in relazione alla sua esposizione al sole, al vento e alle

²³ Gaio Plinio Cecilio Secondo (Como, 61 o 62 – 113 o 114), conosciuto come Plinio il Giovane.

²⁴ [17] Teporem solis infusi repercussu cryptoporticus auget, quae, ut tenet solem, sic aquilonem inhihet summovetque, quantumque calor ante, tantum retro frigoris. Similiter Africum sistit atque ita diversissimos ventos alium alio latere frangit et finit. Haec iucunditas eius hieme, maior aestate. [18] Nam ante meridiem xystum, post meridiem gestationis hortique proximam partem umbra sua temperat, quae, ut dies crevit decrevit, modo brevior modo longior hac vel illa cadit. Ipsa vero cryptoporticus tum maxime caret sole, cum ardentissimus culmini eius insistit. Ad hoc patentibus fenestris favonios accipit transmittitque nec umquam aere pigro et manente ingravescit.

[17] la galleria, mediante il riverbero del sole che la inonda, accresce il tepore e, mentre trattiene il sole, contemporaneamente impedisce l'accesso alla tramontana e la respinge, di modo che ha tanto calore davanti quanto fresco dietro. Analogamente essa arresta il libeccio e così rompe e doma i due venti più contrastanti, l'uno su un fianco, l'altro sull'altro. Ecco come essa è attraente d'inverno, ma lo è ancora più nell'estate. [18] Infatti nella mattinata con la sua ombra smorza la calura sulla terrazza, ne pomeriggio la smorza nella parte più vicina del viale per le lettighe e del giardino: l'ombra, a seconda che il giorno sale al suo culmine o vi decresce, si proietta ora più breve ed ora più lunga da una parte o dall'altra. La galleria in sé stessa si protegge massimamente dal sole nel momento in cui esso, più ardente che mai, si trova a picco sulla sua volta. Per di più, attraverso le finestre aperte, essa lascia entrare ed uscire gli zefiri e così non ha mai quel greve sentore di chiuso che nasce dall'aria ferma e non rinnovata (Trisoglio 1973).

²⁵ Marco Vitruvio Pollione (80 a.C. circa – 15 a.C. circa) autore dell'unico testo, *De Architectura*, giunto integro, fondamento teorico dell'architettura occidentale.

²⁶ Andrea di Pietro della Gondola (Padova, 30 novembre 1508 – Maser, 19 agosto 1580), conosciuto come Andrea Palladio, architetto.

precipitazioni: ad esempio, le camere erano realizzate in funzione della temperatura e del tipo di luce che poteva entrare attraverso le finestre.

La tecnologia moderna però, induce a pensare che il clima esterno possa essere ignorato e che, al contempo, un microclima interno, indipendente, possa essere controllato a volere, principalmente attraverso la regolazione dell'umidità e della temperatura. Si viene così a costituire un ambiente con un microclima interno 'artificiale', il quale, il più delle volte, non è in equilibrio con le pareti, pavimenti, soffitti, oggetti esposti e necessita di frequenti trasferimenti di calore e umidità (Camuffo, 1998).

In passato, il controllo ambientale all'interno di luoghi istituzionali (biblioteche, archivi, musei etc.) è stato orientato (quando previsto) verso il "confort" dei visitatori e del personale. Tuttavia, la ricerca contemporanea dimostra che il controllo dei parametri ambientali in luoghi in cui sono ospitate opere d'arte dovrebbe basarsi anche, e specialmente, sulla conservazione dei materiali (Pavlogeorgatos, 2003).

Un qualsiasi oggetto esposto, essendo 'testimonianza materiale' della crescita culturale e civile dell'uomo per le future generazioni, dovrebbe trovarsi in condizioni ottimali e conservarsi immutato nel tempo. In realtà, come per gli esseri viventi, anche per le opere d'arte, i manufatti, i reperti e tutti gli oggetti si attivano processi chimico-fisici, spesso irreversibili, che inducono un naturale deterioramento, nel tempo, per quanto lento sia: le pitture sbiadiscono, la carta e il legno si dilatano e/o contraggono, i metalli si corrodono e così via.

È evidente come l'alterazione dello stato originario sia in stretta relazione con la tipologia dei materiali che costituiscono l'oggetto e con le condizioni termoigrometriche e di qualità dell'aria presenti negli ambienti di conservazione.

È opportuno sottolineare, inoltre, che gli oggetti possono anche adattarsi nel tempo a condizioni microclimatiche non ottimali; in tal caso, per evitare di sottoporre gli oggetti stessi ad ulteriori rischi, potrebbe risultare più appropriata una gestione che mantenga inalterate queste condizioni piuttosto che realizzare un ambiente di conservazione con condizioni teoricamente ottimali. Per questo ed altri motivi è necessaria una valutazione dei responsabili ed esperti della conservazione degli oggetti in questione al fine di contenere i processi di degrado in atto (UNI10829, 1999).

1.4.1 Il ruolo dei parametri termoigrometrici

In diversi ambiti, da quello ambientale a quello ingegneristico, è ormai prassi definire condizioni di benessere e/o ottimali in termini di intervalli di temperatura e umidità. In particolare nel campo dei beni culturali, il raggiungimento e la persistenza di valori di

temperatura e umidità che si discostano dall'intervallo ottimale per il singolo oggetto o materiale producono danni sul lungo periodo. Tuttavia, come anticipato in precedenza, è fondamentale tener presente che brusche variazioni o fluttuazioni di breve periodo, nell'ordine di giorni se non delle ore, possono indurre variazioni, anche irreversibili. Partendo dal presupposto che qualsiasi oggetto si adatti all'ambiente circostante entrando con esso in equilibrio, il rischio maggiore per la conservazione deriva proprio dall'entità e dalla velocità dello spostamento da tale equilibrio, quindi dai gradienti spaziali e temporali dei parametri ambientali, accentuando e/o accelerando i processi di deterioramento in atto. Da quanto scritto finora si evince che un ruolo fondamentale nell'analisi del microclima per la conservazione dei beni culturali è svolto dai parametri termoigrometrici, ossia:

- Temperatura
- Umidità

Uno dei primissimi studi effettuati in quest'ambito, alla fine degli anni '80, in Italia, monitorava le condizioni ambientali della Cappella Sistina analizzandone l'evoluzione in diversi momenti significativi della giornata (Camuffo e Bernardi, 1986).

Rimandando la scelta dei campi di benessere ai diversi standard esistenti, è comunque buona norma tener presente alcuni principi fondamentali che mettono in relazione il degrado con i parametri termoigrometrici (Aghemo et al., 1996):

- Basse temperature di per sé non sono dannose per gli oggetti, mentre le alte possono esserlo favorendo processi degenerativi di carattere chimico;
- Variazioni temporali di temperatura dell'aria possono indurre nell'oggetto a contatto uno stress termico, provocando fenomeni di dilatazione e/o contrazione, la cui intensità varia a seconda dei materiali che lo compongono;
- L'umidità relativa influenza le variazioni di dimensione e di forma degli oggetti ed i processi chimici e biologici.
- Spesso i fenomeni risultanti possono essere visibili nell'immediato o solo successivamente per gli effetti riscontrati, identificabili come danni spesso non reversibili.

In tabella 1-2 sono riportate alcune categorie di oggetti e materiali raggruppati per classe di sensibilità in funzione dei parametri termoigrometrici:

Tabella 1-2 : sensibilità all'umidità relativa e alla temperatura di alcuni materiali costituenti oggetti museali. Da (Aghemo et al., 1996), modificata riportando alcune categorie di interesse.

Parametro	Oggetto/Materiale	Livello di sensibilità
Umidità relativa	Mobili intarsiati, dorati o laccati, strumenti musicali in legno, pitture su pannelli o sculture in legno, manoscritti illuminati (carta e pergamena), gessi.	<u>Estremo</u> alle variazioni di umidità relativa
	Tessili e costumi, pitture a olio su tela, opere d'arte e documenti su carta e pergamena, materiale di origine vegetale (corteccia, erba, papiro), oggetti in legno policromo, mobili in legno, oggetti ed abiti in cuoio e in pelle.	Necessitano di condizioni di umidità relativa <u>moderatamente stabili</u>
	Pietra, marmo, ceramica, vetro stabile, leghe d'argento e d'oro.	<u>Relativamente insensibili</u> alle variazioni di umidità relativa
	Ferro, acciaio, ottone, bronzo, rame e le sue leghe, bronzi archeologici, tessuti con elementi metallici, reperti mummificati.	Necessitano di <u>bassissimi valori</u> di umidità relativa
Temperatura dell'aria	Pellicce, pelli animali, reperti animali.	Necessitano di bassi valori di temperatura dell'aria

In conclusione, i parametri termoigrometrici risultano essere in stretta sinergia nella possibile minaccia all'integrità di un oggetto. Senza dubbio però, bisogna evidenziare che l'entità di un deterioramento indotto da un singolo o dalla combinazione di più parametri dipende soprattutto dalla natura dei materiali, dalla forma, dalla geometria e dalla "magnitudo del fattore di danno"²⁷ (concentrazione contaminante o scostamento dai valori ottimali di umidità e temperatura). Solitamente, è difficile attribuire le cause di un danno ad uno solo di questi parametri ma, può risultare utile per la trattazione del problema, analizzarli singolarmente.

²⁷ Il concetto di "magnitudo del danno" è riportato in maniera più dettagliata nel paragrafo 1.1.1 – Definizione generale di rischio.

1.4.1.1 Temperatura

Qualsiasi oggetto immerso in un ambiente più ampio a temperatura diversa tenderà a portarsi in equilibrio termico con esso, cedendo o assorbendo calore²⁸. Il trasferimento di calore può avvenire secondo tre meccanismi fisici: conduzione, convezione ed irraggiamento²⁹.

In generale, il flusso di calore H da e verso la superficie di un corpo è funzione del gradiente di temperatura fra il corpo in esame e l'ambiente circostante e può essere espresso come:

$$H = -K_H \frac{\delta T}{\delta n}$$

Dove:

H è il flusso di calore [$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

$\frac{\delta T}{\delta n}$ è il gradiente di temperatura lungo la normale alla superficie [K m^{-1}]

K_H è il coefficiente di scambio lungo la direzione normale, dipendente dai meccanismi fisici di trasporto e da condizioni di regime laminare o turbolento [$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$].

I gradienti termici condizionano i fenomeni di trasporto di fluidi ed energia termica tra oggetto e ambiente, provocando, oltre ai già citati fenomeni di dilatazione/contrazione anche fenomeni di evaporazione/condensazione, migrazione di acqua e sali, trasporto e deposito di inquinanti aerodispersi.

La minaccia maggiore risiede in variazioni di temperatura caratterizzati da magnitudo e cinetica elevati, al punto da poter essere la causa di tensionamenti e microfature, che diventano punto di concentrazione di tensioni meccaniche e vie preferenziali per un'eventuale penetrazione di acqua e sali solubili. A tal proposito, risultano essere particolarmente esposti a rischio gli oggetti costituiti da materiali con diverso coefficiente di dilatazione termica, che possono riportare fratture in corrispondenza delle interfacce di connessione.

²⁸ Il fondamento su cui si costruisce il concetto di temperatura è il cosiddetto 'principio zero della termodinamica', enunciato normalmente così: se ciascuno di due sistemi A e B è in equilibrio termico con un terzo sistema C, allora A e B sono in equilibrio termico tra loro.

²⁹ In appendice.

1.4.1.2 Umidità

Nell'ambiente possono verificarsi piccole variazioni di vapore o di temperatura, ma se si vuole mantenere costante l'umidità relativa (UR o Relative Humidity, RH), come è auspicabile, le variazioni di entrambi i parametri dovrebbero avvenire in modo tale da compensarsi l'una con l'altra.

Analogamente al flusso di calore, anche il flusso di vapore M_v dipende dal gradiente di concentrazione di vapore in aria ed equivale a:

$$M_v = -\rho K_w \frac{\delta MR}{\delta n}$$

Dove:

M_v è il flusso di vapore [$\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]

ρ è la densità dell'aria [g m^{-3}]

K_w è il coefficiente di diffusione del vapore lungo la direzione normale alla superficie n [$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$]

$\frac{\delta MR}{\delta n}$ è il gradiente del *Mixing Ratio* ovvero del rapporto di mescolanza³⁰ [cm^{-1}]

Il valore di K_w non è costante in aria; si assumono generalmente, infatti, sia il valore della diffusività molecolare del vapore in aria calma sia quello della diffusività del moto turbolento, in aria.

Gli effetti di questa variabile, come già accennato, si riscontrano soprattutto nella variazione di dimensione e di forma degli oggetti, oltre che nelle dinamiche dei processi chimici e biologici. La carta è un materiale in grado di assorbire l'acqua e si gonfia quando l'umidità relativa cresce e si restringe quando diminuisce. In generale:

- Valori di $RH > 45\%$ favoriscono le reazioni chimiche (corrosione metalli, scolorimento tinture e indebolimento delle fibre organiche come la carta).
- Valori di $RH > 65\%$, in sinergia con valori di temperatura superiori ai $20\text{ }^\circ\text{C}$, promuovono il proliferarsi di processi biologici.

Ad esempio, la variazione dimensionale della pergamena può raggiungere anche il 3-4% passando da valori molto bassi di UR (15-20%) a valori molto elevati (85-90%) (Tanasi, 2002).

³⁰ Il *Mixing ratio* è il dato dal rapporto tra la massa di vapore acqueo e la massa d'aria secca contenuta in una massa di aria umida. Essendo generalmente bassa la massa di vapore contenuta nell'atmosfera di solito si esprime in g/kg.

Tabella 1-3: condizioni termoigrometriche consigliate per determinate categorie merceologiche. Da (Aghemo et al., 1996), modificata.

Schede relative alle condizioni termoigrometriche

Riferimenti bibliografici	Temperatura (°C)	Umidità Relativa (RH) (%)
Carta, cartapesta, lavori artistici in carta, collezioni filateliche, manoscritti, papiri, stampe ³¹		
(AAM, 1977)		45 ÷ 60
(ASHRAE, 1971)	21 ÷ 22	45
(Bachmann, 1975)		55 ÷ 65
(Beaumont, 1983)	19 ÷ 24	35 ÷ 50
(Brawne, 1983)		45 ÷ 50
(Cook, 1973)	20 ± 2 al giorno	45 ÷ 55
(Dassu, 1988)		50 ÷ 65
(De Guichen, 1984)		50 ÷ 65
(ERCO, 1985)	19 ÷ 24	50 ± 2 al giorno
(Gambalunga, 1989)		50 ÷ 65
(ICC/CCI, 1986)	20 ÷ 25 (estate) 15 ÷ 20 (inverno)	50
(ICCROM, 1983)		50 ÷ 65
(UNESCO, 1984)		55 ÷ 65
(Zappalà, 1990)	18 ÷ 20	40 ÷ 50
Documenti e materiale di archivio ³²		
(BSI, 1977)	13 ÷ 18	55 ÷ 65
(Cook, 1973)	20 ± 2 al giorno	45 ÷ 55
(Flieder e Duchenein, 1985)	18 ± 1 al giorno	55 ± 5 al giorno
(Thompson, 1992)	13 ÷ 18	50 ÷ 65
Libri preziosi, libri rilegati in pelle, rilegature in pelle, pergamena, miniature ³³		
(AAM, 1977)		55
(ASHRAE, 1971)	12.8 ÷ 18.3	35
(Bachmann, 1975)		55 ÷ 65
(Beaumont, 1983)	19 ÷ 24	35 ÷ 50
(Cook, 1973)	20 ± 2 al giorno	45 ÷ 55
(Gambalunga, 1989)		50 ÷ 65
(ICC/CCI, 1986)	20 ÷ 25 (estate) 15 ÷ 20 (inverno)	50

³¹ Il valore più frequente tra i lavori considerati, relativamente a questa tipologia di manufatti, è il 50% di Relative Humidity (Aghemo et al., 1996).

³² Il valore più frequente tra i lavori considerati, relativamente a questa tipologia di manufatti, è il 55% di Relative Humidity (Aghemo et al., 1996).

³³ Il valore più frequente tra i lavori considerati, relativamente a questa tipologia di manufatti, è il 55% di Relative Humidity (Aghemo et al., 1996).

(ICCRUM, 1983)		50 ÷ 65
(Thompson, 1992)	13 ÷ 18	55 ÷ 65
(UNESCO, 1984)		55 ÷ 65

1.4.2 Principali inquinanti presenti in ambienti confinati

È davvero sorprendente apprendere che il fenomeno dell'inquinamento atmosferico inizia ad essere analizzato già nel XIII secolo a Londra, quando provocava disagi tali da richiedere indagini locali da parte di una Commissione preposta da re Edoardo I, nel 1285 (Brimblecombe, 1975). È evidente come, da quella data in poi, fino allo sviluppo di una politica ambientale più sostenibile del XX secolo, l'attenzione sia cresciuta in maniera esponenziale. Tuttavia, ciò che può apparire ancora più sorprendente, è che l'inquinamento atmosferico non è un fenomeno recente, nemmeno in ambito della conservazione dei beni culturali. Nel 1850, infatti, furono già descritti gli effetti dell'inquinamento atmosferico sulle pitture ad olio della *National Gallery* di Londra (Eastlake et al., 1853).

1.4.2.1 Le sorgenti degli inquinanti

Gli inquinanti presenti in ambienti interni sono il risultato di diverse tipologie di sorgenti: endogene ed esogene. Tra le fonti endogene si ritrovano, ad esempio, quelle derivanti dalla presenza dell'uomo (metabolismo degli occupanti, processi di combustione, pulizia locali etc.), da eventuali fonti dirette, dai materiali ed arredi che compongono l'edificio (emissioni da arredi, vernici, materiali edilizi) e da impianti di ventilazione (emissioni dagli impianti). Mentre, per le fonti esogene, possiamo elencare le emissioni industriali, da traffico veicolare, da riscaldamento etc. In figura 1-9 si riporta uno schema con le possibili fonti e i possibili percorsi di un generico inquinante in un ambiente interni museale:

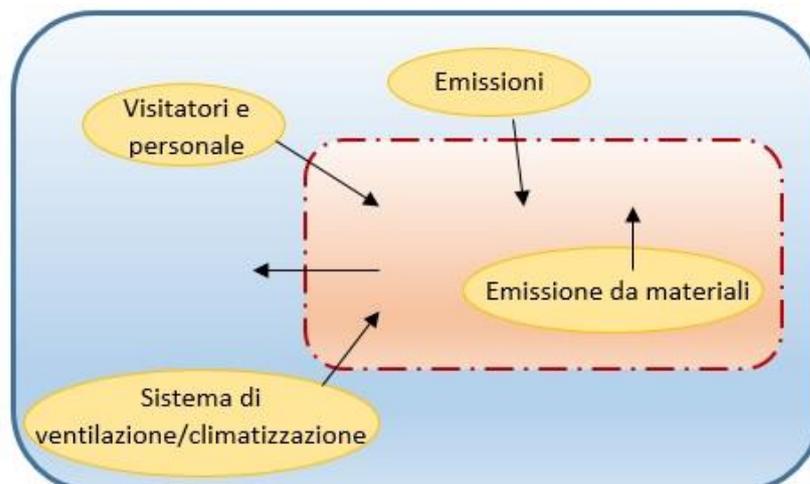


Figura 1-9 : schema dei possibili rapporti Indoor-Outdoor.

Una prima causa della presenza degli inquinanti gassosi nei musei è da rintracciare nell'ambiente esterno. Abbiamo già analizzato come l'ambiente indoor sia imprescindibile da quello outdoor, sia che si tratti di parametri termoigrometrici, sia che si parli di qualità dell'aria (inquinanti aerodispersi). Il contesto in cui è posizionato l'edificio adibito alla conservazione è pertanto un punto fondamentale per condurre un'analisi microclimatica e una valutazione del rischio ad essa connessa. Purtroppo, però, non è sempre corretto pensare, ad esempio, che una struttura in una zona rurale sia esente da queste problematiche, rispetto ad un'altra posizionata in un'area densamente trafficata. È necessario, in entrambi i casi, tenere in considerazione molteplici fattori. Innanzitutto gli inquinanti si diffondono nell'atmosfera e talvolta il luogo in cui si rinvencono è molto distante da quello di origine, poi non è detto che tutti gli edifici abbiano tassi di ventilazione simili.

Negli ambienti destinati alla conservazione di documenti, oltre agli effetti sulle persone tipici di tutti gli ambienti (che non vanno trascurati), sono da considerare gli effetti dei contaminanti sui materiali conservati ed esposti. Gli effetti sui materiali possono essere di vario tipo: scolorimento, corrosione, attacchi acidi di materiali cartacei e sono funzione di numerosi fattori fisici, tra i quali i valori di temperatura e di umidità relativa che possono condizionare la reattività chimica e la velocità di attacco degli inquinanti.

Di seguito sono riportati i principali inquinanti presenti negli ambienti confinati e le loro caratteristiche.

1.4.2.2 Ossidi di Carbonio

Monossido di carbonio: le principali fonti di immissione del monossido di carbonio in atmosfera sono di natura antropica e sono legate ai processi di combustione, ai sistemi di riscaldamento e al traffico veicolare. Non ha effetti diretti sui manufatti e sui materiali, ma è un precursore del biossido di carbonio.

Biossido di carbonio (anidride carbonica): le concentrazioni di CO₂ negli ambienti indoor sono legate principalmente alla presenza di persone. La produzione di anidride carbonica, infatti, è dovuta al metabolismo energetico degli essere umani e varia in funzione dell'attività fisica, dell'età, del sesso e della massa corporea. Il biossido di carbonio è considerato tossico per concentrazioni superiori alle 10.000-15.000 ppm, mentre concentrazioni pari alle 5.000 ppm sono considerate ammissibili. Valori intorno alle 40.000 ppm sono considerati pericolosi per l'uomo.

Gli effetti dell'anidride carbonica sui beni culturali presenti nei luoghi di conservazione sono riconducibili alla formazione di bicarbonato di calcio in presenza di carbonato di calcio secondo la reazione:

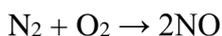


Il bicarbonato di calcio è un composto solubile in acqua che viene prodotto in quantità maggiori quanto maggiore è la concentrazione di CO₂ nell'ambiente. La diminuzione della concentrazione di CO₂ riduce la quantità di bicarbonato di calcio e porta alla formazione del carbonato di calcio non solubile in acqua, che cristallizza e può provocare la deposizione di veli di carbonato sulle superfici dei materiali. Tali fenomeni sono da considerare trascurabili all'interno di musei o biblioteche, in quanto i livelli di CO₂ che possono essere raggiunti non sono elevati e non costituiscono fonte di rischio né per i visitatori né per gli oggetti conservati. Tuttavia, in presenza di concentrazioni elevate, è necessario intervenire con tecniche di rimozione o sulle fonti o sulla ventilazione dei locali. Infine, è utile ricordare l'abitudine di utilizzare la CO₂ come contaminante di riferimento per valutare l'efficienza del sistema di ventilazione (Alfano et al., 2003).

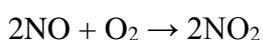
1.4.2.3 Ossidi di Azoto

In genere, con la dicitura “ossidi di azoto” o NO_x sono indicati in modo collettivo gli ossidi che si producono come sottoprodotti durante una combustione che utilizza l'aria. La quantità e la qualità degli NO_x dipende dalla sostanza combusta e dalle condizioni in cui avviene la combustione. Gli NO_x sono costituiti dall'insieme dei due più importanti ossidi di azoto a livello di inquinamento atmosferico, ossia l'ossido di azoto (NO) e il biossido di azoto (NO₂). Il maggior responsabile dell'inquinamento atmosferico da NO_x è il traffico veicolare che rappresenta quasi il 50% della produzione globale, in particolare per l'utilizzo dei motori diesel. A livello industriale, possono essere prodotti da impianti di produzione di acido nitrico o, più in generale, con quelli che ne fanno uso per la produzione di fertilizzanti, nylon etc.

Il monossido di azoto è formato principalmente per reazione dell'azoto contenuto nell'aria (circa il 70% di azoto molecolare) con l'ossigeno atmosferico, in processi che avvengono ad elevata temperatura e in special modo durante le combustioni per la produzione di calore, vapore, energia elettrica, meccanica, incenerimento etc.

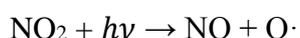


L'ossido di azoto così prodotto reagisce nuovamente con l'ossigeno, trasformandosi in biossido di azoto:



Le suddette reazioni sono correlate con la temperatura, con il residuo di ossigeno presente e, per il biossido di azoto, con il quadrato della concentrazione di monossido. L'NO₂, come inquinante primario, è pari al 10% dell'ossido di azoto complessivamente generato.

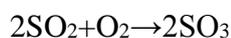
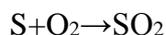
La caratteristica che rende questi inquinanti particolarmente minacciosi è la loro notevole reattività fotochimica, che li rende precursori di una serie di reazioni radicaliche che avvengono nell'atmosfera. Il cosiddetto ciclo fotolitico degli ossidi di azoto è implicato nell'interazione con altri inquinanti primari (ad esempio, HC) e nella generazione di inquinanti secondari, come l'ozono:



In totale, semplificando i prodotti con i reagenti, la reazione è apparentemente priva di effetto e origina un ciclo chiuso: in realtà, nel corso della giornata, il primo picco riferito all'NO primario emesso dagli scarichi decresce nel corso della mattinata per effetto della sua trasformazione in NO₂ secondario di origine fotolitica; successivamente verso mezzogiorno, si accumula anche ozono; infine, verso sera, diminuita la radiazione solare, risale la concentrazione di NO₂ che deriva dall'ossidazione di NO da parte dell'ozono, la cui concentrazione scende. A tal proposito si precisa che in questa ricerca sarà considerata la concentrazione di biossido di azoto, così come richiesto dall'Atto di indirizzo sui criteri tecnico scientifici. L'NO₂ è un gas irritante per le mucose e può contribuire all'insorgere di alterazioni delle funzioni polmonari. Gli effetti diretti sull'ambiente degli ossidi di azoto sono dovuti anche alla formazione di HNO₃, acido forte. Per quanto riguarda i beni culturali, invece, l'assorbimento di NO₂ (così come di SO₂) provoca acidificazione della carta che porta alla perdita delle proprietà meccaniche. L'umidità svolge un ruolo importante per l'assorbimento di questo inquinante, anche per questo motivo è consigliabile che i beni librari non vengano conservati per umidità superiori al 60%. Infine, la carta, contenente lignina, è più suscettibile dell'assorbimento e conseguentemente si danneggia soprattutto in termini di ingiallimento (Menart et al., 2011).

1.4.2.4 Composti dello Zolfo

Biossido di zolfo: SO₂, anche detto anidride solforosa, è un composto ubiquitario la cui presenza in atmosfera è legata alla combustione dei combustibili fossili, durante la quale lo zolfo si combina con l'ossigeno atmosferico formando il biossido di zolfo. L'SO₂ è un acido di per sé non pericoloso, ma rappresenta un precursore fondamentale dell'anidride solforica, l'SO₃, e quindi dell'acido solforico, l'H₂SO₄, formati secondo le reazioni di seguito riportate:



Gli effetti del biossido di zolfo sono notevoli sui materiali cellulosi quali carta, cartone, lino, mentre sono minimi sulle fibre sintetiche. L'entità dei danni arrecati agli oggetti varia in funzione di molti parametri, quali la presenza del ferro che agisce da catalizzatore e il tasso di umidità relativa. Infatti, valori di UR interni all'intervallo di 30-70%, attenua i fenomeni di danneggiamento. Altro effetto della SO₂ negli ambienti di conservazione consiste nell'incrementare gli effetti della luce e delle radiazioni UV sulla carta, che presenta problemi di conservazioni probabilmente legati alla presenza di impurità e della lignina, la quale favorisce l'assorbimento di sostanze acide. A differenza dei libri centenari in carta derivata da stracci, che permangono in buone condizioni per lunghissimi periodi, i libri con carta di cellulosa mostrano bordi ingialliti e infragiliti anche solo dopo una decina di anni. Il biossido di zolfo è potenzialmente dannoso anche per materiali di altra natura quali materiali proteici come seta, pergamene, metalli come bronzo, ferro, rame, piombo e argento.

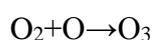
Acido solforico: è altamente corrosivo per materiali quali gesso, calcare, marmo, creando la solfatazione dei carbonati di calcio con rischio di dilavazione in presenza di acqua. E' meno pericoloso per i materiali cellulosi. Non essendo volatile, risulta molto persistente in quanto non può essere eliminato da un ambiente mediante ventilazione.

1.4.2.5 Ozono

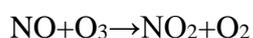
La presenza dell'ozono negli ambienti indoor è riconducibile sia a fattori esterni, in quanto l'ozono è un costituente dell'atmosfera, sia a fattori interni all'ambiente stesso, quali il funzionamento delle apparecchiature con tecnologia laser, stampanti, fotocopiatrici, fax, apparecchiature che producono raggi ultravioletti, filtri per l'aria non correttamente installati e ionizzatori dell'aria. La principale fonte di ozono atmosferico è considerato il cosiddetto smog fotochimico, incrementato da condizioni di forte insolazione, alta pressione ed alte temperature. La reazione principale di formazione dell'ozono si ha a partire dal biossido di azoto, NO₂, prodotto della combustione dei carburanti di origine fossile, il quale viene scisso dalla radiazione UV secondo la reazione:



L'atomo di ossigeno prodotto reagisce con l'ossigeno molecolare presente nell'aria formando ozono:



Che reagisce a sua volta con il monossido di azoto:



Tale reazione ciclica di produzione e scissione dell'ozono può far aumentare le concentrazioni in atmosfera fino a valori di 0.04 ppm, a differenza delle 0.02-0.05 ppm, presenti nell'aria non contaminata (D'Agostino, 2002).

L'ozono ha un elevato potere ossidante ed è considerato tossico per gli esseri umani, in quanto riduce la funzione polmonare ed aumenta il rischio di infezioni alle vie respiratorie. In particolare, a concentrazioni superiori a 0.4 ppm, può ridurre la capacità dei polmoni di inattivare virus e batteri, mentre l'esposizione prolungata a concentrazioni minori di circa 0.008-0.1 ppm, può provocare irritazioni agli occhi e ai tratti respiratori.

Oltre che sugli esseri umani, l'ozono può avere effetti dannosi sui materiali, attaccando e infragilendo le gomme, indebolendo i tessuti e stingendo i colori (Fracastoro, 1997). È estremamente dannoso per i composti organici insaturi, quali pelli e pigmenti naturali, provocando la rottura delle molecole in seguito ad ossidazione con conseguente distruzione del materiale. Può essere dannoso anche per molti metalli: aumenta il grado di ossidazione dell'argento e del ferro e favorisce la solforazione del rame e dell'argento. Fortunatamente, l'ozono non è persistente in ambienti indoor e se in assenza di fonti di mantenimento, il suo periodo di dimezzamento è di 30 minuti.

1.4.2.6 VOC

I composti organici volatili, solitamente menzionati con l'acronimo VOC (*Volatil Organic Compounds*), costituiscono una importante famiglia di composti tra i quali gli alcani, i cicloalcani, gli idrocarburi aromatici e clorurati e le aldeidi. A questi ultimi appartiene il composto più studiato dal punto di vista tossicologico e mutagenico, vale a dire la formaldeide, recentemente inserita dallo IARC, tra i carcinogeni sospetti per l'uomo (Alfano et al., 2005).

Altre sostanze, presenti in ambienti confinati e domestici, possono essere il diclorometano, il limonene e il toluene. La presenza dei VOC in ambienti indoor è dovuta all'utilizzo di numerose sostanze molto diffuse come solventi, deodoranti, tarmicidi, colle, vernici, prodotti per la pulizia, cere per i pavimenti etc. Ulteriore fonte di formazione dei VOC è da ricercare nei processi di combustione e di combustione incompleta, nel fumo da tabacco e negli impianti di condizionamento (Fracastoro, 1997). I VOC, seppur presenti a basse concentrazioni, possono rappresentare un rischio per molti materiali ceramici o a base di calcio, provocando il loro scolorimento e rendendoli fragili, così come per i metalli e gli oggetti sintetici. Ciononostante, il pericolo maggiore legato ai VOC risiede nella loro attitudine a costituire dei precursori per la formazioni di contaminanti maggiormente pericolosi.

1.4.2.7 Particolato

Con il termine particolato si intende tutto il materiale particellare in sospensione nell'aria. Negli ambienti esterni, la presenza del particolato è dovuto a processi, sia naturali, sia antropici, quali le attività industriali, il traffico veicolare e tutti i processi che prevedono combustione. Negli ambienti interni lo si ritrova sia perché proveniente dall'esterno, sia perché prodotto da attività antropiche e da combustione, così come dalla dispersione di polvere e di microfibre da parte dei materiali presenti.

Il particolato viene convenzionalmente suddiviso in due tipologie, in base al diametro delle particelle aerosospese che lo compongono: si definisce PM10 il particolato le cui particelle hanno diametro inferiore ai 10 micron e PM2.5 l'insieme delle particelle il cui diametro è inferiore a 2.5 micron. In Italia, mediamente, si hanno valori esterni di concentrazione dell'ordine di 0.06-0.08 mg/m³ per i PM2.5 e di 0.04-0.06 mg/m³ per il PM10 (Conferenza Stato-Regioni G.U. n.276 del 27/11/2001).

Il particolato atmosferico è considerato pericoloso per gli essere umani in quanto le particelle fini (PM10 e PM2.5) hanno la capacità di superare le barriere delle vie aeree superiori e quindi di raggiungere le parti più profonde dell'apparato respiratorio (polmoni, alveoli) veicolando spesso gas e vapori tossici adsorbendoli sulla superficie delle particelle.

Tutte le componenti del particolato quali polvere, fuliggine, residui di fumo di tabacco costituiscono un serio problema per la conservazione di beni all'interno dei locali, dovuto alle capacità catalitiche delle suddette particelle e alla capacità, in particolari condizioni, di formare acidi. La principale causa di danneggiamento dei materiali è dovuto al deposito delle particelle solide carboniose incombuste, secondo la legge di Stokes, sulle superfici, che ne provocano lo sporco e successivamente alterazioni e corrosioni (Lorusso, 2001).

Attraverso studi condotti in ambienti museali, è stato rilevato un aumento delle concentrazioni di particolato durante le ore diurne, quando l'ambiente è aperto al pubblico, mettendo in relazione la presenza di particolato con la presenza di pubblico, con il funzionamento degli impianti di condizionamento o umidificazione e con le operazioni di pulizia, soprattutto in presenza di tappeti o moquette (Bernardi, 2004).

Inoltre, bisogna considerare che le particelle minerali, generalmente presenti nella polvere, possono diventare chimicamente attive in presenza di acqua e possono contenere uova di insetti, spore di miceti e di batteri e, in condizioni termogigrometriche adeguate (temperatura compresa tra 20 e 30 °C ed umidità relativa superiore al 65%), possono favorire lo sviluppo del biodegrado, in particolare nei materiali a base di cellulosa (Aghemo et al., 1996).

1.4.2.8 Contaminanti biologici

I contaminanti biologici presenti negli ambienti interni sono classificabili in quattro categorie:

- microrganismi, tra i quali funghi e batteri;
- insetti, quali acari e aracnidi;
- materiale biologico, ad esempio escrementi di animali, frammenti di esoscheletro e forfora;
- materiale organico di origine vegetale, soprattutto pollini;

Quelli che destano maggiore interesse in termini di conservazione sono quelli appartenenti alla prima categoria.

La presenza di microrganismi è favorita da elevati livelli di umidità, trovano terreni di coltura favorevoli nelle pareti soggette a fenomeni di condensazione, negli impianti di condizionamento e in tutti i luoghi particolarmente umidi (Mantovani, 2002).

1.5 La situazione normativa nazionale

Nel nostro Paese il dovere di tutelare il vasto patrimonio culturale fu avvertito fin dall'antichità, tanto che tra le prime azioni si segnala l'Editto promulgato dal Senato di Roma nel 1162, con il quale si vietò di abbattere o danneggiare in qualunque modo la Colonna Traiana. Una lunga serie di provvedimenti furono promulgati dallo Stato Pontificio fin dal XV secolo. A partire da Martino V, che limita *ope legis* l'anarchia delle costruzioni private nel '400, al Vasari che inizia, nel '500, a riflettere sui pericoli a cui sono sottoposte le opere di disegno,³⁴ al 1704 quando fu promulgato l'Editto ad opera del Cardinale Giovanni Battista Spinola dove, per la prima volta, compare nella normativa sulla conservazione un riferimento ai beni di natura cartacea,³⁵ all'Editto del 1819 *Sopra le scritture e i libri*

³⁴ Per conservare le opere d'arte il Vasari suggerisce anche le copie che possono essere utili per capire l'originale. Lui stesso ricorda di aver commissionato una riproduzione ad olio del cartone della Battaglia di Cascina di Michelangelo ad Aristide Da Sangallo "*Atteso che le carte agevolmente vanno a male*".

³⁵ "Per la conservazione de libri manoscritti, et altre scritture tanto pubbliche, quanto private, mentre varij Artefici, o altre persone, senza alcuna revisione, approvazione, o licenza si fanno lecito di comprare indifferentemente ogni sorte di scritture manoscritte da qualsivoglia persona, e convenendo con opportuno rimedio provvedere a si grave disordine, dichiariamo, e proibiamo, che nissuna persona di qualunque grado, condizione, sesso, e qualità ardisca di vendere, o comprare sotto alcun pretesto qualsivoglia sorte di libri scritti a mano tanto Volgari, e Latini, quanto Greci, Ebraici, e di qualunque altra lingua così in carta pecora, come in carta bambacina, tanto intieri, quanto divisi, rotti, e sciolti, come pure Instrumenti, Processi, Inventarij, Lettere, Bolle, Brevi, Diplomi, e qualunque altra sorte di carte, ovvero pergamene manoscritte, sotto che nome, o titolo

manoscritti del Cardinale Camerlengo Bartolomeo Pacca, ritenuto il più completo tra quelli fino ad allora pubblicati, imitato poi degli Stati italiani ed esportato anche all'estero. Subito dopo l'unità, lo Stato italiano mantenne pressoché inalterato il corpus disomogeneo degli stati pre-unitari. L'interesse nei confronti della protezione del patrimonio artistico aumentò nel tempo, tanto che, agli inizi del '900, fu promulgata una prima legge nazionale di tutela. Sebbene rappresenti il primo organico esempio di legislazione, con la fortunata introduzione delle Soprintendenze, bisogna aspettare le leggi del 1939 (legge n.1089/1939 – per le cose di interesse storico e artistico – legge n.1497/1939 – per le bellezze paesaggistiche - legge n.2006/1939 – per gli archivi) per una completa riorganizzazione di concetti chiave quali: conservazione, integrità e sicurezza dei beni e per la fruizione da parte del pubblico. Dopo le due guerre mondiali, la Costituzione della Repubblica italiana sancisce, tramite l'Articolo 9, che *“La Repubblica promuove lo sviluppo della cultura e la ricerca scientifica e tecnica. Tutela il paesaggio e il patrimonio storico e artistico della Nazione”*.

Dall'entrata in vigore della Costituzione, si cercò invano di rinnovare la legislazione di tutela mediante il lavoro della Commissione Franceschini (1963) e quella Papaldo (1968). Nello stesso periodo fu introdotto la locuzione “bene culturale” in luogo di “cose d'arte”, per svincolarla da un'accezione materialistica che fino a quel momento aveva dominato in queste tematiche e per legarlo al concetto di valore universale di civiltà. In seguito, sono state emanate leggi specifiche su particolari emergenze, in mancanza di una legislazione omogenea.

Le leggi del '39 restarono sostanzialmente in vigore fino al D.Lgs. 490/1999, decreto nel quale la normativa in materia di beni culturali viene riorganizzata nel Testo Unico. A completamento del quadro normativo recente, il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, approvato nel gennaio 2004 ed entrato in vigore nel maggio dello stesso anno, nasce, specificatamente dalla necessità di aggiornare le norme riguardanti la tutela del patrimonio culturale e sancisce che la conservazione e la valorizzazione sono atte a “preservare la memoria della comunità nazionale e del suo territorio e a promuovere lo sviluppo della sua cultura”.

siano, se non ne averà ottenuta particolar licenza in scritto...e comandiamo a tutti i Librari, Pizzicaroli, Battilori, Cartolai, Dipintori, Tamburari, et altri Artegiani, che entro il termine di otto giorni prossimi dopo la pubblicazione del presente editto debbano aver notificato al... Prefetto dell'Archivio di Castel S. Angelo, overo al Custode dell'Archivio Segreto Vaticano quei libri, e scritture di sopra descritte, che si troveranno di avere nelle loro Botteghe, o altrove per uso, e servizio delle loro arti, e che non ardischino, né presumano sotto qualsivoglia pretesto di sciogliere, dividere, rompere, o guastare detti libri, e scritture, tanto ad effetto di venderle, o valersene per legare altri libri, quanto per adoperarle ad uso delle loro Arti”.

Con la riforma, nel 2001, del Titolo V della Costituzione, con l'articolo 117, si assiste alla divisione dei compiti per quanto riguarda la tutela e la valorizzazione dei beni culturali tra Stato e Regioni. Come già detto, il punto di riferimento più recente, nel quale sono confluiti i ragionamenti sviluppati nel corso di circa un secolo, è rappresentato dal Codice dei beni culturali e del paesaggio (D.Lgs. n.42 del 22 gennaio 2004 e ss.mm.ii). Il Codice fornisce uno strumento utile per tutelare e promuovere il patrimonio culturale attraverso il coinvolgimento degli Enti Locali. Il Codice definisce i beni culturali come “le cose immobili e mobili che presentano interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico e le altre cose individuate dalla legge o in base alla legge quali testimonianze aventi valore di civiltà”. Nella Sezione Seconda, all'art.10 e 11, sono elencati dettagliatamente gli oggetti di tutela, mentre, all'art.29, il Codice sancisce alcuni concetti fondamentali sui quali si fonda questa ricerca:

- “la *conservazione* del patrimonio culturale è assicurata mediante una coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro”
- “Per *prevenzione* si intende il complesso delle attività idonee a limitare le situazioni di rischio connesse al bene culturale nel suo contesto”.
- “Per *manutenzione* si intende il complesso delle attività e degli interventi destinati al controllo delle condizioni del bene culturale e al mantenimento dell'integrità, dell'efficienza funzionale e dell'identità del bene e delle sue parti”.

In quest'ambito, la legislazione regionale dell'Emilia Romagna è scandita, poi, da diverse norme quali: la Legge Regionale 18/2000 - Norme in materia di biblioteche, archivi storici, musei e beni culturali – con la quale si adotta un programma poliennale di interventi con obiettivi specifici e prioritari, tra cui il raggiungimento di standard di qualità, sviluppo dei sistemi di sicurezza per la salvaguardia e la conservazione del patrimonio; la Del.G.R. n. 309 del 3 marzo 2003 - Direttiva ai sensi dell'art. 10 L.R. 18/2000 – con la quale sono approvati gli standard e gli obiettivi di qualità, con riferimento all'Istituto per i Beni Artistici, Culturali e Naturali (IBACN)³⁶.

Un testo molto rilevante nel panorama legislativo italiano e già citato, a proposito dell'analisi del rischio per i beni culturali, è costituito dall' “Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei”.³⁷ Con il D.M. del 10

³⁶ Per un ulteriore approfondimento e per presa visione delle norme citate si rimanda al sito <http://ibc.regione.emilia-romagna.it/servizi-online/musei/musei-di-qualita/normativa-musei-di-qualita-1>

³⁷ Il D.Lgs. 112/1998 all'art.150, comma 6, in riferimento al decentramento della gestione dei musei e beni culturali a Regioni e enti Locali, ha stabilito che con un decreto ministeriale dovessero essere definiti i criteri

maggio 2001 si definiscono “i criteri tecnico-scientifici e gli standard minimi da osservare in modo da garantire un adeguato livello di fruizione collettiva dei beni, la loro sicurezza e la prevenzione del rischio”. Il lemma “standard” viene introdotto per la prima volta in un atto legislativo italiano e gli viene annesso il significato primario di unità di misura “prescelta da un’ autorità, da una consuetudine o per unanime consenso”, cui si rapportano significati quali modello, esempio, campione, criterio, norma, principio, parametro, grado, livello. Più volte è commentata, nel documento l’ ambivalenza di questo termine dalla quale deriva una gradazione che va dall’ obbligo alla raccomandazione (MiBACT, 2001).³⁸ Il documento sottolinea che la qualità dell’ istituzione museale deve essere valutata non in relazione al suo livello di merito o alle collezioni possedute o alla dimensione dell’ edificio, bensì in virtù della capacità di soddisfare le specifiche esigenze di gestione di un museo, di cura delle collezioni e di servizi al pubblico (Ambito III). Da tale approccio derivano concetti come “obiettivi, sistema e controllo di qualità”. Nell’ Ambito VI “Gestione e cura delle collezioni” è fornito un elenco dettagliato dei parametri fisici, chimici e biologici da monitorare in maniera continuativa, consigliano dei valori come riferimento al fine di ottenere condizioni ottimali di conservazione. Tale decreto è suddiviso in otto ambiti (Status giuridico, Assetto finanziario, Strutture, Personale, Sicurezza, Gestione e Cura delle collezioni, Rapporti con il pubblico e relativi spazi, Rapporti con il territorio). Si tratta di un’ opportunità per mettere a punto una cultura della gestione per il sistema dei musei italiani in ragione della storica cura e tutela del patrimonio, ma raramente proposta in maniera esplicita. Per la stesura del documento sono stati recepiti diversi elaborati circa i musei, adottati in altri paesi come programmi di certificazione di qualità ed accreditamento; in particolare, i documenti dell’ *American Association of Museum* (AAM), il Codice deontologico dell’ ICOM (*International Council Of Museum*) ed il *Registration Scheme for Museum*.

È, purtroppo, storica l’ assenza di un progetto politico dello Stato nel settore delle biblioteche, così in contrasto con gli altri grandi Paesi europei, che hanno invece individuato nelle istituzioni bibliotecarie un sicuro elemento di crescita sociale e civile della collettività.

tecnico-scientifici e gli standard minimi cui i musei devono conformarsi per garantire un adeguato livello di fruizione collettiva dei beni, ossia D.M. 10 maggio 2001 del Ministero per i Beni e le Attività Culturali.

³⁸ “Se infatti, ad esempio, gli adempimenti in ordine alla conservazione, alla sicurezza e alla prevenzione del rischio, anche alla luce della normativa vigente, sono da intendere come ineludibili, si propongono invece delle linee-guida per aspetti quali la promozione, la valorizzazione o l’ attivazione di programmi di carattere territoriale, evidentemente soggette ad essere intraprese a seconda delle opportunità e risorse presenti nelle diverse situazioni.” (MiBACT, 2001).

L'Associazione Italiana Biblioteche (ABI)³⁹ si è sempre fortemente impegnata sulla questione della riorganizzazione complessiva del servizio bibliotecario italiano. La legislazione bibliotecaria, di competenza dello Stato, è tutt'ora carente e disomogenea, a conferma di una lacuna storicamente presente nel settore delle biblioteche italiane; vale a dire la mancanza di un quadro istituzionale di riferimento, o legge-quadro, che definisca in modo organico le linee generali di una politica bibliotecaria nazionale coordinata ed efficiente, al fine di valorizzare le biblioteche e dare forza ai diritti di accesso ai servizi documentativi, sempre più necessari ai cittadini della "società dell'informazione". Copiosa è invece la legislazione bibliotecaria prodotta dalle Regioni, le quali, a partire dagli anni settanta del secolo scorso, o per disposizione costituzionale o per delega dello Stato, hanno quasi tutte approntato una legislazione per le biblioteche pubbliche del proprio territorio. Questo percorso ha avuto inizio già nei primi anni '70 (si pensi al D.P.R. n.3/1972 - Trasferimento alle Regioni a statuto ordinario delle funzioni amministrative statali in materia di assistenza scolastica e di musei e biblioteche di enti locali e dei relativi personali ed uffici -). Vi è una serie di leggi che fissano le competenze e le funzioni tra i diversi organismi (Stato, Regioni e enti territoriali). Come precedentemente accennato, questo percorso di decentramento delle competenze si è concluso con la Legge Costituzionale n. 3 del 18 ottobre 2001, con la quale è stato approvato l'attuale assetto tra Comuni, Province, Regioni e Stato; in più con il Codice dei beni culturali è stata definitivamente definita la ripartizione delle funzioni in materia di tutela dei beni librari.

1.6 La situazione normativa internazionale

Nell'Unione Europea esistono diverse disposizioni in materia di conservazione del patrimonio culturale; a titolo esemplificativo si riporta l'Art.3 del Trattato di Lisbona del 2009: "*...l'Unione rispetta la ricchezza della sua diversità culturale e linguistica e vigila sulla salvaguardia e sullo sviluppo del patrimonio culturale europeo...*".

Le normative internazionali, al termine della Seconda Guerra Mondiale, si limitano ad intervenire in alcune specifici ambiti, come la protezione da furti o illecita esportazione/importazione. Mentre, ai singoli Stati, viene affidata una maggiore discrezione per elaborare normative in base alle necessità e alle emergenze. In questo contesto si collocano molteplici organizzazioni internazionali che hanno l'obiettivo di preservare il

³⁹ <http://www.aib.it/>

patrimonio artistico-culturale presente nei musei e stabilire i limiti minimi affinché possa essere assicurata la conservazione del patrimonio dell'umanità.

In alcuni casi, alcune strutture non riescono, con le loro esigue risorse economiche e/o umane, ad attuare azioni ed interventi finalizzati ad una conservazione preventiva ma, talvolta, è possibile ricevere supporto da istituzioni internazionali. Il CCI (Canadian Conservation Institute), ad esempio, è uno dei più attivi nell'ambito della conservazione preventiva e affini con più di 400 studi per i musei e 2000 progetti.

1.7 Le norme UNI sul microclima

In Italia, le prime attività di ricerca nel settore dei beni culturali si fanno risalire ad un'iniziativa congiunta del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e dell'Istituto Centrale per il Restauro (ICR) quando, nel 1977, fu istituita la NorMaL, ossia una commissione avente come obiettivo "l'elaborazione di metodi unificati per lo studio delle alterazioni dei materiali lapidei e per il controllo dell'efficacia dei trattamenti conservativi di manufatti di interesse storico – artistico". Con il passare del tempo, tale Commissione allargò lo studio a diversi settori, fino a che, nel 1996, fu firmata una convenzione tra il Ministero per i Beni Culturali e l'Ente Italiano di Normazione (UNI). Da questa unione nasce la cosiddetta Commissione Beni Culturali – NorMaL che, dal 1997, intende sviluppare norme tecniche nazionali⁴⁰ nel settore dei beni culturali. A partire dagli anni '90 inizia una massiccia produzione di norme, tra cui ricordiamo alcune inerenti alle condizioni microclimatiche. In questa ricerca sono stati presi in considerazione, in particolare, le seguenti norme UNI10829 e UNI10586:

- 10586:1997 – Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti
- 10829:1999 – Beni di interesse storico artistico – condizioni ambientali di conservazione – misurazione ed analisi.

⁴⁰È opportuno sottolineare cosa s'intende per "norma": *una specifica tecnica, adottata da un organismo di normazione riconosciuto, per applicazione ripetuta o continua, alla quale non è obbligatorio conformarsi, e che appartenga a una delle seguenti categorie... norma nazionale: una norma adottata da un organismo di normazione nazionale*".

Da http://www.uni.com/index.php?option=com_content&view=article&id=361&Itemid=936 (data di accesso 7/9/2014).

1.1.1 UNI 10829

La UNI 10829:1999 è stata elaborata dal Comitato Termotecnico Italiano. Secondo tale norma è necessario che, per una corretta conservazione dei beni di interesse storico e artistico, siano opportunamente controllate le condizioni ambientali dei luoghi in cui sono collocati, al fine di limitare la velocità dei processi di degrado. La norma dal titolo “Beni di interesse storico e artistico – condizioni ambientali di conservazione – Misurazione ed analisi” prescrive una metodologia per la misurazione in campo delle grandezze ambientali termoisometriche e dell’illuminamento e fornisce le indicazioni per l’elaborazione dei dati. Il presupposto sui cui si basa è quindi che, al fine di evitare processi di degrado, bisogna monitorare: temperatura, umidità e illuminamento. Vengono fornite le specifiche tecniche da seguire per il campionamento dei dati, relativamente alle caratteristiche spazio temporali dei rilievi. Ad esempio, per le misure di temperatura e umidità, si consiglia di controllare l’andamento delle grandezze ambientali in un periodo specifico, in cui si possono avere problemi connessi con il verificarsi di condizioni particolari, e di eseguire le misurazioni per un arco di tempo non inferiore a 15 giorni. Per quanto riguarda le misure, sono riportate le caratteristiche delle apparecchiature di misurazione, in riferimento al campo e all’accuratezza di misura. Per l’analisi dei dati sono indicati dei valori di riferimento, validi in mancanza di indicazioni specifiche diverse, per i parametri ambientali relativi alla conservazione di 33 categorie di materiali e oggetti e dei loro intervalli di variazione ritenuti accettabili. Viene suggerito di calcolare l’indicatore di scostamento, relativamente ad una certa grandezza, definito come la percentuale di tempo in cui la grandezza in esame si mantiene al di fuori del campo prescelto ritenuto accettabile. Infine, nella norma sono riportate diverse schede dove è possibile raccogliere informazioni sulla storia climatica, sulla collocazione e stato di conservazione nonché sui valori massimi e minimi riscontrati nell’arco di una campagna di monitoraggio.

1.7.2 UNI 10586

La UNI 10586:1997 “Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti” definisce i parametri microclimatici (grandezze e valori limiti) per gli ambienti di conservazione dei documenti grafici⁴¹ e le caratteristiche dei loro alloggiamenti. Si riferisce agli ambienti nei quali sono conservati documenti grafici costituiti da materiale cartaceo e membranaceo, legato e non, per i quali sia necessaria la

⁴¹ La norma definisce il documento grafico come segue: “informazione registrata su un supporto costituito essenzialmente da materiale cartaceo e membranaceo.

conservazione per un tempo indefinito nella forma originale, in edifici di nuova costruzione o preesistenti nei quali si adottano soluzioni tecniche che assicurino le caratteristiche richieste. Nel dettaglio, sono riportate alcune importanti definizioni come la classificazione degli ambienti di conservazione, suddivisi in:

- locale di deposito: locale in cui i documenti grafici vengono abitualmente conservati;
- locale di consultazione, lettura ed esposizione: locali in cui i documenti grafici vengono consultati e/o temporaneamente esposti;
- locale di fotoriproduzione e di restauro: locali in cui i documenti grafici sostano il tempo necessario per le operazioni di riproduzione o di restauro.
- locale di accesso e di servizio: Locali accessori a quelli definiti in precedenza, nei quali i documenti grafici possono solo transitare.

La norma definisce le condizioni climatiche ideali per ogni tipologia di locale sopraelencato (tabella 1-4) e prescrive le azioni necessarie al mantenimento delle stesse. Vengono definite le condizioni termoigrometriche tenendo conto della situazione climatica italiana e della necessità di contenere le differenze dei valori di temperatura e umidità relativa tra gli ambienti di deposito e gli altri locali. Oltre alle condizioni termoigrometriche e di illuminamento, vengono riportate i valori di qualità dell'aria consigliati.

Dall'analisi dei limiti proposti per la qualità dell'aria, sintetizzati nella tabella 1-4, si può osservare come alcuni dei valori indicati risultino estremamente cautelativi, specie se rapportati agli analoghi valori per la protezione della salute umana. In particolare il valore per l'O₃ (limite per la qualità dell'aria outdoor: 120 µg/m³ come massima media mobile sulle 8 h, su base giornaliera) risulta inferiore anche ai limiti di rilevabilità della strumentazione standard per il controllo della qualità dell'aria: 4 µg/m³,⁴² nonché ai limiti di rilevabilità dei campionatori passivi (circa 5 µg/m³).

Per altro, in diversi lavori scientifici, i livelli limite di esposizione all'O₃ per documenti grafici risultano essere superiori ai valori riportati nella su citata Norma UNI. In particolare, per l'O₃, (Blades et al., 2000) riporta, come valore di riferimento: 13.0 ppb, pari a 25.6 µg/m³, mentre (Tétreault, 2003) sempre per lo stesso inquinante, riporta un valore per un'esposizione annuale, pari a 5.0 ppb, corrispondenti a circa 10.0 µg/m³. Nel presente lavoro, per coerenza metodologica, in mancanza di precisi valori di legge, sono stati presi i limiti riportati nelle Normative UNI di più stretta pertinenza, anche se riteniamo che i limiti

⁴² Si veda, ad esempio: Da ARPA Veneto: <http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/qualita-dellaria/dati-validati-legenda>

di concentrazione di alcuni inquinanti ivi riportati, come nel caso dell'ozono, risultino estremamente conservativi e non supportati da adeguati dati di letteratura.

Tabella 1-4: condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti. Da (UNI10586, 1997).

Materiale	Tipologia di locale	Valori termoigrometrici e massime escursioni giornaliere				Illuminazione (lux)	Condizionamento e ventilazione	Qualità dell'aria (μgm^{-3})
		Valori T e RH ($^{\circ}\text{C}$) (%)		Escursioni T e RH ($^{\circ}\text{C}$) (%)				
Documento grafico	Locale di deposito	14÷20	50÷60	2	5	75 lx in media < 150 lx	Devono essere assicurati da 5 a 7 ricircoli d'aria ogni ora	$\text{SO}_2 < 10 \mu\text{gm}^{-3}$ $\text{NO}_x < 10 \mu\text{gm}^{-3}$ $\text{O}_3 < 2 \mu\text{gm}^{-3}$ $\text{PM} < 50 \mu\text{gm}^{-3}$
	Locale di consultazione, lettura ed esposizione	18÷23	50÷65	Se $> 4^{\circ}\text{C}$ e 5 % i documenti devono essere acclimatati con gradualità		< 150 lx per la lettura < 50 lx per l'esposizione		
	Locale di fotorigrafia e di restauro	Vale quanto indicato per i locali di consultazione						
	Locale di accesso e di servizio	Le condizioni devono essere tali da non influenzare negativamente i requisiti degli altri locali anche in condizioni di massimo afflusso						

2. SCOPO DELLA RICERCA

Le attività svolte in questo studio sono mirate al raggiungimento di quattro obiettivi interconnessi tra loro: l'analisi microclimatica di alcune sale della Biblioteca Classense di Ravenna, lo studio delle correlazioni fra i parametri misurati all'interno dei locali con quelli rilevati all'esterno (vale a dire il rapporto fra qualità ambientale indoor ed outdoor), lo sviluppo e l'applicazione, alla suddetta biblioteca, di una innovativa proposta metodologica di analisi relativa del rischio per i beni culturali. La ricerca si colloca in un contesto tipico degli ambienti confinati e sensibili, dal momento che l'oggetto principale di tale studio, sia per le analisi microclimatiche, sia per l'applicazione della metodologia proposta per la valutazione del rischio, è stata la Biblioteca Classense. Nel dettaglio, l'analisi del microclima è stata realizzata mediante la misura delle concentrazioni di inquinanti gassosi (quali NO₂ e O₃) e dei parametri termoigrometrici, utilizzando diversi strumenti. A tal proposito, è stato elaborato un piano di monitoraggio che ha coinvolto alcune sale della Classense quali: la Sala dei Santi Padri, la Sala Dantesca, l'Aula Magna e l'Ex Refettorio; la scelta che è stata fatta è stata dettata, in particolare, dalla possibilità di poter analizzare ambienti confinati eterogenei tra loro per geometria, tipologia di areazione, destinazione d'uso e frequentazione. Le misure *indoor* sono state confrontate con quelle *outdoor*, allo scopo di risalire ad alcune peculiarità che descrivono l'area di studio (come, ad esempio: l'inerzia termica dell'edificio, il rapporto di concentrazioni indoor/outdoor, il tasso di ventilazione).

Di pari passo è stata elaborata una proposta innovativa di analisi del rischio che vede i beni librari come bersagli e che valuta, come fattori di rischio, i parametri microclimatici indoor. Lo scopo, pertanto, di questo lavoro di tesi è stata la formulazione di una metodologia atta ad identificare stati anomali nel sistema, i quali possono rappresentare una potenziale minaccia per la conservazione dei bersagli di interesse. La metodologia proposta, in quanto analisi relativa del rischio, definisce un ordine di priorità per quei fattori microclimatici che eventualmente si discostano dalle condizioni di benessere per la conservazione, accelerando il degrado dei beni in oggetto.

Infine, come ultimo obiettivo di questa tesi, l'analisi microclimatica e la procedura di valutazione del rischio sono stati applicati, come caso di studio, ad alcune sale della Biblioteca Classense, come esempio dell'approccio multidisciplinare richiesto nell'ambito della conservazione preventiva.

3. MATERIALI E METODI

3.1 Campagna di monitoraggio

Il monitoraggio presso gli spazi della Biblioteca Classense è stato eseguito al fine di tener conto delle relazioni, dell'incidenza e della variabilità tra le grandezze termoigrometriche dell'ambiente esterno e dell'ambiente espositivo, dal momento che, come già accennato, il microclima interno non può prescindere da quello esterno. Le misure indoor sono state effettuate mediante l'utilizzo di diversi strumenti, descritti dettagliatamente nel seguito. Mentre, per poter descrivere le condizioni microclimatiche outdoor, sono state monitorate, per tutta la durata della campagna di misure, le grandezze termoigrometriche tramite consultazione del database di ARPA ER. Inoltre, sono stati installati diversi campionatori passivi per la determinazione della concentrazione degli inquinanti gassosi, sia all'esterno dell'edificio stesso, sia in corrispondenza di una stazione meteo locale dell'ARPA, per poter confrontare il valore di concentrazione ottenuto a partire da due diversi metodi di campionamento ed analisi.

Come precedentemente detto, la norma UNI 10586 è stata presa come spunto per eseguire le operazioni di misurazione ed analisi per la campagna di monitoraggio. Tale norma consiglia, come riassunto in tabella 1-4, di analizzare gli ossidi di azoto, il biossido di zolfo e l'ozono. Come precedentemente detto, la concentrazione degli NO_x è data dalla somma di monossido e biossido. Tuttavia, dal momento che un obiettivo della presente ricerca consiste nel calcolare la dinamica di diffusione degli inquinanti dall'ambiente outdoor a quello indoor, si è optato per la scelta dell' NO_2 come inquinante di riferimento⁴³. Inoltre, l'Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei riporta come limite di concentrazione per la tutela dei beni cartacei i valori di biossido di azoto. Relativamente alle concentrazioni di SO_2 si rileva che, nella provincia di Ravenna, le concentrazioni di tale inquinante sono notevolmente inferiori ai livelli previsti dalla normativa e non si sono registrati superamenti negli ultimi sette anni, nemmeno in riferimento al livello critico invernale per la protezione della vegetazione ($20 \mu\text{g m}^{-3}$); per quanto riguarda questo inquinante, infatti, il Rapporto sulla qualità dell'aria della Provincia di Ravenna riporta sia un buono

⁴³ Le velocità di deposizione dell' NO , comunque, rientrano negli intervalli sperimentali delle velocità di deposizione dell' NO_2 .

stato dell'indicatore attuale sia del suo trend. Inoltre, un recente articolo (Righi et al., 2013) riporta che le concentrazioni medie estive dell'SO₂ nell'area urbana di Ravenna sono in un range che va da 0 a 5 µgm⁻³. Considerando che il valore massimo consigliato dall'UNI per la salvaguardia dei beni cartacei è di 10 µgm⁻³, abbiamo deciso di focalizzare la nostra attenzione sull'ozono e sul biossido di azoto.

La scelta delle sale oggetto della ricerca, a seguito dei diversi sopralluoghi effettuati in loco e grazie alla disponibilità ed ai suggerimenti offertici dalla Dott.ssa Giuliani, Direttrice della Biblioteca Classense, è stata dettata dalla possibilità di poter analizzare ambienti confinati eterogenei tra loro per geometrie, tipologia di areazione, frequentazione di pubblico ed esposizione. Per quanto riguarda, invece, la scelta della posizionamento degli strumenti di misura negli ambienti interni si è cercato di: collocare gli strumenti alla quota della cosiddetta "altezza respiro" (1.50 – 2 m); rispettare le esigenze espositive della Biblioteca; evitare zone con fenomeni di stratificazione dell'aria e nel contempo sistemare gli strumenti in zone non facilmente accessibili al pubblico per evitare cause perturbanti accidentali. Inoltre, essendo il complesso edilizio piuttosto esteso, costituito da più corpi edificati in diversi periodi, per tener conto dell'incidenza delle caratteristiche geometriche e termofisiche dell'involucro edilizio sono state individuate quattro sale, caratterizzate da esposizione e architettura differenti, per di più contenenti opere con le medesime esigenze conservative. In virtù della distinzione proposta dalla norma UNI 10586:1997, nel corso di questo studio sono stati considerate diverse tipologie di sale; in particolare la Sala dei Santi Padri, la Sala Dantesca e l'Aula Magna sono adibite alla conservazione dei documenti e sono accessibili solo dal personale autorizzato, mentre l'Ex Refettorio è attualmente utilizzato come sala di lettura, aperta agli utenti della Biblioteca ed al pubblico. Prima di procedere con la campagna di monitoraggio sono stati, infatti, eseguiti diversi sopralluoghi per individuare i punti più rappresentativi all'interno del complesso edificale della Biblioteca, tenendo presente gli obiettivi che ci eravamo posti per la campagna di misure. Per confrontare, infatti, i dati di concentrazione di NO₂ e O₃ degli ambienti interni con quelli esterni sono stati posizionati campionatori passivi sia nella Sala dei Santi Padri (per la misura indoor) sia in Via Chartres (per la misura outdoor), presso il largo su cui affaccia la sala stessa.

La scelta dell'intervallo di tempo è legata soprattutto agli scopi per i quali si esegue il programma di misurazione: le misurazioni in continuo hanno lo scopo di evidenziare l'entità delle variazioni orarie, giornaliere o stagionali delle singole grandezze. In questa ricerca, per soddisfare gli obiettivi preposti ed i tempi ristretti di realizzazione, si è optato per controllare l'andamento delle grandezze ambientali in un periodo specifico, in cui si

possono avere problemi connessi con il verificarsi di condizioni particolari. Secondo quanto suggerisce la norma UNI 10829:1999, occorre eseguire le misurazioni nell'intervallo di tempo oggetto di studio e comunque per un arco di tempo non minore di 15 giorni. Inoltre, quando una ricerca non può durare per un intervallo di tempo che risulti statisticamente significativo di tutte le condizioni, dovrebbe almeno documentare uno o più esempi delle principali condizioni differenti, per comprendere essenzialmente la natura del problema (Camuffo, 1998). Sulla base di quanto appena detto, la campagna di monitoraggio è stata svolta nel periodo compreso dal 21 luglio al 7 agosto 2014, per un totale di 17 giorni di acquisizione. In particolare, in questo arco temporale sono state eseguite sia le misure continuative con termoigrometri e campionatori passivi, sia le misure istantanee, con anemometro, termocamera e luxmetro. Così facendo, è stato possibile descrivere il microclima e la qualità dell'aria rappresentativi di un medesimo lasso temporale sulla base delle molteplici informazioni ricavate con differenti strumenti. Nel pomeriggio di lunedì 21 luglio sono stati posizionati i termoigrometri in tutte le sale della Biblioteca ed i campionatori passivi di NO₂, sia all'interno che all'esterno (Via Chartres). Il giorno seguente è stato invece installato il campionatore passivo per NO₂ presso la stazione ARPA di Rocca Brancaleone, grazie alla collaborazione del Dirigente Responsabile di Servizio Sistemi Ambientali, Dott.ssa Patrizia Luciali, e del Responsabile della Rete di Monitoraggio della sezione provinciale di Ravenna, Dott.ssa Deborah Valbonetti. Il lunedì successivo, 28 luglio, oltre a rilevare le misure di illuminamento in tutte le diverse sale, sono stati posizionati due campionatori passivi per O₃, uno nella Sala dei Santi Padri e uno presso largo Chartres, considerando i diversi tempi di esposizione necessari per la determinazione della concentrazione degli inquinanti gassosi mediante i campionatori passivi, come illustrato dettagliatamente nel seguito. Infine, i giorni 4 e 7 agosto sono state eseguite le indagini anemometriche e termografiche.

Di seguito, in tabella 3-1, è riportata una sintesi del calendario di campionamento con le tappe fondamentali della campagna di monitoraggio.

Tabella 3-1: calendario delle attività di monitoraggio svolte.

Giorno	Sito di campionamento	Attività svolte
21 luglio	Sala Dantesca	INIZIO CAMPAGNA DI MONITORAGGIO
	Sala dei Santi Padri	
	Aula Magna	Installazione termoigrometri
	Ex Refettorio	Installazione campionatori passivi per
	Cortile di Via Chartres	NO ₂
22 luglio	Rocca Brancaleone	Installazione campionatore passivo per NO ₂
28 luglio	Sala Dantesca	Indagini per illuminamento mediante luxmetro
	Sala dei Santi Padri	
	Aula Magna	Installazione Campionatori passivi per O ₃
	Ex Refettorio	
	Cortile di Via Chartres	
4 agosto	Sala Dantesca	Indagini anemometriche
	Sala dei Santi Padri	
	Aula Magna	Rimozione campionatori passivi per NO ₂ e O ₃
	Ex Refettorio	
	Cortile di Via Chartres	
5 agosto	Rocca Brancaleone	Rimozione campionatore passivo per NO ₂
7 agosto	Sala Dantesca	FINE CAMPAGNA DI MONITORAGGIO
	Sala dei Santi Padri	
	Aula Magna	Indagine termografiche/anemometriche
	Ex Refettorio	
	Cortile di Via Chartres	Rimozione termoigrometri

3.1.1 Area di studio

La Biblioteca Classense si colloca nell'area urbana della città di Ravenna, situata nella regione Emilia Romagna, sul mare Adriatico.



Figura 3-1: localizzazione dell'area di studio. Immagini da Google Earth (data di accesso 07/11/2014).

Le condizioni meteorologiche e il clima della regione sono fortemente influenzate dalla conformazione topografica della pianura padana: la presenza delle montagne su tre lati rende questa regione una sorta di “catino” naturale in cui l'aria tende a ristagnare. Alcune sostanze, a seconda delle caratteristiche dell'atmosfera, possono rimanere in aria per periodi anche molto lunghi. Prima di illustrare gli ambienti oggetto di studio in questa ricerca, è opportuno evidenziare alcuni aspetti del clima locale, dal momento che, come spiegato precedentemente, per affrontare lo studio del microclima di ambienti interni non si può prescindere da quello esterno.

Il clima della Provincia di Ravenna presenta le caratteristiche tipiche del clima subcontinentale nelle aree interne, seppur risentendo di un'influenza marina man mano che ci si avvicina alla costa. Per poter descrivere il contesto climatico in cui si è svolta la ricerca, oltre a riportare nel capitolo dei risultati, i valori ricavati dalle strumentazioni adoperate, si riportano alcuni andamenti meteorologici (T, RH e classi di stabilità atmosferica) registrati nel 2013 nella Provincia di Ravenna⁴⁴. Difatti, l'ambiente in cui gli inquinanti di diversa origine si diffondono e possono subire trasformazioni chimico-fisiche è detto strato di confine planetario (*Planetary Boundary Layer, PBL*). In generale, le precipitazioni possono influenzare i processi di deposizione e rimozione umida degli

⁴⁴ Dati ricavati dal Sistema Dexter, offerto da Arpa Emilia Romagna. È un'applicazione realizzata per consentire un accesso facilitato all'archivio dei dati del Servizio IdroMeteorologico. È costituito da un'interfaccia molto intuitiva che consente di scegliere la stazione, la variabile di interesse e l'intervallo temporale.

inquinanti; elevate e basse temperature possono essere associate, rispettivamente, a elevati livelli di ozono e condizioni di inversione termica. Di seguito si riportano i grafici ricavati dal sistema Dexter per le variabili di temperatura, umidità relativa e classi di stabilità atmosferica:

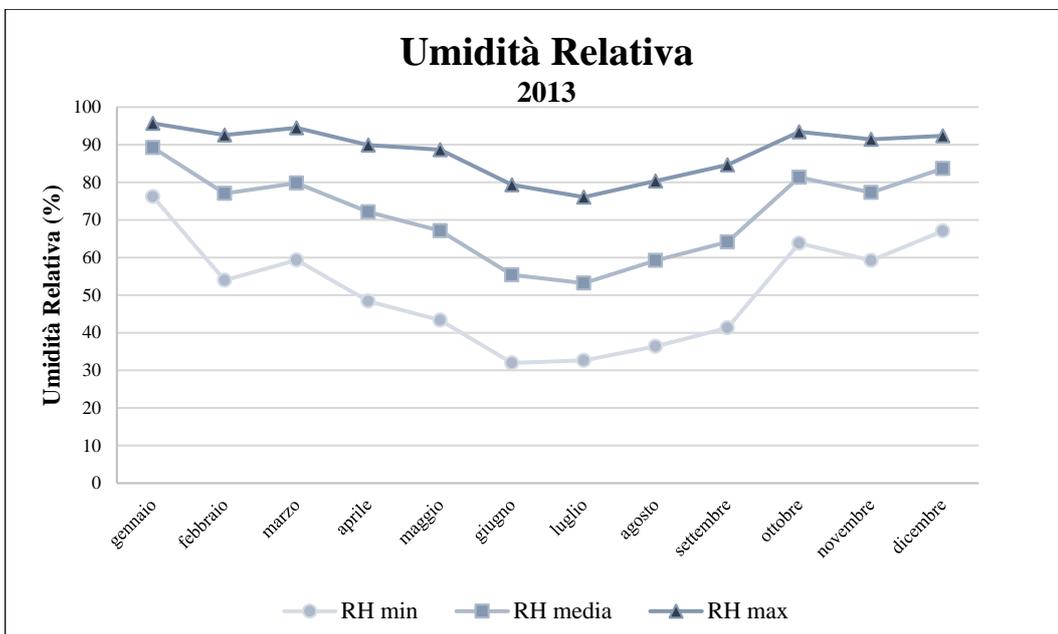


Grafico 3-1: andamento umidità relative minime, medie e massime registrate nel 2013, nella stazione di Ravenna Urbana (longitudine 12.20° E - latitudine 44.41° N). Dati presi da http://www.arpa.emr.it/sim/?osservazioni_e_dati/dexter.

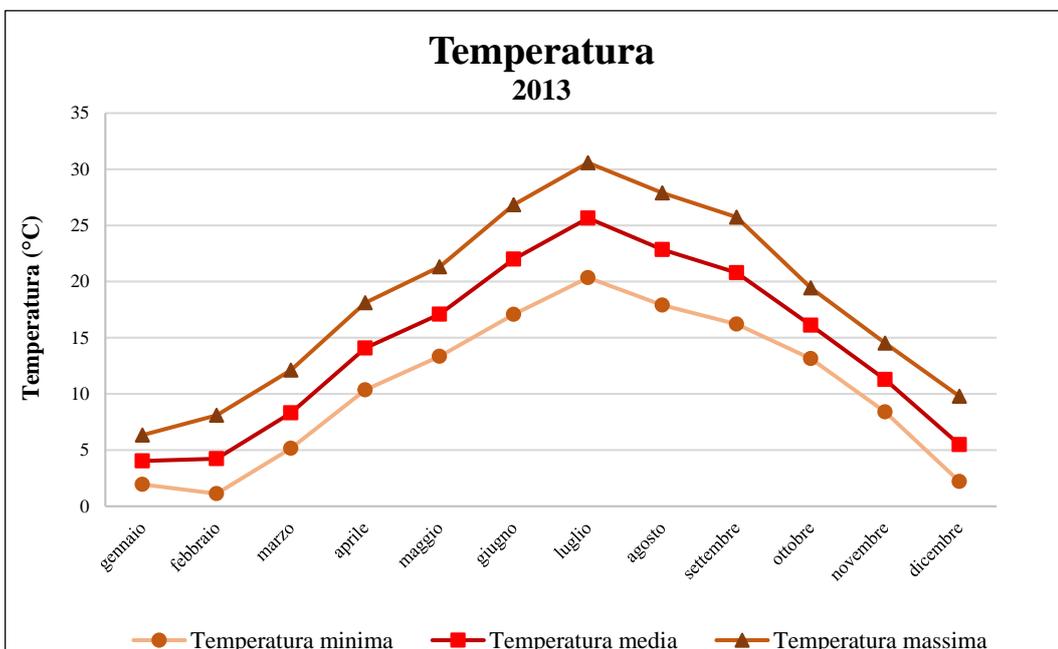


Grafico 3-2: andamento temperature minime, medie e massime registrate nel 2013, nella stazione di Ravenna Urbana (longitudine 12.20° E - latitudine 44.41° N). Dati presi da http://www.arpa.emr.it/sim/?osservazioni_e_dati/dexter.

La distribuzione della velocità dei venti indica un valore inferiore a 3 m/s per la maggior parte dell'anno. Le direzioni più frequenti sono Ovest-NordOvest e NordOvest; inoltre, nella stagione estiva, a Ravenna risulta evidente un'influenza delle brezze di mare con direzione E-SE (ARPA, 2013).

Le condizioni di stabilità atmosferica⁴⁵ e l'altezza dello strato di rimescolamento, invece, sono parametri che definiscono i processi di mixing e diffusione di qualsiasi inquinante emesso. Osservando i dati pubblicati nel Rapporto sulla Qualità dell'Aria della Provincia di Ravenna per l'anno 2013, si nota un aumento delle situazioni instabili (A e B) durante la stagione estiva, ed in particolare nei mesi di giugno e luglio; mentre nel periodo invernale sono prevalenti le condizioni neutre (D) o stabili (E ed F+G).

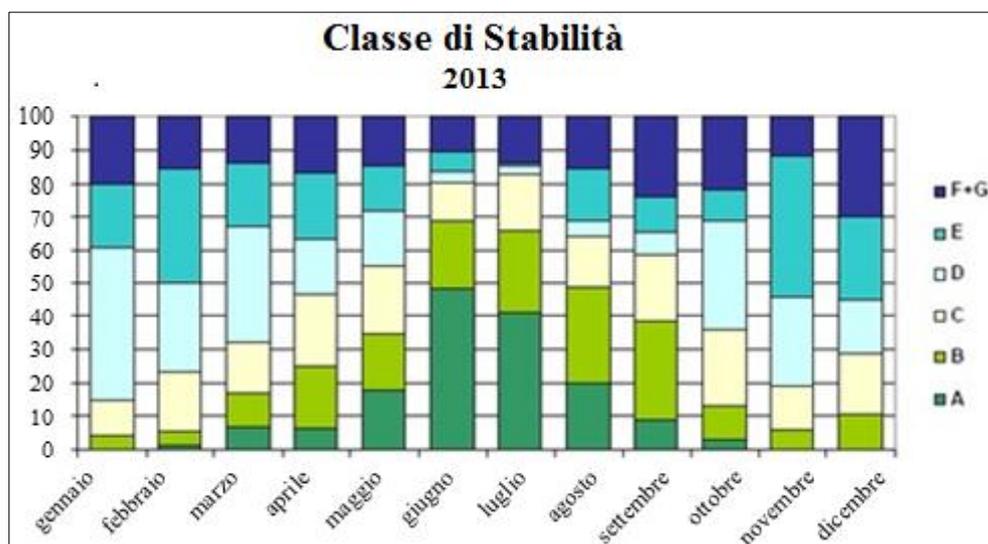


Grafico 3-3: andamento delle classi di stabilità stimate da Calmet per il 2013, nella stazione di Ravenna Urbana (longitudine 12.20° E - latitudine 44.41° N). Da (ARPA, 2013).

In inverno, le temperature più basse e la minore insolazione contribuiscono al mantenimento della condizione di inversione termica; in estate, invece, temperature più elevate e un maggior numero di ore di insolazione favoriscono il rimescolamento e la condizione di stabilità si mantiene per un esiguo numero di ore rispetto all'inverno, sebbene con frequenze percentuali superiori. Inoltre, allo stesso tempo, anche i cicli giorno-notte influenzano la stabilità atmosferica: ad esempio, le condizioni di stabilità si verificano per lo più nelle ore notturne (in inverno dalle ore 18 alle ore 8, in estate dalle ore 21 alle ore 5). Per quanto riguarda le altezze di rimescolamento, in estate si registrano le massime, in concomitanza con la maggior frequenza di situazioni instabili; in inverno, viceversa, quelle minime (ARPA, 2013).

⁴⁵ In appendice.

Il territorio ravennate, fino alla fine degli anni '50, aveva una vocazione prevalentemente agricola, a cui, nel corso degli anni, si è in parte sostituita una crescente industrializzazione sviluppatasi alla sinistra del Candiano. La costruzione di grandi insediamenti industriali, alcuni dei quali ancora attivi, si deve alla scoperta di un grosso giacimento di gas naturale al largo della costa romagnola. Già nei primi anni '60 furono avviati i primi impianti per la produzione di gomme, lattici di gomma, fertilizzanti, cloruro di polivinile. Nel tempo, l'area industriale di Ravenna si è ampliata e nel contempo si è realizzato il potenziamento del porto della città.

Senza dubbio, lo sviluppo del polo industriale e portuale ha consentito un potente motore di sviluppo economico insieme con problemi di impatto ambientale (Rubbi, 2010). Invero dagli anni '70 fino ad oggi, la politica ambientale intrapresa dalla regione, dalle attività produttive e dalle pubbliche amministrazioni locali ha consentito lo sviluppo di una rete di monitoraggio conforme ai nuovi requisiti nazionali⁴⁶ e regionali⁴⁷. I punti di campionamento della Rete regionale di monitoraggio della Qualità dell'Aria (RQA), terminata nella Provincia di Ravenna nel 2009, sono destinati alla verifica dei limiti per la protezione della salute umana⁴⁸ e per la protezione degli ecosistemi e/o della vegetazione⁴⁹.

⁴⁶ D.Lgs. 155/2010

⁴⁷ DGR 2001/2011

⁴⁸ Tipologia di stazioni: Traffico Urbano; Fondo Urbano; Fondo Urbano Residenziale; Fondo Sub Urbano;

⁴⁹ Tipologia di stazioni: Fondo rurale; Fondo Remoto.



Figura 3-2: localizzazione dei siti interessati dalla ricerca, posizionati nell'area urbana di Ravenna. Da Google Earth (data di accesso 07/11/2014).

La stazione presso cui è stato posizionato un campionatore passivo Passam ai fini del confronto tra inquinamento indoor e outdoor, ossia Rocca Brancaleone, è definita come stazione di monitoraggio locale per il controllo e la verifica degli impatti prevalentemente riconducibili all'area industriale/urbana. In particolare, la stazione di Rocca Brancaleone



Figura 3-3: foto della stazione di monitoraggio di Rocca Brancaleone con analizzatori automatici per la misura delle concentrazioni per ARPA e campionatore passivo installato per questa ricerca (nel box in alto a sinistra).

(Figura 3-3) è adibita per la misura dei seguenti inquinanti: PM₁₀, NO_x, CO, BTX, SO₂, O₃.

Per quanto riguarda la qualità dell'aria, si riportano alcune considerazioni sulle concentrazioni rilevate per l'anno 2013 dalla Rete di monitoraggio dell'ARPA (ARPA, 2013):

· **SO₂**: le concentrazioni rilevate sono contenute e notevolmente inferiori ai livelli previsti dalla normativa (<14µgm⁻³). Negli ultimi 7 anni anche il valore più restrittivo previsto per questo inquinante (ossia il *livello critico invernale per la protezione della vegetazione*⁵⁰) non è stato raggiunto in nessuna postazione.

⁵⁰ Media dei dati orari a partire dal 31 ottobre al 1° marzo pari a 20 µgm⁻³.

- **CO:** il *valore limite per la protezione della salute umana* (media massima giornaliera su 8 ore pari a $10 \mu\text{g m}^{-3}$) è ampiamente rispettato in tutte le stazioni della Provincia ed i valori mostrano un trend in continua diminuzione dal 2003. L'andamento stagionale mostra concentrazioni leggermente superiori durante l'inverno, soprattutto intorno alle 8 e alle 20, in corrispondenza degli orari di maggior traffico.
- **C₆H₆:** le concentrazioni medie annue sono inferiori ai limiti normativi (per la *protezione della salute umana* di $5 \mu\text{g m}^{-3}$) con valori stabili negli ultimi 5 anni. Considerando la cancerogenicità del composto e le concentrazioni significative che si possono rilevare durante il periodo invernale, a scopo cautelativo, questo inquinante continua ad essere rilevato in continuo in tutte le stazioni dell'area urbana della città e con monitoraggio orario per le stazioni per il traffico. In particolare, questo inquinante è misurato presso la stazione di Rocca Brancaleone anche con i campionatori passivi con periodo di misura settimanale. Negli ultimi cinque anni, il dato risulta stabilizzato su valori contenuti e negli anni si nota una progressiva diminuzione.
- **C₇H₈ e C₈H₁₀:** la normativa nazionale non fissa valori limite di qualità dell'aria ambiente per toluene e xileni, mentre l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) suggerisce come *valori guida* $260 \mu\text{g m}^{-3}$ per il toluene e $4800 \mu\text{g m}^{-3}$ per gli xileni, che corrispondono alle concentrazioni al di sopra delle quali si possono riscontrare effetti sulla salute della popolazione non esposta per motivi lavorativi. Le concentrazioni, rilevate a Ravenna, risultano comunque al di sotto di tali valori. A partire dal 2009, i livelli sono in progressiva diminuzione.
- **PM₁₀:** i valori misurati superano il *limite giornaliero* $50 \mu\text{g m}^{-3}$ da non superare più di 35 volte in un anno) imposto dalla normativa nazionale, mentre il limite della media annuale è rispettato. In particolare, per la stazione di Rocca Brancaleone, sono stati registrati 42 superamenti nel 2013. Infine, il limite imposto dall'OMS di $20 \mu\text{g m}^{-3}$ relativo alla *media annuale*, è superato in tutte le stazioni, così come il limite di $50 \mu\text{g m}^{-3}$ come *concentrazione massima sulle 24 ore*. In tutte le stazioni sono stati misurati valori particolarmente elevati a gennaio e a dicembre con concentrazioni medie mensili superiori a $40 \mu\text{g m}^{-3}$.
- **PM 2.5:** le concentrazioni misurate garantiscono il rispetto del limite relativo alla media annuale in tutte le stazioni. Mentre non è rispettato il valore guida consigliato dall'OMS di $10 \mu\text{g m}^{-3}$. Così come per il PM₁₀ e molti altri inquinanti, la stagione

più critica è quella invernale, quando le concentrazioni di PM_{2.5} rappresentano l'80% di quelle di PM₁₀

- **IPA:** il *valore obiettivo come media annuale* del benzo(a)pirene di 1 ngm⁻³ è rispettato nel 2013. Resta comunque una certa criticità per quanto riguarda questo inquinante, essendo classificato come cancerogeno. Anche in questo caso, si evidenzia una stagionalità che presenta concentrazioni maggiori nel periodo invernale, mentre nel periodo primaverile-estivo spesso i valori sono inferiori alla sensibilità analitica. Altri composti invece, come il benzo[b+j]fluorantene, classificato come possibile cancerogeno, indicano concentrazioni più elevate.
- **Metalli:** i valori medi dei metalli quali arsenico, cadmio, nichel e piombo sono inferiori ai limiti di legge.
- **Diossine, furani e policlorobifenili:** i *valori medi* dei composti analizzati risultano inferiori alle concentrazioni limite consigliate dalla Commissione Consultiva Tossicologica Nazionale.
- **NO₂:** la normativa impone diversi limiti per questo inquinante; per l'anno 2013 sono stati rispettati sia quelli di breve, sia quelli di lungo periodo, in tutte le postazioni, con una media annuale di 30 µgm⁻³ per la stazione di Rocca Brancaleone. Le concentrazioni misurate nelle stazioni di tutta la Provincia risultano inferiori al valore limite annuale di 40 µgm⁻³ e si evidenzia un trend di diminuzione a partire dal 2008. Nonostante i limiti siano rispettati da diversi anni, il controllo di questo inquinante è molto capillare, dal momento che è necessario considerare le sue interazioni con NO_x, PM₁₀ e O₃. Questo inquinante è misurato in continuo da due stazioni, una di fondo rurale e una di fondo urbano. I valori più elevati si riscontrano nella stazione di fondo rurale (Ballinara).

Il biossido di azoto è caratterizzato da escursioni sia quotidiane, sia stagionali: l'andamento mensile mostra una marcata stagionalità, con concentrazioni maggiori durante i mesi invernali; l'andamento giornaliero, calcolato mediante il giorno tipico⁵¹, indica un marcato incremento delle concentrazioni dalle ore 7 alle 10 e dalle 17 alle 21 nei mesi invernali.

In riferimento a questa ricerca si riportano (grafico 3-4) gli andamenti temporali di NO_x, NO₂ e NO misurati e fornitici da ARPA (Ravenna) per la stazione di Rocca

⁵¹ L'andamento del giorno tipico si calcola facendo la media dei valori registrati per la stessa ora per un certo intervallo temporale (ad esempio, mesi invernali e mesi estivi), ripetendo quest'operazione per tutte le 24 ore.

Brancaleone relativi al periodo del monitoraggio eseguito presso le sale della Classense.

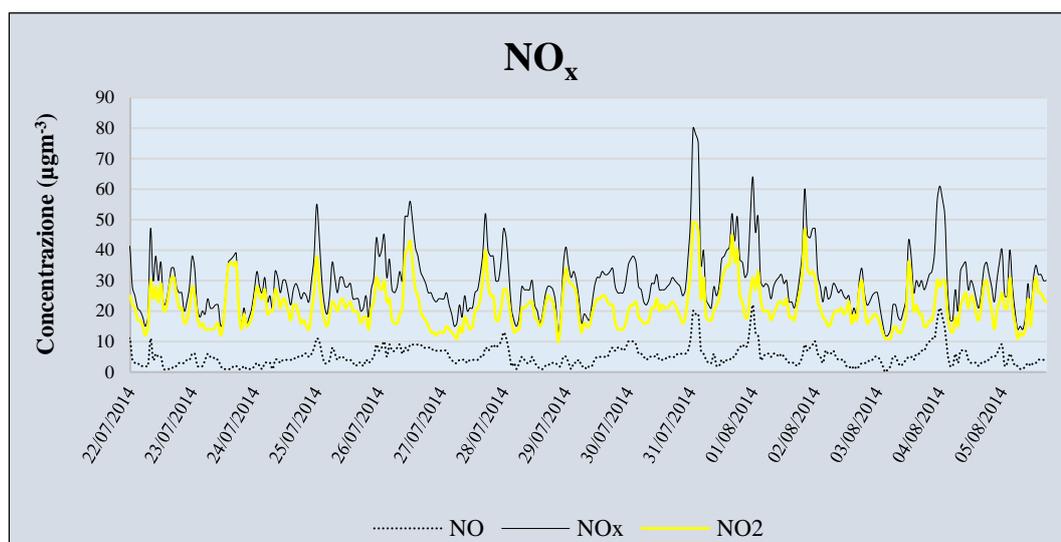


Grafico 3-4: andamento temporale delle concentrazioni degli ossidi di azoto (NO_x , NO_2 e NO) registrate da ARPA, per la stazione di Rocca Brancaleone, relative al periodo in cui è stata eseguita la campagna di monitoraggio nelle sale della Biblioteca (22 luglio – 5 agosto 2014).

- **O₃**: le concentrazioni misurate rilevano valori superiori alla soglia di informazione ($180 \mu\text{gm}^{-3}$) e al valore obiettivo per la protezione della salute umana e della vegetazione ($120 \mu\text{gm}^{-3}$). In particolare, la stazione di Rocca Brancaleone, insieme con altre due di fondo, mostrano i valori di concentrazione maggiori. Ciò che appare evidente dal trend dei dati è una forte interazione tra i livelli di ozono e la meteorologia estiva. L'ozono, come già esposto in precedenza, è un inquinante secondario generato da processi fotochimici, per cui è necessario agire sui suoi precursori, talvolta generati anche a grandi distanze. Pertanto gli andamenti dell'O₃ sono connessi agli andamenti di altri inquinanti primari, come NO_2 e VOC. Ne risulta una marcata stagionalità, che fa sì che i livelli più significativi si riscontrino in corrispondenza dei mesi primaverili ed estivi ed uno spiccato andamento giornaliero, con valori massimi durante le ore di maggiore insolazione (Grafico 3-5).

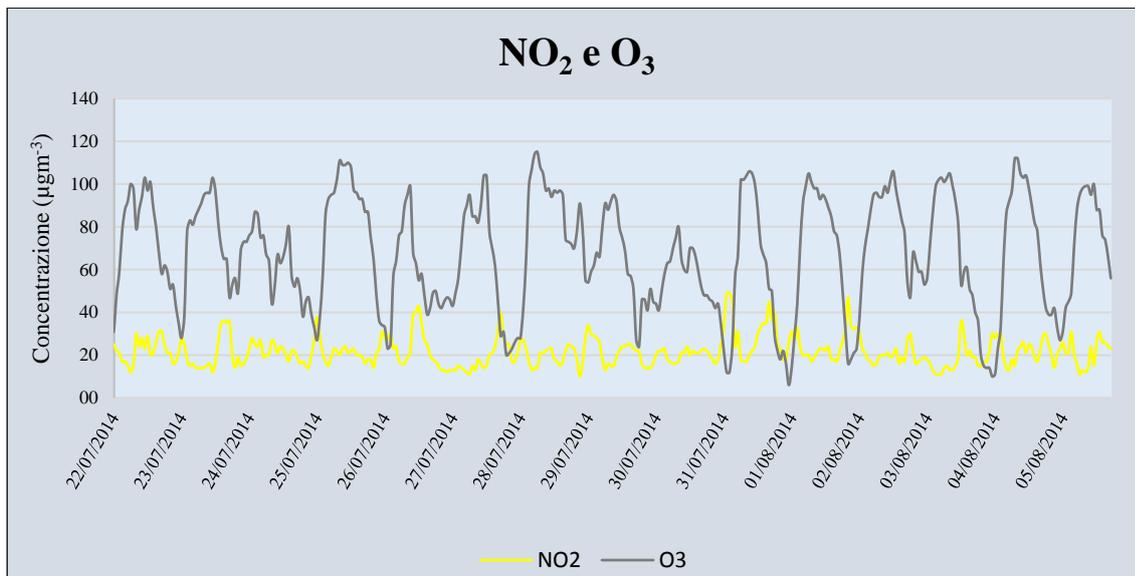


Grafico 3-5: andamento temporale delle concentrazioni di O₃ e NO₂ registrate da ARPA, per la stazione di Rocca Brancaleone, relative al periodo in cui è stata eseguita la campagna di monitoraggio nelle sale della Biblioteca (22 luglio – 5 agosto 2014).

Infatti, sulla base del calcolo del giorno tipico, il minimo delle concentrazioni si manifesta quando l'ozono prodotto precedentemente ha raggiunto il suo massimo grado di diffusione (verso le ore 7), mentre il massimo si verifica quando c'è maggiore insolazione, dal momento che si tratta di un inquinante che si forma mediante reazioni fotochimiche (Grafico 3-5). Nell'anno 2013, inoltre, non è mai stata raggiunta la soglia di allarme (240 µgm⁻³), ma si sono registrati, nel periodo dal 24 luglio al 6 agosto, un totale di sei valori maggiori della soglia di informazione 180 µgm⁻³, in tre diverse stazioni, compresa Rocca Brancaleone.

In sintesi, quindi, se in passato erano per lo più gli inquinanti primari a destare particolare preoccupazione, ora l'attenzione coinvolge anche altri composti. È necessario tener presente che inquinanti primari come (NO₂, VOC, SO₂), spesso concorrono alla formazione degli inquinanti secondari, a prescindere dal fatto che loro concentrazioni si attestino a livelli inferiori ai limiti stabiliti.

Al centro dell'area urbana di Ravenna, a circa 4 km dalla stazione di Rocca Brancaleone si colloca la sede della Biblioteca Classense, nei cui spazi, grazie alla gentile disponibilità ed al prezioso contributo della Dott.ssa Giuliani e dei suoi collaboratori, sono state eseguite le analisi per condurre questo studio. La sede selezionata per questa ricerca è ospitata in un edificio storico ed è affacciata su zone ad alto traffico veicolare, da un lato, a traffico limitato, dall'altro.

Per poter comprendere il contesto di studio è fondamentale conoscere il sito ove si è operato; nel nostro caso, essendo una struttura edificata nel XVI secolo, è necessario

ricondere le tappe fondamentali della sua formazione fino a giungere alla descrizione, seppur sintetica, di quella Istituzione che oggi rappresenta un *unicum* per il patrimonio ravennate e non solo.



Figura 3-4: foto area della Biblioteca Classense, con una prospettiva che consente di osservare lo sviluppo fino al secondo livello con Aula Magna e Sale Superiori più elevate. Foto di G. Biserni.

La Classense (Figura 3-4) deve la sua origine e il suo nome di abbazia e biblioteca ai monaci della “Congregazione di monaci Camaldolesi”. Questi, lasciata la loro residenza suburbana di Classe, a seguito della battaglia di Ravenna del 1512, intrapresero la costruzione di quell’abbazia che nel corso dei secoli successivi è valsa a divenire una delle più importanti tra quelle appartenenti all’ordine camaldolese. Diversi sono stati gli ampliamenti e le modifiche apportate, soprattutto tra il XVII e il XVIII secolo, che si spingono fino ai giorni nostri e che hanno definito e definiscono, oltre alla successione nel tempo di stili architettonici diversi, l’attuale imponente fabbricato che si estende sopra un’area di circa ventiduemila metri quadrati. È opportuno sottolineare che in questa sede sono state riportate sintetiche descrizioni di alcuni ambienti della Biblioteca Classense, con particolare riferimento alle sale oggetto di tale ricerca.

L’abbazia originaria è stata teatro, nel tempo, di diversi cambiamenti d’uso: da quando nel 1798 venne soppressa a seguito delle leggi napoleoniche, è divenuta sede di istituzioni bibliotecarie, museali e scolastiche della città di Ravenna. Nei secoli, si è sempre contraddistinta per essere il fulcro e punto di riferimento nelle esperienze culturali locali e nazionali. Le sue origini come libreria sono da ricondurre all’opera di Pietro Bagnoli da

Bagnacavallo, un abate che insediò una piccola libreria che annoverava più di cinquanta opere, verso la fine del XVI secolo. Fino al XVIII secolo, continuò un afflusso di opere, allorché l'abate Pietro Canneto determinò un rilancio della biblioteca mediante diverse operazioni di acquisizioni librarie (Fabbri, 1981). Nel 1730, anno della sua morte, la biblioteca annoverava circa dodicimila volumi. Con un editto napoleonico, emanato nel 1798, fu sancita la soppressione degli ordini religiosi, con la conseguente chiusura delle biblioteche monastiche. A questo evento seguì una breve parentesi austriaca, che conferì nuovamente proprietà agli ordini religiosi fino a che, verso la fine del 1800, la Repubblica Cisalpina portò ad una nuova soppressione degli ordini. Essendosi susseguiti, nel tempo, diverse amministrazioni, risultò una perdita di integrità di molti fondi librari fino a quando, nel 1803, la Classense fu eletta Biblioteca Civica della città di Ravenna. Ebbe così inizio un periodo in cui confluirono volumi e fondi librari dalle altre biblioteche ecclesiastiche e dalle librerie private. L'accumulo di libri creò da subito seri problemi organizzativi, che costrinsero i bibliotecari incaricati ad affrontare i temi legati alla gestione dei libri, nonché alla loro conservazione (Giuliani, 2001). Si rese necessario inventariare per conoscere i libri ed ospitarli in condizione di sicurezza: fu Olivo Orioli, primo bibliotecario laico, ad occuparsene. Lo stesso, di fronte ad alcune lacune bibliografiche in ambito scientifico, iniziò una politica di acquisti che ebbe seguito solo con la nomina di Primo Uccellini. Nei primissimi anni del Novecento, grazie all'intervento di Santi Muratori, bibliotecario, iniziò l'acquisto di una vasta collezione di libri danteschi, presso Leo Olschki;⁵² seguì un ulteriore arricchimento grazie alle donazioni di cittadini privati, come Corrado Ricci, Luigi Rava e Manara Valgimigli.

A seguito della richiesta dell'abate Pietro Canneti e del bibliotecario Mariangelo Fiacchi, l'architetto Giuseppe Antonio Soratini iniziò ad erigere la nuova Libreria. A Soratini è attribuita anche la facciata barocca all'ingresso del primo chiostro (detto minore), mentre al toscano Giulio Morelli si deve il progetto del secondo chiostro (detto grande), risalente all'inizio del XVII secolo. Dal chiostro minore, invece, si accede al Vestibolo del Refettorio (Figura 3-5), dove vi sono telamoni e lavabi sormontati dalle statue raffiguranti San Romualdo e San Benedetto, le cui effigi si ripetono in molti ambienti dell'edificio e della porta d'ingresso.

⁵² Leo S. Olschki (Prussia, 1861 - Svizzera, 1940) fondò a Verona la casa editrice omonima.

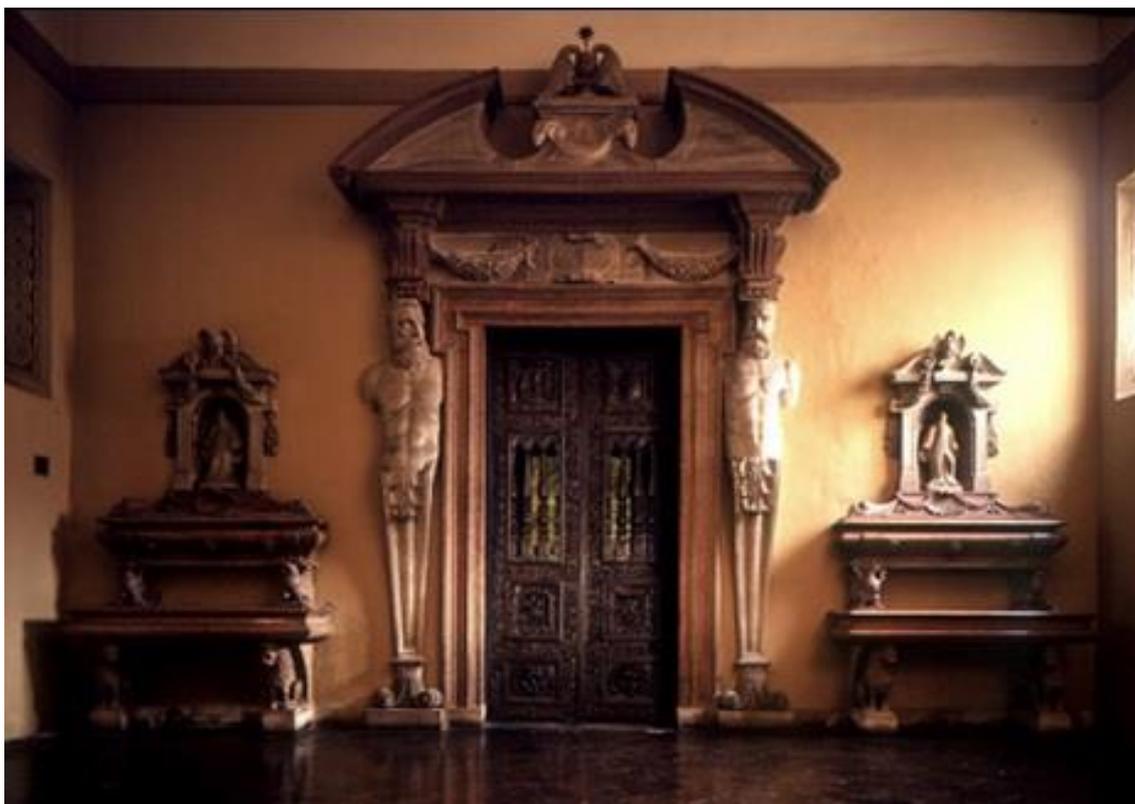


Figura 3-5: foto del *Vestibolo del Refettorio*. Da <http://www.classense.ra.it/> (data di accesso 9/11/2014).

Si accede poi al Refettorio (Figura 3-6) denominato comunemente “Sala Dantesca”, perché dal 1921 vi si svolgono i cicli annuali delle *Lecturae Dantis*.



Figura 3-6: foto dell'*Ex Refettorio*. Da <http://www.classense.ra.it/> (data di accesso 9/11/2014).

Al suo interno, sulla parete opposta all'entrata, compare un grande dipinto realizzato dal ravennate Luca Longhi, *Le nozze di Cana* (1580), dove sono raffigurati attorno alla tavola imbandita, in occasione del banchetto nuziale, i ritratti di alcune personalità culturali del ravennate – da Pomponio Spreti, patrizio e letterario, a Pietro Bagnari, abate camaldolese, da Girolamo Rossi, medico e storico, all'autoritratto dello stesso artista accompagnato dai figli, anch'essi pittori. Sulla volta della sala, si osserva sempre ad opera di Longhi, la *Visione di San Romualdo*. La struttura del primo piano si sviluppa attorno all'imponente seicentesco Corridoio Grande, al cui interno il pittore Giovanni Battista Barbiani utilizza



Figura 3-7: foto del *Vestibolo dell'Aula Magna*. Da <http://www.classense.ra.it/> (data di accesso 9/11/2014).

intere pareti a celebrare visualmente regole e Santi camaldolesi, invitando al silenzio chiunque percorra quegli spazi⁵³. Dal Corridoio Grande si affaccia il vestibolo d'accesso alla biblioteca monastica, ossia alla Libreria, oggi comunemente detta Aula Magna.

Due rampe di scale (Figura 3-7) incorniciano il complesso, eretto nel 1747 da Domenico Piò a memoria di Guido Grandi. Ad enfatizzare la solennità dell'ambiente, sopra alla porta d'accesso all'Aula Magna, recita il motto seneciano, rovesciato: *in studium non in spectaculum*⁵⁴.

⁵³ “Et tacet et clamat vocalis/ pagina quidnam/in muti semper personat/ore? Tace”.

⁵⁴ Lucio Anneo Seneca (Cordoba, 4 a.C – Roma, 65 d.C.), noto come Seneca il giovane è stato un politico, filosofo e poeta esponente dello stoicismo. La frase da cui si prende spunto nell'iscrizione della porta d'ingresso dell'Aula Magna proviene dall'opera i *Dialogi*, costituita da dodici libri. In particolare, nel nono libro *De Tranquillitate animi*, X: “...*Non fuit elegantia illud aut cura, sed studiosa luxuria, immo ne studiosa quidem, quoniam non in studium, sed in spectaculum comparauerant, sicut plerisque ignaris etiam puerilium litterarum libri non studiorum instrumenta, sed cenationum ornamenta sunt...*”. Traduzione: “...non fu fatto di stile o di buona amministrazione quello, ma un'esibizione di lusso per gli studi, anzi non per gli studi, dal momento che l'avevano apprestata non per lo studio ma per l'apparenza, così come per

Questa frase provocatoria ci accompagna all'interno dell'attuale Aula Magna, risultato di ampliamenti e modifiche del primo nucleo della Libreria dell'Abbazia (Figura 3-8). Nel corso dei secoli questa sala fu più volte oggetto di ampliamenti per accogliere nuove acquisizioni librerie. Rivestita con scaffali a doppio ordine intagliati da Fausto Pellicciotti viene edificata tra il 1707 e il 1714 dall'abate Pietro Canneti, tra i fondatori della Biblioteca Classense, che nel tempo arricchì di beni librari rari e preziosi il corpus della Biblioteca e il cui ritratto è posto di fronte al portale d'ingresso dell'Aula Magna.



Figura 3-8: foto dell'Aula Magna. Da <http://www.classense.ra.it/> (data di accesso 9/11/2014).

Gli oli su tela (L'unione della Chiesa

greca con la latina fattasi nel Concilio di Firenze per opera di Ambrogio Traversari e Gregorio IX e il monaco camaldolese Graziano) e l'affresco sul soffitto (La Divina Sapienza che manda la Teologia, la Filosofia e le altre Scienze ad abbattere l'Eresia, l'Ignoranza e lo Scisma) sono opera del pittore marchigiano Francesco Mancini.

Nelle varie fasi di restauro, sempre nel XVIII secolo, furono avviate anche le sopraelevazioni del braccio occidentale del chiostro grande, con ampliamento del terzo piano, intervento questo che vide la direzione di Camillo Morigia. Si giunge così al terzo piano, dove si è svolto parte di questo studio, suddiviso in tre vani contigui (Sala delle Scienze, Sala delle Arti, Sala dei Santi Padri), comunicanti tra loro, attraverso una successione di scaffali a lesene, suddivisi da colonne lignee e sormontate da frontoni intagliati, opera del monaco camaldolese Fausto Pellicciotti, che documentano gli stili architettonici e pittorici del Settecento neoclassico (Domini, 1991). Alcuni di questi spazi erano destinati all'uso del sottostante ginnasio nel corso del XIX, ad esempio si ospitava il Museo di Scienze Naturali. Per un totale di undici sale edificate nella seconda metà del

molti ignari anche di sillabari per l'infanzia i libri non rappresentano strumenti di studio ma ornamento delle sale da pranzo...".

XVIII secolo, dal livello superiore dell'Aula Magna, si accede dapprima alla Sala delle Scienze, edificata nel 1780 su progetto di Morigia, la cui collezione privata è in essa conservata. Si rinvennero, inoltre, diverse vetrine, al cui interno sono conservati strumenti scientifici donati alla biblioteca per lascito testamentario dallo stesso Morigia.



Figura 3-9: foto della *Sala dei Santi Padri* con busto della Guiccioli. Da <http://www.classense.ra.it/> (data di accesso 9/11/2014).

La Sala di Santi Padri (Figura 3-9) oltre alle scansie lignee coeve, alcune delle quali provenienti dalle biblioteche soppresse delle altre grandi abbazie ravennati (San Vitale e Santa Maria in Porto), si impreziosisce del busto in marmo di Teresa Gamba Guiccioli, opera dello scultore Lorenzo Bartolini. In queste sale, spesso nella boiserie, sono inserite, entro apposite cornici, i ritratti di monaci camaldolesi dipinti ad olio su tela e coevi alla sala; le decorazioni sono impreziosite dall'inserimento di due pannelli lignei istoriati "a fuoco" con scena di battaglia e con angeli musicanti e puttini, riconducibili ad un cassone cinquecentesco riutilizzato in occasione delle realizzazioni delle sale.



Figura 3-10: foto della *Sala Dantesca*. Da <http://www.classense.ra.it/> (data di accesso 9/11/2014).

Infine, ultima delle sale superiori, è la Sala Dantesca (Figura 3-10), così chiamata perché, a partire dal 1908, conserva la collezione di tema dantesco appartenuta a Leo S. Olschki, acquistata dal Comune di Ravenna. Il soffitto della sala, decorato con cartigli, citano le terzine dedicate da Dante a Ravenna.

Come già detto, numerose sono state le modifiche apportate alla struttura originaria della Biblioteca: senza dubbio, una trasformazione moderna che ha promosso e soddisfatto le nuove esigenze dell'utenza contemporanea è stata quella avviata dal progetto di Marco Dezzi Bardeschi, grazie alla quale i locali precedentemente adibiti a stalle e cantine sono stati utilizzati come spazi espositivi per ospitare mostre; allo stesso tempo, i dormitori per i novizi al piano ammezzato sono divenuti sede di consultazione. Gli interventi progettuali, inoltre, hanno inteso interrompere l'inclinazione al riuso che aveva portato dal 1903 al 1970, ad "adattare" l'architettura abbaziale a "stabilimento di educazione e istruzione". Queste operazioni, dal restauro, agli ampliamenti, alle modifiche proseguono tuttora: allo scopo di mostrare il rapporto esistente tra la biblioteca storica del passato e quella del presente e del futuro (Domini et al., 2011).

Le collezioni classensi contano circa 800'000 unità bibliografiche⁵⁵ di diversa tipologia: da stampe a manoscritti, da incisioni a mappe etc. e di diversa provenienza: da mercati librari alle altre biblioteche ecclesiastiche della città, da lasciti testamentari a donazioni. Ai fini di una comprensione globale del contesto del presente studio, si inserisce una planimetria generale dell'edificio (Figura 3-11) che ci consente di localizzare gli ambienti oggetto della ricerca condotta:

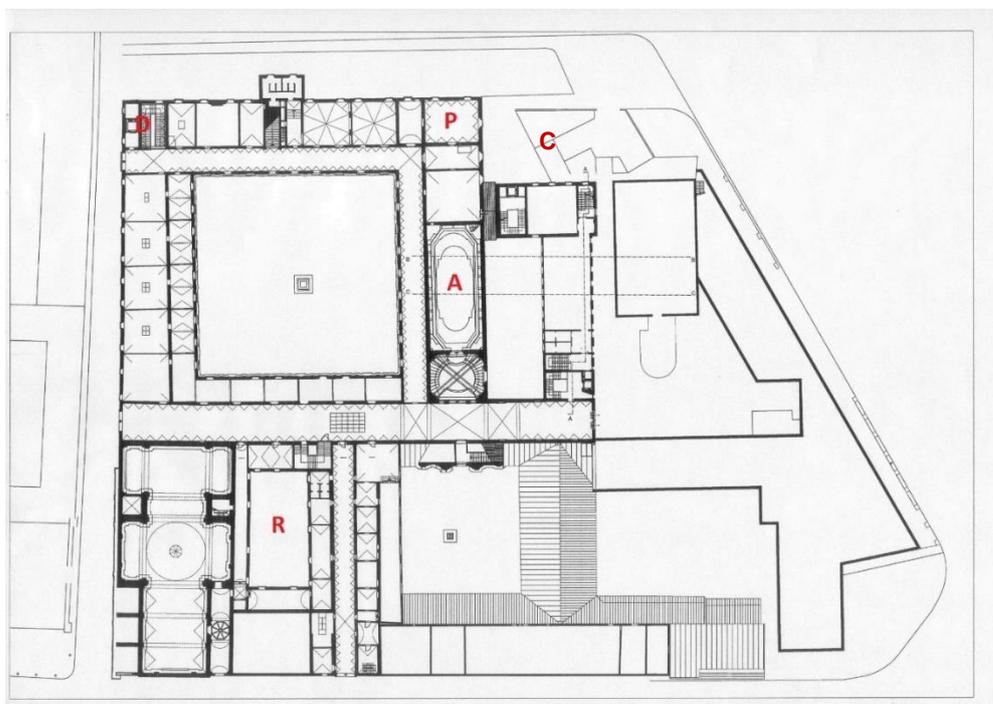


Figura 3-11: planimetria dell'edificio della Classense. Con le lettere si indicano le sale oggetto di studio. R: Refettorio, A: Aula Magna, P: Sala dei Santi Padri; D: Sala Dantesca; C: cortile su Via Chartres. Immagine acquisita tramite il servizio fotografico Biblioteca Classense.

⁵⁵ Di seguito si riportano, in maniera sintetica, alcuni fondi coerenti: Fondo Ricci, costituito da circa 20'000 unità, inerente alla storia dell'arte e alla tutela dei beni culturali a livello nazionale; Fondo Mazzotti, per un totale di circa 8'000 documenti di tema per lo più archeologico e storico; Fondo Rava, attinente per lo più alla storia del periodo risorgimentale con le sue 25'000 unità; Fondo Valgimigli, costituito dalla biblioteca di Manara Valgimigli; Fondo Bertelè, incentrato per lo più sulla storia bizantina e i rapporti tra Occidente e Oriente; Fondo Gambi, riguardante una raccolta libraria e cartografica donata dal geografo Lucio Gambi; Raccolta Olschki: acquistata nei primi anni del '900, costituisce uno dei fondi più completi circa edizioni, traduzione e commenti delle opere di Dante; mentre, tra le ricchezze conservate negli spazi della Classense si ricordano: incunabili, tra i quali *De Oratore* di Cicerone e *Historia Naturalis* di Plinio il Vecchio (I – II); cinquecentine per un totale superiore alle 8'000 edizioni; manoscritti come l'Aristofane; Carteggi del poeta Lord Byron, della contessa Teresa Gamba Guiccioli, di Corrado Ricci, di Luigi Rava, di Santi Muratori, di Manara Valgimigli e tanti altri; collezioni iconografiche, tra stampe e disegni per circa 10'000 unità, documentano, sotto forma cartografica, il territorio ravennate (Morlotti, 2013).

Per maggior dettaglio, si riportano le planimetrie elaborate su AUTOCAD per capire il posizionamento degli strumenti nelle sale oggetto di studio:

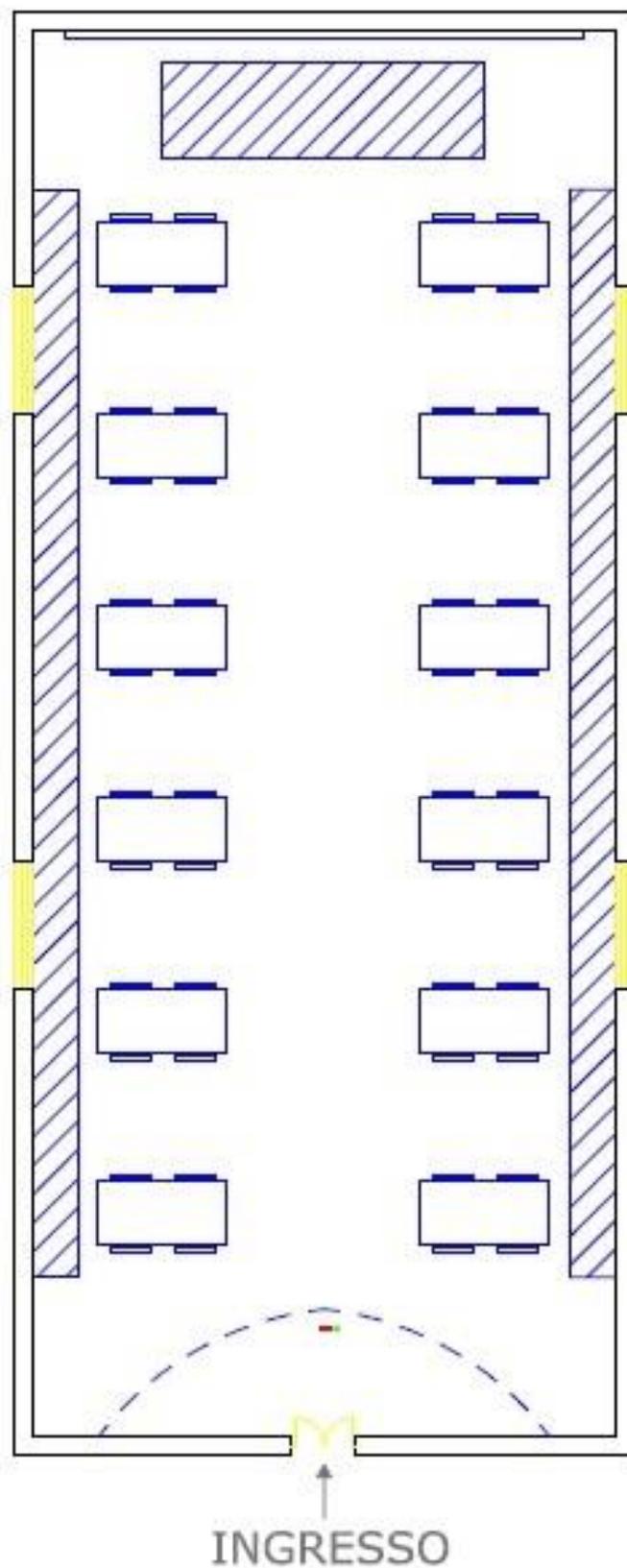


Figura 3-12: planimetria dell'Ex Refettorio: in rosso, è indicato il posizionamento del datalogger per le misure termoisgrometriche e, in verde, il campionatore passivo per la misura dell'NO₂. Lunghezza: 20 m; Larghezza: 9 m; Altezza: 10 m (circa).

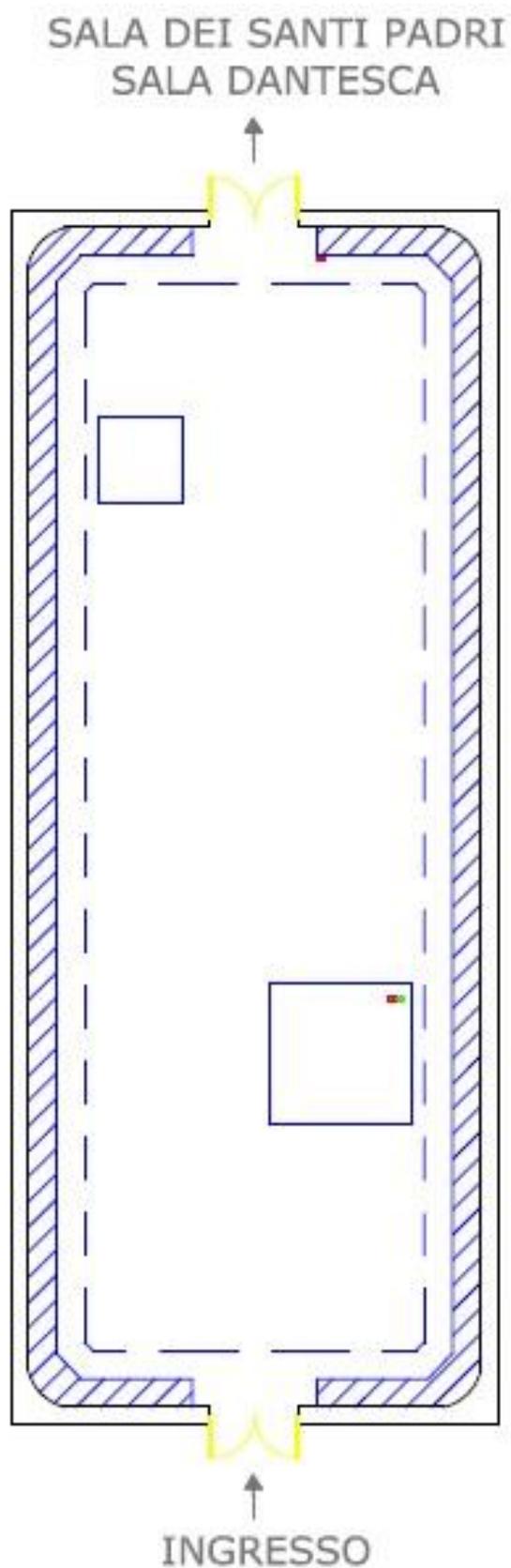


Figura 3-13: planimetria dell'Aula Magna: in rosso, è indicato il posizionamento del datalogger per le misure termoigrometriche e, in verde, il campionatore passivo per la misura dell' NO_2 . Lunghezza: 20 m; Larghezza: 7 m; Altezza: 12 m (circa).

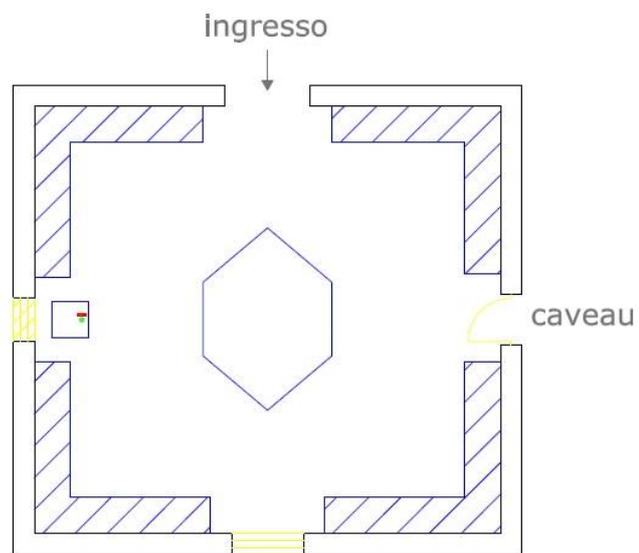


Figura 3-14: planimetria della Sala Dantesca: in rosso, è indicato il posizionamento del datalogger per le misure termoigrometriche e, in verde, il campionatore passivo per la misura dell'NO₂. Lunghezza: 6.5 m; Larghezza: 6 m; Altezza: 6 m (circa).

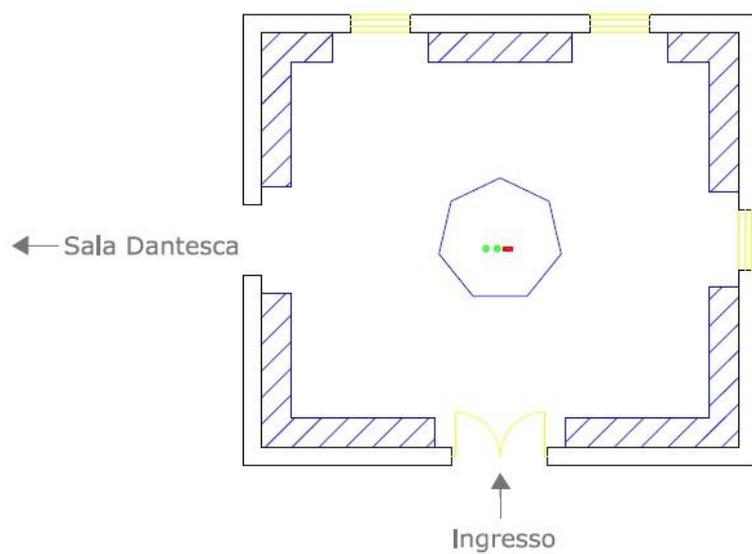


Figura 3-15: planimetria della Sala dei Santi Padri: in rosso, è indicato il posizionamento del datalogger per le misure termoigrometriche e, in verde, i campionatori passivi per la misura dell'NO₂ e dell'O₃. Lunghezza: 8 m; Larghezza: 7m; Altezza: 6 m (circa).

3.1.2 Strumenti di misurazione dei parametri termoigrometrici e degli inquinanti

Per poter soddisfare gli obiettivi progettuali sono stati utilizzati diversi strumenti che, di seguito, saranno descritti con maggior dettaglio. Nella tabella 3-2 si riportano, in maniera riassuntiva, gli strumenti che hanno consentito lo sviluppo di tale lavoro:

Tabella 3-2: particolari della campagna di monitoraggio con riferimento agli strumenti utilizzati, periodo di misura, luogo del campionamento.

Strumento	Periodo di misura	Sito di campionamento	Grandezza misurata
Termoigrometro	18 giorni	Sala Dantesca Sala dei Santi Padri Aula Magna 'superiore' Aula Magna 'inferiore' Ex Refettorio	Temperatura e Umidità Relativa
Campionatore di NO ₂	14 giorni	Sala Dantesca Sala dei Santi Padri Aula Magna Ex Refettorio Cortile di Via Chartres Rocca Brancaleone	Concentrazione media di NO ₂
Campionatore di O ₃	7 giorni	Sala Dantesca Sala dei Santi Padri Aula Magna Ex Refettorio Cortile di Via Chartres	Concentrazione media di O ₃
Macchina termografica	1 giorno	Sala Dantesca Sala dei Santi Padri Aula Magna Ex Refettorio	Temperatura superficiale
Anemometro a filo caldo	1 giorno	Sala Dantesca Sala dei Santi Padri Aula Magna Ex Refettorio	Velocità dell'aria
Luxmetro	1 giorno	Sala Dantesca Sala dei Santi Padri Aula Magna Ex Refettorio	Illuminamento

3.1.2.1 Datalogger



Figura 3-16 : registratore di temperatura e umidità dell'aria PCE-HT71.

Gli strumenti utilizzati in questo studio per registrare in continuo i valori di temperatura ed umidità sono i termoigrometri (codice PCE-HT 71, Figura 3-16). I cinque datalogger utilizzati nei locali della Biblioteca Classense, per tutta la durata della campagna di monitoraggio, e il software per il loro funzionamento, sono stati gentilmente forniti dal Laboratorio di Archeoingegneria della Seconda Facoltà di Ingegneria (Cusercoli - FC), grazie alla preziosa collaborazione del Direttore, il Professor

Leonardo Seccia.

Il termoigrometro (TG) è uno strumento portatile, particolarmente indicato per i controlli prolungati, che opera in modo autonomo durante la fase di acquisizione dei dati. Essendo di dimensioni contenute, è stato possibile collocare ciascuno strumento all'interno delle diverse sale rispettando, nel contempo, tutte le diverse esigenze espositive. Nello specifico, il TG è composto da una termoresistenza e da un sensore di umidità capacitivo. Le termoresistenze, definite anche *Resistance Thermal Detector* (RTD), sono trasduttori passivi che presentano un coefficiente positivo della resistività⁵⁶ in funzione della temperatura; sono costituite da fili di materiale conduttore avvolti su supporti isolati di forma cilindrica oppure da un film metallico posto su un piccolo supporto di ceramica. I materiali usati generalmente sono platino, nichel e rame, anche se il platino è, usualmente, preferito perché ha una resistività tale da realizzare cavi di piccole dimensioni senza perdere in sensibilità dello strumento. Per i metalli elencati si evidenzia una relazione tra temperatura e umidità in forma semplice, che può essere descritta con buona approssimazione da uno sviluppo di serie in potenze. L'equazione Callendar-Van Dusen descrive la relazione tra resistenza e temperatura all'interno di RTD al platino⁵⁷:

$$R = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]$$

Dove:

R è la resistenza alla temperatura t [Ω]

R_0 rappresenta la resistenza a 0°C [Ω]

⁵⁶ In appendice.

⁵⁷ Il valore del coefficiente C è nullo per $t > 0$ e $t < 100$ il termine t^2 pesa per valori elevati di temperatura, per cui nel range $0 \div 100^\circ\text{C}$, è possibile considerare la relazione lineare.

t è la temperatura [°C]

A, B, C sono costanti dipendenti dalle caratteristiche del sensore usato a temperature fissate [°C⁻¹].

I datalogger PCE – HT71 sono dotati di una termoresistenza Pt100, ovvero un RTD in platino con resistenza nominale di 100 Ω a 0 °C.

Come accennato prima, per quanto riguarda la misura dell'umidità relativa, i TG utilizzati si servono di un sensore capacitivo. In commercio, esistono svariati strumenti di misura dell'umidità relativa che si basano su diversi principi fisici: dall'igrometro a capello⁵⁸ allo psicometro⁵⁹, dall'igrometro a specchio per punto di rugiada⁶⁰ al sensore di umidità capacitivo. Per misure da effettuarsi in modo continuativo, o per lungo periodo, vengono più frequentemente utilizzati sensori basati sulla risposta di elementi capacitivi (Bernardi, 2004).

Il principio di funzionamento è simile ad un condensatore in cui il dielettrico⁶¹ è un materiale igroscopico (di solito, ceramico o polimerico). Generalmente, uno degli elettrodi è permeabile al vapore d'acqua. L'equilibrio igrometrico, che si stabilisce tra isolante e ambiente, modifica la permittività⁶² relativa del dielettrico: il risultato è una variazione della capacità elettrostatica dell'elemento sensibile, il quale, collegato ad un circuito elettronico, fornisce un segnale in tensione proporzionale all'umidità relativa.

Altre caratteristiche tecniche dei datalogger PCE – HT71 sono riportate in Tabella 3-3 mentre in Figura 3-15 è possibile osservare l'aspetto dello strumento.

⁵⁸ E' uno dei metodi più antichi utilizzati per misurare l'umidità, basato sul fenomeno, ben noto, dell'elongazione dei capelli al variare dell'umidità: nei modelli di tipo meccanico, la variazione di lunghezza del capello viene amplificata opportunamente da un sistema di leve meccaniche e poi registrata grazie ad un pennino; in quelli di tipo elettrico, più moderni, il segnale è trasformato in impulso elettrico.

⁵⁹ Questo strumento è costituito da due termometri: il primo misura la temperatura dell'aria e il secondo la temperatura alla quale si porta un termometro mantenuto costantemente bagnato mediante una garza ed investito da corrente di aria umida (temperatura di bulbo bagnato). L'umidità dell'ambiente può essere determinata in base alla differenza tra le due temperature.

⁶⁰ Uno specchio viene raffreddato finché non comincia a formarsi condensa sulla superficie. Monitorando la formazione della condensa (ad esempio, attraverso fotosensori osservando la variazione dell'indice di riflessione) è possibile misurare il punto di rugiada, tramite una termoresistenza al Pt.

⁶¹ In appendice.

⁶² In appendice.

Tabella 3-3: parametri tecnici dei datalogger PCE-HT71 (PCE, 2010).

Grandezza fisica	Temperatura	Umidità relativa
Campi di misura	-40 ÷ +70 °C	0 ÷ 100 %
Incertezza ⁶³	± 1 °C	± 3 %
Risoluzione	0.1 °C	0.1 %
Condizioni ambientali	-40 ÷ +70 °C	0 ÷ 100 % (non condensato)
Sensori	Pt100	capacitativo
Frequenza di campionamento	2s ÷ 24h	
Inizio/fine	Programmazione libera	
Memoria	32'000 valori	
Alimentazione	Batteria interna agli ioni di Litio da 3,6 V	
Dimensioni	30 × 25 × 130 mm	
Peso	25 g	

Per poter eseguire i campionamenti, per prima cosa, è necessario installare il software Datalogger Graph⁶⁴ su un PC, per consentire di settare i parametri di acquisizione, visualizzare i dati graficati (figura 3-17) e memorizzarli in diversi formati (.rec, .txt., .xls, .bmp).

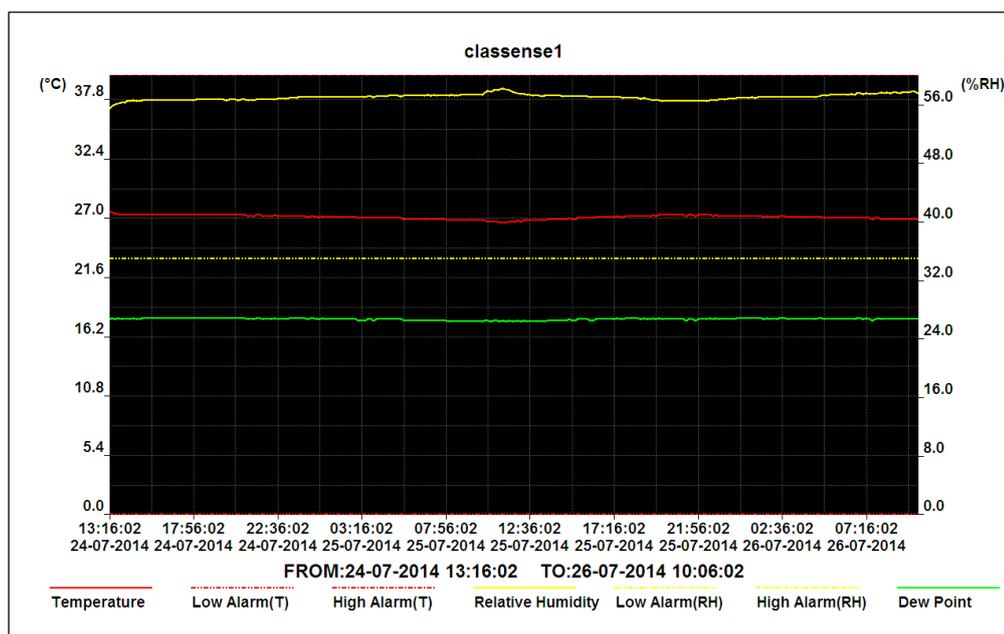


Figura 3-17: esempio di un'immagine ricavata dal software di elaborazione dei valori termoigrometrici che mostra gli andamenti temporali del periodo di acquisizione della temperatura (linea rossa), umidità (linea gialla) e temperatura di rugiada (linea verde).

⁶³ Poiché il tempo trascorso tra il collaudo e l'utilizzo della strumentazione è limitato, si ipotizza che l'incertezza delle misurazioni effettuate sia pari a quella dichiarata nella documentazione fornita dalla ditta produttrice.

⁶⁴ English Version 2.2

Nel nostro caso, dopo diversi sopralluoghi eseguiti presso i siti di interesse, è sembrato opportuno impostare (figura 3-18):

- *Sample Rate* (frequenza di campionamento) pari a 10 minuti per tutta la durata della campagna di misura, in virtù della stabilità delle variabili misurate;
- *Sample Point* (numero di osservazioni) pari a 16'000, così da poter garantire una notevole autonomia di acquisizione.
- *Led Flash Cycle* (intervallo di lampeggiamento) impostato a 30 s, per consentire una maggiore durata della batteria;
- *Alarm Settings* registrati a 0°C - 40°C per la temperatura e 35% - 75% per l'umidità relativa, come valori limite di allarme, rispettivamente, minimo e massimo.

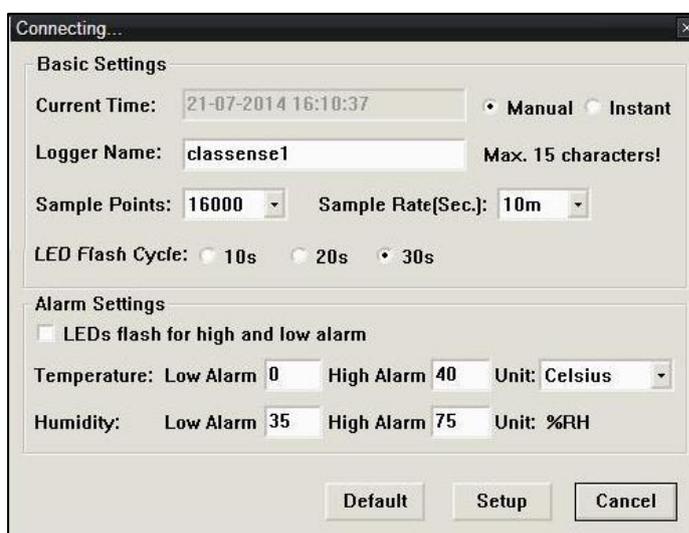


Figura 3-18: finestra dei parametri di acquisizione degli strumenti del software Datalogger Graph.

Nonostante la notevole memoria di cui sono dotati gli strumenti, per una maggiore sicurezza, appena è stato possibile (tipicamente ogni 2-3 giorni), di concerto con le esigenze della Biblioteca, i dati sono stati scaricati collegando lo strumento direttamente al PC tramite interfaccia USB. Quindi, il datalogger veniva nuovamente impostato e riposizionato per acquisire nuovamente i dati necessari alle campagne di misura.

3.1.2.2 *Campionatori passivi per NO₂ e O₃*

I dispositivi e le tecnologie per la misura della concentrazione dei contaminanti nell'aria sono molteplici e caratterizzati da uno stato di rapida evoluzione. In generale, le diverse metodologie si possono ricondurre a due approcci, uno attivo e l'altro passivo (o diffusivo).

Nel campionamento attivo, attraverso l'azione di una pompa, lo strumento convoglia l'aria verso un rilevatore o un filtro; in questo modo, l'analisi dei volumi di aria contenenti la sostanza in esame, permette di risalire alla concentrazione presente. Ad esempio, a questa tipologia di campionamenti appartengono i tubi di diffusione (o *denuder*), ovvero tubi di vetro cilindrici, di lunghezza pari ad alcune decine di centimetri e aventi diametro interno di qualche millimetro, la cui superficie interna viene ricoperta con una sostanza in grado di reagire chimicamente con la specie gassosa che si vuole investigare. Attraverso una pompa, l'aria viene aspirata attraverso il denuder e, durante il passaggio dell'aria, le specie gassose diffondono sulle pareti del tubo, dove reagiscono con il ricoprimento restando trattenute da esso. Al termine del campionamento i denuder dapprima vengono estratti con opportune soluzioni ed i campioni risultanti sono analizzati mediante cromatografia ionica o altre tecniche analitiche.

Tra i metodi di campionamento attivo più diffusi rientrano i cosiddetti analizzatori nei quali l'aria viene continuamente inviata all'interno di una camera (o cella) dove è determinata la concentrazione tramite assorbimento infrarosso, ultravioletto o sistemi elettrochimici, a seconda della specie esaminata.

La tecnologia del campionamento diffusivo, sin dalla sua invenzione, attorno agli anni '70, è stata ampiamente utilizzata per il monitoraggio ambientale. A partire dalla prima dimostrazione quantitativa dei campionatori passivi⁶⁵, inizialmente progettati per gli inquinanti gassosi presenti nell'aria, è seguito un rapido sviluppo della loro applicazione; recentemente tali dispositivi sono stati utilizzati anche per analisi su matrici acquose - solide. A tal proposito, una definizione generale, onnicomprensiva delle svariate applicazioni, li descrive come segue: “*any sampling technique based on free flow of analyte molecules from the sampled medium to a collecting medium, as a result of a difference in chemical potential of the analyte between the two media*” (Gorecki e Namiesnik, 2002).

⁶⁵ (Palmer e Gunnison, 1973)

Il funzionamento dei campionatori passivi per gli inquinanti gassosi presenti in aria si basa sul principio fisico della diffusione⁶⁶ passiva di un gas verso un mezzo assorbente. Questo fenomeno è descritto dalla prima legge di Fick, per cui, in caso di condizioni di regime e ipotizzando una sola direzione di diffusione, un flusso è proporzionale al gradiente di concentrazione secondo l'espressione⁶⁷:

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

Dove:

J è il flusso, definito come portata (in numero di particelle o in massa o in moli) per unità di superficie [$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$].

D è il coefficiente di diffusione⁶⁸ [m^2s^{-1}].

$\frac{dC}{dx}$ è il gradiente di concentrazione lungo la direzione x .

A seconda dell'inquinante investigato (NO_2 , O_3 , SO_2 , NH_3 , HCOH , ...) il campionatore sarà dotato di una specifica sostanza adsorbente che fissa l'inquinante, il quale circola per diffusione all'interno del tubo. Il risultato di una misura effettuata tramite campionatori diffusivi è la concentrazione media dell'analita su un periodo temporale noto, anche detta *TWA concentration* (*Time-Weighted Average concentration* – concentrazione media nel tempo) (Seethapathy et al., 2008).

Anche se il campionamento passivo è stato ampiamente utilizzato e riconosciuto come un prezioso strumento di monitoraggio ambientale, l'affidabilità di questa tecnica in diverse condizioni ambientali è spesso oggetto di controversie. Il principio teorico su cui si basano (la prima legge di Fick) si fonda infatti su condizioni di "stato stazionario" (*steady-state*). In realtà, l'assorbimento effettivo dei campionatori varia a seconda di altri fattori, come la temperatura e la concentrazione che influenzano il coefficiente di diffusione (Seethapathy et al., 2008). In uno studio condotto nel 2005 da Gerboles et al., tuttavia, si valutano le incertezze delle misure nei diversi campionatori passivi in commercio: i test di campo mostrano che la maggior parte dei campionatori passivi

⁶⁶ In appendice.

⁶⁷ Il segno meno indica che la direzione della diffusione è opposta a quella del gradiente di concentrazione, ovvero il flusso tende a muoversi da zone in cui vi è una maggiore concentrazione verso zone a concentrazione più bassa.

⁶⁸ In appendice.

soddisfa i requisiti di incertezza del 25% per NO₂ e 30% per O₃ stabiliti dalla Comunità Europea⁶⁹ (Gerboles et al., 2006).

Tabella 3-4: equazioni che descrivono l'assorbimento dell'analita nei campionatori diffusivi e i possibili effetti delle condizioni ambientali da (Seethapathy et al., 2008), modificata.

Air sampling – diffusion sampler

	$\left(\frac{M}{t}\right) = D \frac{A}{L_d} (C_0 - C)$
	<p>M - quantità di analita raccolto dal campionatore nel tempo t;</p> <p>D – coefficiente di diffusione dell'analita;</p> <p>A – area della sezione trasversale della barriera di diffusione;</p> <p>L_d – lunghezza del percorso di diffusione;</p> <p>C_0 – concentrazione dell'analita in prossimità della barriera di diffusione;</p> <p>C – concentrazione dell'analita in corrispondenza dell'interfaccia assorbente.</p>
Definizione della costante di calibrazione	$k = \frac{L_d}{AD}$
Determinazione della concentrazione TWA	$C_0 = \frac{kM}{t}$
Effetto della temperatura sul tasso di campionamento	Definito dal coefficiente di diffusione come una funzione della temperatura basata sulla teoria cinetica dei gas
Effetto dell'umidità sulla performance del campionatore	Potrebbe portare a saturazione la sostanza assorbente
Tempo di risposta dei campionatori	$R_D = \frac{L_d^2}{2D}$ <p>R_D – tempo di risposta del campionatore;</p>
Effetto della concentrazione dell'analita sul tasso di campionamento	Non influenzato
Determinazione del tasso di uptake	Determinato sperimentalmente

⁶⁹ Allegato I, Tabella A della Direttiva 2008/50/CE del Parlamento europeo e del Consiglio relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa.

L'attenzione della letteratura scientifica nei confronti dei campionatori passivi, a partire dagli studi di Saunders⁷⁰ e Namiesnik⁷¹, è spiegata da una serie di vantaggi pratici che li contraddistinguono dai campionatori attivi.

Questi strumenti costituiscono una valida alternativa ai tradizionali analizzatori automatici per misure di concentrazione su periodi più o meno lunghi perché non hanno limiti energetici di autonomia, non provocano disturbo visivo o sonoro, non necessitano di sorveglianza e permettono di effettuare più misure in contemporanea (Brown, 2000); hanno, inoltre, dimensioni ridotte, che agevolano il trasporto e non necessitano di manutenzione quotidiana.

Sebbene in principio, venivano applicati soprattutto per analisi dei luoghi di lavoro, per le caratteristiche prima descritte rappresentano una tecnica molto versatile, che ben si adatta a diversi contesti: da quello ambientale (largamente utilizzati per monitorare aree forestali remote⁷²) a quello sanitario (indagini epidemiologiche) a quello museale⁷³.

Per questi motivi, nel presente lavoro, al fine di risalire alle concentrazioni medie degli inquinanti, sono stati utilizzati alcuni campionatori passivi. Inoltre, per poter elaborare un confronto tra inquinamento indoor e outdoor, per l'NO₂ e per l'O₃, i campionatori passivi sono stati posizionati sia negli ambienti interni che esterni, in modo da poter essere più rappresentativi possibili dell'area in esame.

In commercio esistono diverse tipologie di campionatori passivi, differenti sia per manifattura che per tipologia. Fondamentalmente si distinguono due tipi di campionatori diffusivi a secondo del percorso diffusivo previsto:

- A diffusione assiale detti anche *Palmes tube*⁷⁴ (tra cui Passam, Gradko)
- A diffusione radiale (come Radiello)

Per svolgere questa ricerca, sono stati acquistati dal C.R.S.A. MED INGEGNERIA (Ravenna) un totale di nove campionatori passivi Passam tramite la ditta Attalea⁷⁵:

- 7 campionatori per NO₂
- 2 campionatori per O₃

⁷⁰ (Saunders et al., 1981)

⁷¹ (Namiesnik et al., 1984)

⁷² (Cox, 2003)

⁷³ (Camuffo et al., 1999)

⁷⁴ (Palmes et al., 1976)

⁷⁵ Rivenditore esclusivo per l'Italia dei campionatori passivi e dei servizi Passam. (www.attalea.net).



Figura 3-19: campionatore Passam per NO₂.

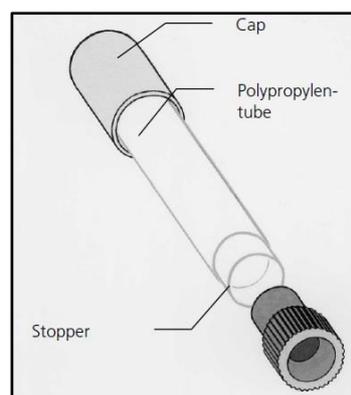


Figura 3-20: schema costitutivo del campionatore Passam per NO₂ (Passam ag, 2013a).



Figura 3-21: campionatore Passam per O₃ in un espositore per esterni.

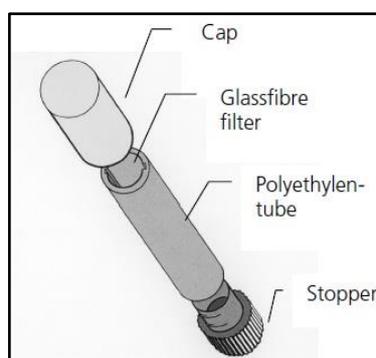


Figura 3-22: schema costitutivo del campionatore Passam per O₃ (Passam ag, 2013b).

La Passam – Laboratory for environmental analysis produce due tipologie di campionatori sia per NO₂ che per l'O₃, una per campionamenti a lungo termine (2 settimane per NO₂ e 1 settimana per l'O₃), l'altra per analisi a breve termine (24-48 ore per NO₂ e 8-24 ore per O₃). In questo studio, vista la durata della campagna di monitoraggio, rivolta alla determinazione delle concentrazioni medie indoor per un periodo di tempo sufficientemente lungo e rappresentativo, è sembrato più opportuno procedere con l'acquisto e l'utilizzo dei campionatori a lungo termine.

Il campionatore per il biossido di azoto, mostrato in figura 3-19 e 3-20, consiste in una fiala di polipropilene di 7.35 cm di lunghezza e 0.98 mm di diametro interno. Ad un'estremità è posizionato un filtro impregnato di trietanolammina⁷⁶ (TEA) che reagisce con l'NO₂. Il biossido si lega alla TEA mediante legame covalente.

⁷⁶ La TEA è stata utilizzata come mezzo assorbente fin dalle prime realizzazioni dei campionatori passivi per NO₂, a partire dagli anni '70. In condizioni di aria ambiente tale per cui RH=75% e la T=26°C, la sua capacità di rimuovere il biossido di azoto dall'aria campionata è alta (90-100%). La reazione dell'NO₂ con TEA porta alla formazione di ioni nitrito NO₂⁻, misurati poi per via analitica con l'aggiunta di NEDA e altri composti (Cape, 2005).

Invece, il campionatore per l'ozono, riportato in figura 3-21 e 3-22, è costituito da un tubo cilindrico lungo 4.9 cm, con un diametro interno di 0.9 cm, all'interno del quale l'aria è libera di circolare mediante diffusione molecolare. Un lato del tubo è aperto, come per l'NO₂, per consentire la diffusione dei gas mentre, sul fondo, si trova un filtro di fibra di vetro supportato da una rete, sul quale si trova depositata una sostanza che reagisce con l'O₃ in maniera specifica. In particolare, nei campionatori Passam viene utilizzata una soluzione di 1,2-di(4-piridil)etilene (DPE), che reagendo con l'O₃, produce un ozonide. Nella tabella 3-5 sono riassunte alcune caratteristiche dei campionatori utilizzati in questa ricerca:

Tabella 3-5: Caratteristiche dei campionatori passivi Passam da (Passam ag, 2013a, 2013b), modificata.

	NO ₂	O ₃
Tasso di campionamento	0.8536 ml/min (stimato a 9 °C) 0.7340 ml/min (stimato a 20 °C)	0.0255 mg/m ³ ·h (stimato a 9 °C) 0.2805 mg/m ³ ·h (stimato a 2°C)
Intervallo di lavoro	1 – 200 µg/m ³	5 – 240 µg/m ³
Limiti di rilevabilità	0.3 µg/m ³	5.1 µg/m ³
Durata dell'esposizione	1 - 4 settimane	1 – 2 settimane
Influenze esterne Velocità del vento	< 10 % fino a 4.5 m/s	< 10 % fino a 2 m/s
Temperatura	Non influenzata nell'intervallo da 5 a 40 °C	Non influenzata nell'intervallo da 10 a 30 °C
Umidità	Non influenzata nell'intervallo dal 20 all'80 %	Non influenzata nell'intervallo dal 20 all'80 %
Conservazione	24 mesi prima dell'uso 6 mesi dopo l'esposizione	6 mesi prima dell'uso 4 mesi dopo l'esposizione
Incertezza	18.4 % per livelli di concentrazione compresi tra 20-40 µg/m ³	20.5 % per livelli di concentrazione compresi > 80 µg/m ³

Dopo diversi sopralluoghi, considerate le esigenze espositive della Biblioteca Classense, i campionatori sono stati posizionati⁷⁷ negli ambienti interni (Sala Dantesca, Sala dei Santi Padri e Aula Magna) ad un'altezza di circa 1.5 m dal pavimento, ad eccezione dell'Ex Refettorio, nel quale è stato possibile posizionarlo ad un'altezza di circa 4 m.

Per quanto riguarda l'installazione dei campionatori, questi sono stati inseriti con l'estremità aperta rivolta verso il basso all'interno dell'espositore (figura 3-23), che ha la funzione di minimizzare l'influenza di eventuali condizioni ambientali estreme (luce, vento, pioggia, insetti,...).



Figura 3-23: foto espositore con all'interno i campionatori passivi nella Sala dei Santi Padri. Foto scattata durante la campagna di monitoraggio.

Per le misure in ambiente esterno, i campionatori sono stati posizionati nel cortile su Largo Chartres, ritenuto idoneo e rappresentativo della qualità dell'aria esterna nelle immediate vicinanze delle sale della Biblioteca Classense oggetto di studio. Al fine di evitare misure in strati d'aria "perturbati" ed impoveriti di NO₂, come in prossimità dei muri, è stato individuato, come sito più indicato, un palo della luce presente in un'area più libera. Quindi è stato installato l'espositore per ambienti esterni (figura 3-21) ad un'altezza di circa 2 m dal suolo, in condizioni di libera circolazione dell'aria, così come suggerito dalle istruzioni fornite dalla ditta produttrice. Inoltre, come ulteriore precauzione, l'espositore è stato coperto con una zanzariera per proteggere i campionatori dall'eventuale presenza di insetti. Infine, un campionatore passivo per l'NO₂ è stato posizionato presso la stazione di monitoraggio ARPA Rocca Brancaleone, per poter

⁷⁷ Per ulteriori dettagli sul posizionamento e sulla tipologia dei campionatori usati nella diverse sale si rimanda al paragrafo 3.1.1 – Area di studio.

confrontare il valore di concentrazione ottenuto tramite campionatore passivo con quello ricavato mediante campionamento attivo eseguito dall'analizzatore della stazione stessa. Il periodo di misura parte dal momento in cui viene rimosso il tappo inferiore, sì che la diffusione dell' NO_2 e dell' O_3 lungo la fiala abbia inizio. Al momento dell'installazione di ogni campionatore è necessario compilare la scheda, fornita dalla Passam, che riporta alcune informazioni utili alle successive analisi e valutazione dei risultati, come il sito di misura, il codice del campionatore, la data e l'ora di inizio e fine del campionamento; il codice del campionatore e il sito di misura inoltre devono essere riportati anche sull'involucro che contiene ciascun campionatore, al fine di garantire una corretta identificazione del campione al momento dell'analisi in laboratorio.

Come raccomandato dalla ditta produttrice, i campionatori sono stati esposti per un periodo totale di:

- 14 giorni per l' NO_2
- 7 giorni per l' O_3

Trascorso questo tempo, tutti i campionatori sono stati richiusi e conservati in frigorifero fino all'analisi delle concentrazioni rilevate: per tali determinazioni, sette campionatori sono stati spediti al laboratorio Attalea, responsabile delle analisi per conto di Passam; i restanti due campionatori di NO_2 sono stati analizzati presso i laboratori di chimica del C.I.R.S.A. di Ravenna, seguendo il protocollo gentilmente fornito dalla stessa ditta Attalea. Grazie alla collaborazione del Professor Alberto Modelli, sono stati acquistati i composti necessari alla preparazione di una soluzione preparatoria per le analisi spettrofotometriche: ovvero acido solfanilico, acido o-fosforico, NEDA e acqua ultradistillata.



Figura 3-194: matraccio da 2 L con all'interno la soluzione composta da acido solfanilico, acido o-fosforico e acqua ultradistillata sopra piastra riscaldante.

Dopo aver portato ad ebollizione questa soluzione (figura 3-24) si è proceduto con l'aggiunta di N-(1-Naftil)etilendiammina cloridato (NEDA) al fine di ottenere il reagente colorimetrico (figura 3-25).

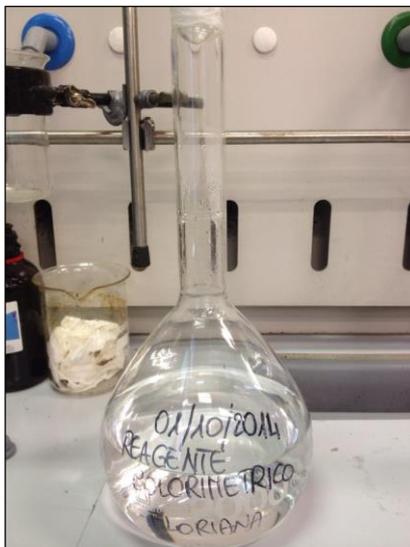


Figura 3-25: matraccio contenente il reagente colorimetrico.

Il reagente colorimetrico è pronto per l'utilizzo dopo 24 ore. Nel frattempo è stata preparata la soluzione contenente il nitrito standard per poter poi elaborare una curva di calibrazione. Diversi volumi di questa soluzione, infatti, sono stati aggiunti ad un'aliquota del reagente colorimetrico, opportunamente prelevata tramite siringa micrometrica e inseriti in cuvette di vetro per la lettura in spettrofotometria a 540 nm, dopo 15 minuti.



Figura 3-26: spettrofotometro V-650 e cuvette a diverse concentrazioni (diverso grado di colore) per l'elaborazione della curva di calibrazione.

Infine, disponendo della relazione che lega l'assorbanza delle soluzioni a concentrazioni note, attraverso la curva di calibrazione ottenuta, in ciascun campionatore viene aggiunto un volume di reagente colorimetrico e viene poi agitato, mediante vortex. L'assorbanza della soluzione, si fatta, è letta allo spettrofotometro alla lunghezza d'onda di 540 nm. I risultati relativi alle analisi sinteticamente descritte, eseguite presso i laboratori del C.I.R.S.A., sono discussi nei paragrafi successivi.

Dopodiché, la concentrazione dell'NO₂ nell'aria ambiente si calcola come segue:

$$C_{NO_2} = \frac{Q_{NO_2} \cdot I}{D_{NO_2} \cdot A \cdot t} \cdot K = \frac{Q}{SR \cdot T} \cdot K$$

Dove:

C_{NO_2} è la concentrazione di NO₂ nell'aria ambiente [μgm^{-3}]

Q_{NO_2} è la massa di NO₂ captata [μg]

D_{NO_2} è il coefficiente di diffusione dell' NO₂ nell'aria ambiente [$\text{cm}^2\text{min}^{-1}$]

A è la sezione del campionatore [0.7524 cm^2]

I è la lunghezza del campionatore (percorso di diffusione) [7.345 cm]

t è il tempo di esposizione [min]

K è un fattore di correzione empirico che considera diversi parametri ambientali quali temperatura, pressione e imprecisioni della geometria del campionatore⁷⁸.

SR è il tasso di campionamento pari a 0.947 [ml/min]

Invece, il procedimento analitico per calcolare la concentrazione di ozono nei campionatori Passam prevede la formazione di un aldeide tramite aggiunta di 3-methylbenzthiazolinone-2(3H)-idrazzone cloridato (MBTH). In seguito, dopo la rimozione della fibra di vetro e la centrifuga della soluzione, si misura l'assorbanza della soluzione, divenuta gialla, per via spettrofotometrica a 442 nm.

Infine, la concentrazione dell'O₃ è data da:

$$C_{O_3} = \frac{Abs_{net}}{0.0255 \cdot t} \cdot K$$

Dove:

C_{O_3} è la concentrazione di O₃ nell'aria ambiente

Abs_{net} è la lettura dell'assorbanza

t è la durata dell'esposizione

⁷⁸ Questo fattore è pari a 1 per le nostre condizioni sperimentali (Passam ag, 2013a).

K è un fattore di correzione empirico che considera diversi parametri ambientali quali temperatura, pressione e geometria del campionatore⁷⁹.

Da notare che la reazione tra O_3 e DPE non è stechiometrica: pertanto i campionatori passivi sono stati calibrati dalla ditta produttrice sulla base di misure a lungo termine effettuate in parallelo con un analizzatore automatico⁸⁰.

3.1.2.3 Termocamera

In questo lavoro di tesi sono state acquisite ed elaborate una serie di immagini termiche della temperatura superficiale di alcuni oggetti esaminati. Quest'analisi termografica è stata condotta mediante l'uso della termocamera (modello Testo 882, figura 3-30), uno strumento in grado di calcolare indirettamente la temperatura superficiale di qualsiasi corpo a partire dalla misura delle radiazioni infrarosse emesse dal corpo stesso.

La norma UNI 10824-1:2000 definisce la termografia all'infrarosso come una prova non distruttiva, “metodo che permette di ottenere, per mezzo di un'apparecchiatura termografica, la distribuzione spaziale e l'evoluzione temporale della radiazione infrarossa proveniente dalla scena osservata, nell'intervallo di sensibilità della termocamera” (UNI10824, 2000).

La tecnica termografica, infatti, in molti casi, risulta essere estremamente efficace in virtù della sua natura ottica, che le consente di operare senza contatto con l'oggetto esaminato. È, quindi, una tecnica non invasiva né distruttiva, caratteristiche che ne favoriscono l'applicabilità e il successo in vari ambiti: da quello militare, a quello industriale, ingegneristico, medico e ambientale.

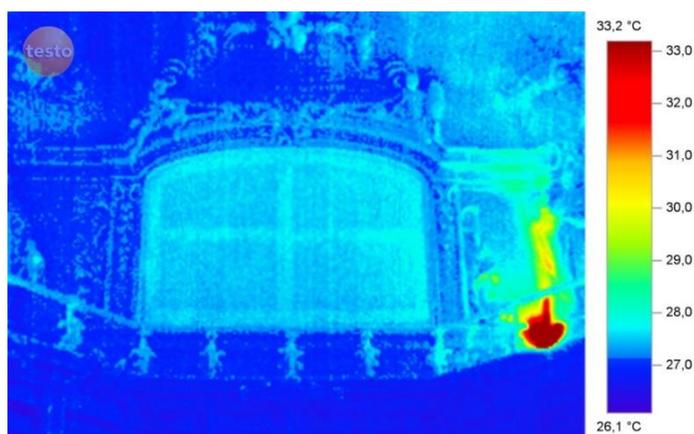


Figura 3-27: termogramma raffigurante le temperature superficiali dell'affresco presente in Aula Magna della Biblioteca Classense.

⁷⁹ Questo fattore ha un valore di 0.87 (Passam ag, 2013b).

⁸⁰ Per informazioni dettagliate riguardo questo tipo di campionatori passivi consultare i seguenti studi: (Hangartner et al., 1996).

Un altro fondamentale vantaggio che offre questa metodologia d'indagine consiste nella restituzione di output che si prestano particolarmente bene ad interpretazioni immediate, i termogrammi (o immagini termiche).

Il termogramma (figura 3-27), oltre a fornire una visione d'insieme, consente all'operatore di eseguire indagini comparative tra aree diverse dell'oggetto o oggetti simili. Queste grandi potenzialità hanno consentito un rapidissimo sviluppo di questa tecnologia: oggi sono ottenibili accuratezze dell'ordine dei centesimi di grado. Per di più, si aggiungono software sempre più efficienti per eseguire le misure ed elaborare i dati. Considerando, inoltre, che un rilevamento termografico può, in linea generale, essere completato rapidamente, esistono svariate applicazioni nell'ambito dei beni culturali (Titman, 2001): monitoraggio delle strutture murarie di edifici antichi⁸¹ e moderni, degli intonaci e degli affreschi; individuazione di riscaldamenti differenziali, ponti termici, dispersioni, crepe; mappatura della distribuzione dell'umidità⁸².

È opportuno tuttavia evidenziare che, sebbene l'elevata precisione e sensibilità raggiunte dalle termocamere in commercio, tale tecnologia si basa su una misura indiretta della temperatura. Per poter eseguire un rilievo termografico è indispensabile conoscere alcune informazioni che caratterizzano l'area in esame e l'oggetto analizzato (ad esempio, temperatura dell'aria ambiente, umidità relativa, emissività del materiale).

Il principio fisico che è alla base del funzionamento della termocamera consiste nel fatto che la radiazione è una funzione della temperatura superficiale degli oggetti. Posto che ogni corpo con temperatura superiore allo zero assoluto⁸³ emette radiazioni elettromagnetiche, l'energia emessa dalla superficie può essere catturata dal sensore infrarosso e convertita in segnale elettrico. A partire dalla radiazione rilevata si ottengono mappe di temperatura delle superfici esposte.

Prima di descrivere, con maggior dettaglio, il meccanismo di funzionamento della termocamera, è opportuno richiamare brevemente alcuni concetti di fisica, strettamente connessi, come lo spettro elettromagnetico e la teoria del corpo nero. Come detto precedentemente, dalla superficie di ogni oggetto viene emessa energia spontaneamente, sotto forma di radiazione elettromagnetica di intensità e frequenza dipendenti dalla temperatura del corpo, secondo leggi fisiche note⁸⁴; tale radiazione è in grado di propagarsi in alcuni materiali e nel vuoto grazie all'agitazione termica delle molecole.

⁸¹ (Grinzato et al., 2002).

⁸² (Ristic et al., 2012).

⁸³ 0 Kelvin = - 273,15 °C

⁸⁴ In appendice: formula di Planck e formula di Stefan-Boltzmann (in Corpo nero).

Tutte le possibili frequenze delle radiazioni costituiscono lo spettro elettromagnetico (spettro EM), che, solitamente, viene suddiviso in bande, ovvero regioni classificate in base alla lunghezza d'onda, λ (figura 3-28).

Convenzionalmente, sebbene non esistano limiti netti tra una regione e l'altra, si distinguono, in funzione di λ crescente, i seguenti intervalli:

- Raggi γ
- Raggi x
- Ultravioletto
- Visibile
- Infrarosso
- Microonde
- Onde radio

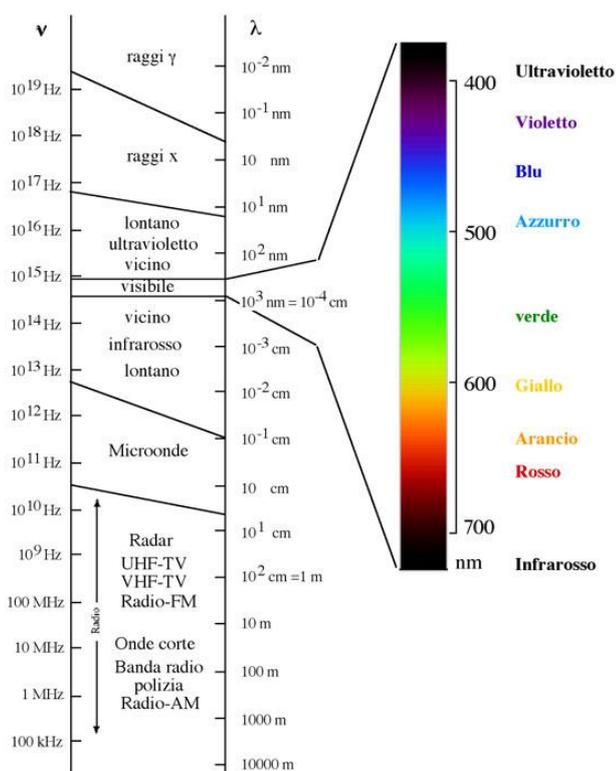


Figura 3-28: spettro elettromagnetico.

La termografia utilizza la banda spettrale dell'infrarosso (IR), che racchiude tutte le radiazioni elettromagnetiche con λ compresa, all'incirca, tra $0.7 \mu\text{m}$ e $1000 \mu\text{m}$, cioè radiazione elettromagnetica che ha una frequenza inferiore a quella della luce visibile ma, maggiore di quella delle microonde⁸⁵.

⁸⁵ Il termine "infrarosso", infatti, è composto dall'avverbio latino *infra* (sotto) quindi letteralmente si traduce come "sotto il rosso", essendo il colore con la frequenza più bassa.

Data l'ampiezza dello spettro infrarosso e la molteplicità delle applicazioni, può risultare utile suddividere ulteriormente le radiazioni IR in quattro intervalli:

- Infrarosso *vicino* ($0.78 \mu\text{m} < \lambda < 2.0 \mu\text{m}$): usato nel campo dei beni culturali;
- Infrarosso *medio* ($2.0 \mu\text{m} < \lambda < 6.0 \mu\text{m}$): detto anche *short wave* o prima finestra atmosferica;
- Infrarosso *lontano* ($6.0 \mu\text{m} < \lambda < 15.0 \mu\text{m}$): detto anche *long wave* o seconda finestra atmosferica;
- Infrarosso *estremo* ($15.0 \mu\text{m} < \lambda < 1000.0 \mu\text{m}$): utilizzato in campo astronomico.

In realtà nel campo dei beni culturali, sono applicate diverse tecniche ottiche nel campo dell'infrarosso che sfruttano principi fisici e bande di lunghezza d'onda differenti. In particolare, si distingue la riflettografia, che si basa sulla trasparenza di alcuni pigmenti e leganti pittorici nel vicino IR, dalla termovisione, la quale sfrutta l'emissione da parte di oggetti, a temperatura ambiente, in alcune lunghezze d'onda del medio-lontano IR⁸⁶. Quindi la termografia, come suggerisce il nome stesso, utilizza la capacità di strumenti specializzati (termocamere) di rilevare le radiazioni emesse nella parte cosiddetta termica dello spettro infrarosso, tipicamente nella bande tra $3.0 \mu\text{m} < \lambda < 5.0 \mu\text{m}$ o $8.0 \mu\text{m} < \lambda < 14.0 \mu\text{m}$ (Titman, 2001).

Per poter spiegare l'emissione naturale di energia da parte di tutti gli oggetti sotto forma di radiazione elettromagnetica bisogna introdurre il concetto di corpo nero⁸⁷, ovvero un corpo che ha proprietà di assorbitore ed emittore ideale. Si tratta di un concetto utile poiché riferito ad esso sono state formulate diverse leggi sull'emissione dell'energia. Corpi neri perfetti non esistono in natura, dal momento che una parte dell'energia che incide su una superficie reale è sempre riflessa.

Si consideri, ad esempio, un fascio di radiazioni con un intervallo di lunghezze d'onda compreso tra λ e $\lambda + \Delta\lambda$ che investe una superficie. Risulterà che: una parte di radiazione verrà riflessa verso il mezzo di provenienza (E_r), una parte sarà assorbita dal corpo (E_a) e la restante attraverserà la superficie (E_t). Indicando con E il valore dell'energia per unità di superficie incidente definiamo $\alpha = \frac{E_a}{E}$, $\rho = \frac{E_r}{E}$ e $\tau = \frac{E_t}{E}$ per cui:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

I tre coefficienti (α, ρ, τ) sono funzione della lunghezza d'onda, della temperatura e della natura chimico-fisica della superficie. In particolare, le superfici con:

⁸⁶ Dalla legge di Wien (in appendice) risulta che più caldo è un oggetto, più corta è la lunghezza d'onda a cui emetterà radiazione.

⁸⁷ In appendice.

- $\rho = 1$ sono dette “riflettenti”
- $\tau = 1$ sono dette “trasparenti”
- $\tau = 0$ sono dette “opache”
- $\alpha = 1$ per tutte le lunghezze d’onda definisce il “corpo nero”.

Un corpo nero quindi, per il principio di conservazione dell’energia, reirradia tutta la quantità di energia assorbita. Gli oggetti reali si discostano più o meno sensibilmente da

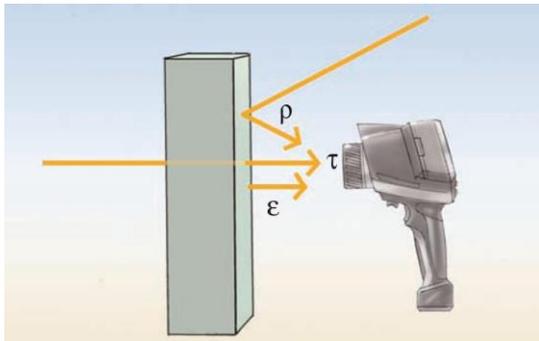


Figura 3-29: rappresentazione schematica delle radiazioni misurate dalla termocamera (emissione, trasmissione, riflessione).

questa caratteristica: l’energia irradiata dai corpi “non neri” può essere espressa come frazione dell’energia irradiata, alla stessa temperatura, da una superficie nera.

La radiazione registrata dalla termocamera, infatti, è composta da raggi emessi, riflessi e trasmessi provenienti dagli oggetti all’interno del campo visivo della termocamera (figura 3-29).

Il calcolo della temperatura superficiale dei corpi, quindi, deve tener conto di alcuni parametri, quali:

- emissività (ϵ) della superficie dell’oggetto analizzato, ovvero la frazione di energia irradiata da quel materiale rispetto all’energia irradiata da un corpo nero alla stessa temperatura. Per un corpo nero si ha $\epsilon = 1$, mentre per un oggetto qualsiasi si ha $0 < \epsilon < 1$. In tabella 3-6 sono riportati alcuni valori di emissività. A causa della rugosità delle superfici non è sempre possibile stabilire univocamente ϵ .

Tabella 3-6: valori di emissività di diversi materiali (Testo, 2008).

Materiale (temperatura del materiale)	Emissività
Alluminio, non ossidato (25°C)	0.02
Cemento (25°C)	0.93
Gesso (20°C)	0.90
Legno (70°C)	0.94
Carta (20°C)	0.97
Mattone, malta, intonaco (20°C)	0.93
Granito (20°C)	0,45

- Fattore di riflessione (ρ) è una misura della capacità di un materiale di riflettere le radiazioni IR. Dipende dalle proprietà superficiali, dalla temperatura e dal tipo di materiale (in generale, le superfici lisce e lucide riflettono più delle superfici ruvide e opache fatte dello stesso materiale). Per tener conto di ρ si utilizza il fattore di

compensazione della temperatura riflessa (*Reflected Temperature Compensation, RTC*) che può essere impostato manualmente nella termocamera. In molte applicazioni di misura, come nel nostro caso di studio, la *RTC* corrisponde alla temperatura ambiente.

- Fattore di trasmissione (τ) è una misura della capacità di un materiale di “lasciar passare” radiazioni IR. Come gli altri fattori, dipende dal tipo di materiale ma anche dal suo spessore. La maggior parte dei materiali non è trasmissiva, ossia permeabile ai raggi IR ad onda lunga.

Per questo motivo nel nostro caso di studio, possiamo semplificare l’equazione precedente come segue: $\varepsilon + \rho = 1$.

Ricapitolando quindi, la termografia è una tecnica in grado di rilevare la temperatura degli oggetti attraverso la misura della radiazione IR. In particolare la termocamera misura i raggi infrarossi a onda lunga (nel nostro caso) ricevuti nel suo campo visivo; in base a queste radiazioni calcola la temperatura superficiale del corpo esaminato.

In commercio attualmente esistono diverse tipologie di apparecchiature che è possibile ricondurre a due grosse famiglie: termocamere raffreddate e non-raffreddate, che si differenziano soprattutto per il tipo di sensore che montano (tabella 3-7).

Tabella 3-7: tipologie e caratteristiche fondamentali delle termocamere attualmente in commercio.

Tipo di termocamera	Sensore
Termocamera raffreddata	Foto-rilevatori: dispositivi costituiti da materiali semiconduttori nei quali la generazione di cariche elettriche è direttamente proporzionale all’assorbimento dei fotoni. In genere, al diminuire della temperatura del rilevatore (motivo per cui sono raffreddati) aumenta la precisione. Hanno uno spettro di lunghezza d’onda meno ampio dei termo-rilevatori ma maggiore sensibilità.
Termocamere non raffreddate	Termo-rilevatori che assorbono l’energia irraggiata dall’oggetto e misurano la variazione di temperatura in relazione alla variazione delle proprietà elettriche degli elementi sensibili (termocoppie, bolometri)

La termocamera utilizzata in questo lavoro di tesi (figura 3-30) sfrutta, come sensore, una matrice di Diodi ad Accoppiamento di Carica (*Charge Coupled Device* o *CCD-Matrix*).

Gli elementi a semiconduttore che costituiscono la matrice del circuito integrato sono sensibili a minime e rapide variazioni di temperatura, che consentono di fornire immagini termiche simili a quelli con sensori foto-rilevatori. La risoluzione geometrica del sensore, cioè il numero di pixel analizzati sull'immagine, corrisponde al numero di pixel sensibili che compongono la matrice a CCD. L'utilizzo di questi sensori comporta una minore manutenzione dello strumento e una maggiore silenziosità rispetto ai sistemi di raffreddamento meccanico, aspetto molto apprezzato nell'ambito della ricerca in ambienti come luoghi di lavoro, musei e biblioteche.



Figura 3-30: termocamera Testo 882, con impugnatura ergonomica (Da Testo, 2008).

I dispositivi basati sulla tecnologia CCD-Matrix presentano una matrice di sensori in grado di ricevere l'immagine dell'oggetto, la quale viene poi scomposta pixel per pixel. Una volta tarati tutti i sensori, inquadrando corpi neri riprodotti in laboratorio, la curva di taratura viene memorizzata dal computer della termocamera. Il segnale fornito in Volt dai sensori è di tipo analogico. Per essere convertito in digitale sono usati ADC (*Analog to Digital Convert*) a 12 bit che forniscono 4096 discretizzazioni. L'immagine è memorizzata nella memory card come se fosse una matrice all'interno della quale ad ogni pixel viene associato un numero (da 0 a 4095) rappresentante il valore di tensione che il sensore aveva registrato (Vasini et al., 2012). Le ottiche sono costituite da lenti al germanio, materiale che impedisce l'ingresso allo spettro della radiazione visibile ma è molto trasparente al passaggio della banda IR con $2.0 < \lambda < 14.0 \mu m$. Le ottiche in vetro, comunemente usate per le riprese nel visibile, non sono adatte al nostro scopo, dal momento che tale materiale risulta essere assolutamente opaco alla radiazione IR.

La scelta della termocamera adatta agli scopi prefissati implica una valutazione, da parte dell'operatore, di alcuni parametri fondamentali:

- range di ripresa, ovvero la scala termica che si deve analizzare;
- range spettrale, cioè la finestra dell'infrarosso che la termocamera analizza;
- risoluzione termica, ossia la massima differenza in termini di °C che il sensore è in grado di percepire su una medesima immagine;
- risoluzione geometrica del sensore, cioè il numero di pixel di cui è composto il sensore;

- IFOV (*Instantaneous Field Of View*), ovvero il più piccolo elemento rilevabile ad una determinata distanza di misura. Sull'immagine termica, le dimensioni di questo oggetto corrispondono ad un pixel. Ad esempio, la Testo 882 ha un IFOV di 1,7 mrad (tabella 3-8) pertanto la dimensione del pixel ad 1 m di distanza dal sensore sarà di 1,5 mm, a 10 m di distanza la superficie corrispondente ad un singolo pixel corrisponderà a 15 mm.

Assieme ai datalogger, la termocamera utilizzata in questo studio è stata fornita dal Laboratorio di Archeoingegneria della Seconda Facoltà di Ingegneria (Cusercoli - FC), grazie alla preziosa collaborazione del Direttore, il Professor Leonardo Seccia. Questo strumento è stato utilizzato nella modalità di *Super-Resolution*⁸⁸ (SR), ovvero acquisizione di immagini ad alta risoluzione.

Tabella 3-8: proprietà della termocamera Testo 882. Da (Testo, 2008).

Caratteristiche	Valori
Campo visivo - distanza di messa a fuoco minima	33° × 25° - 0.4 m
Formato immagine	640 × 480 pixel
Risoluzione geometrica	1.7 mrad
Frequenza di aggiornamento	8 ÷ 15 Hz
Display	3.5" LCD
Opzioni di visualizzazione	Immagine IR – Figura reale e IR – Figura reale
Palette di colori	9 opzioni
Campo di temperatura (commutabile)	Campo di misura 1: - 20 ÷ 100°C Campo di misura 2: 0 ÷ 350°C Campo di misura 3: 350 ÷ 550 °C
Accuratezza	± 2°C per campo di misura 1 ± 2°C o ± 2% del valore medio per campo di misura 2 ⁸⁹ ± 3% del valore medio per campo di misura 3
Incertezza	± 1°C ± 1%
Compensazione temperatura riflessa	Manuale
Impostazione emissività	0.01 ÷ 1.00
Temperatura di utilizzo	-15 ÷ 40 °C per il campo di misura 1 e 2 0 ÷ 40 °C per il campo di misura 3
Umidità relativa dell'aria	20 ÷ 80% non condensante

⁸⁸ La tecnica della SR implementata dalla Testo è coperta da brevetto ma la ditta dichiara che, in pratica, viene realizzata tramite l'acquisizione di più immagini Low Resolution acquisite in modo casuale durante una presa termografica, sfruttando i micromovimenti involontari della mano che regge la termocamera. Il risultato è un'immagine ad alta risoluzione (Vasini et al., 2012).

⁸⁹ Vale il valore maggiore.

Il rilevamento termografico nelle sale della Biblioteca Classense è stato svolto il giorno 7 agosto, durante il periodo della campagna di monitoraggio microclimatica. Come detto precedentemente, la termocamera, per poter calcolare correttamente la temperatura della superficie dell'oggetto di misura, necessita di alcune informazioni. Prima di acquisire un'immagine, infatti, sono stati inseriti i seguenti parametri:

- Temperatura ambiente
- Umidità relativa
- Emissività
- RTC

Temperatura ambiente ed umidità relativa sono state misurate tramite termoigrometro tascabile (modello Testo 810, figura 3-31).



Figura 3-31: termoigrometro tascabile: Modello Testo 810. Da (Testo, 2008).

Per determinare l'emissività, invece, esistono diverse possibilità:

- fare riferimento ai valori riportati in tabella 3-6, tenendo presente che sono sempre orientativi;
- attraverso una misura di riferimento con termometro a contatto;
- attraverso la misura della temperatura della superficie dell'oggetto in corrispondenza di una striscia di nastro adesivo nero ($\varepsilon \cong 1$), preventivamente posizionato. In questo modo, si misura l'effettiva temperatura superficiale dell'oggetto e, contemporaneamente, è possibile regolare il valore di emissività.

Nel nostro caso, non avendo a disposizione un termometro a contatto e non potendo utilizzare in alcun modo il nastro adesivo senza arrecare danno agli oggetti, sono stati utilizzati i valori tabellati (tabella 3-6), facendo attenzione a modificare il valore di ε a seconda dell'oggetto analizzato.

Per quanto riguarda la temperatura della radiazione riflessa (RTC) risulta che, una volta eliminate tutte le possibili fonti d'interferenza sulla misura (come luce diretta, flussi

d'aria), è possibile attribuire alla RTC lo stesso valore della temperatura ambiente⁹⁰ (Testo, 2008).

Durante l'acquisizione dell'immagine è possibile scattare in diverse modalità, acquisendo l'immagine ad IR o l'immagine reale; scegliendo la scala delle temperature; optando per una palette di colori piuttosto che un'altra; individuando sullo schermo LCD, il punto più caldo e quello più freddo; e tante altre potenzialità.

Una volta acquisite le diverse immagini, la termocamera è stata collegata tramite USB al PC per scaricare le immagini (in formato .bmt) per la fase di processing.

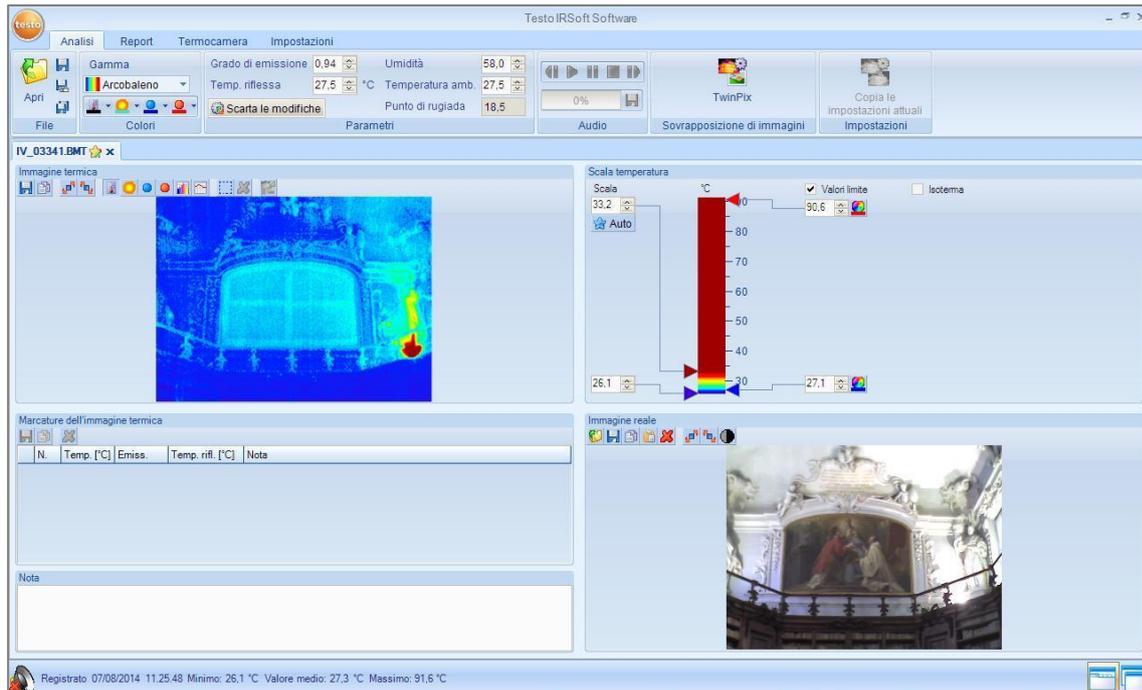


Figura 3-32: finestra di elaborazione Testo IRSoft 2.0.

Il software utilizzato (Testo IRSoft, Versione 2.0 – figura 3-32), fornito dalla stessa ditta produttrice, consente di effettuare numerose operazioni tra cui modificare ϵ e RTC, cambiare palette di colori per aumentare il contrasto dell'immagine e salvare i termogrammi in formati esportabili come .bmp e .jpeg.

⁹⁰ Ad eccezione degli oggetti che hanno un'emissività molto bassa ($\epsilon \leq 0,6$) per i quali questa procedura risulta troppo approssimativa.

3.1.2.4 Anemometro

Come suggerisce l'etimologia del termine, l'anemometro (dal greco *άνεμος*, vento, *μέτρο*, misura) è uno strumento atto a misurare la velocità dell'aria. A partire dalla sua invenzione, nel XV secolo, si sono sviluppate diverse metodologie, che si basano su differenti principi fisici. In meteorologia, è molto diffuso l'utilizzo dell'anemometro accoppiato ad un anemoscopio a banderuola per la contemporanea determinazione della direzione del vento. Tra i più semplici ricordiamo quelli nei quali la velocità dell'aria viene determinata misurando l'inclinazione che conferisce a un filo a piombo; un'altra tipologia di anemometro è basata sulla misurazione della frequenza di rotazione di un mulinello esposto al vento⁹¹. Queste tipologie di strumenti, qui sinteticamente descritte, sono adatte, tuttavia, a misurazioni di velocità dell'aria per studi meteorologici.

Per poter scegliere uno strumento adeguato alle analisi del microclima in ambienti confinati può risultare utile considerare quale tipo di ventilazione si rinviene nel luogo esaminato. In linea generale è possibile distinguere tre sistemi di ventilazione:

- ventilazione naturale, ovvero un ricambio d'aria che si verifica in un ambiente a porte e finestre chiuse, attraverso porosità dei muri e fessure degli infissi. Dipende da diversi fattori quali, ad esempio, la differenza di temperatura tra aria interna ed esterna (maggiore fattore di ricambio dell'aria) e il vento;
- ventilazione sussidiaria, che integra la ventilazione naturale senza alterare di molto le condizioni climatiche. Si può riprodurre aprendo porte e finestre, attraverso canne di ventilazione o bocche di ventilazione orizzontale;
- ventilazione artificiale, si presta particolarmente bene quando è necessario un ricambio d'aria costante (ad esempio, negli ospedali). Può essere attuata mediante sistemi che prevedono aperture praticate in una parete esterna a cui è applicato un ventilatore elicoidale o centrifugo, con funzionamento ad "aspirazione" (aspirano l'aria per mandarla all'esterno) o "a pressione" (aspirano l'aria esterna per immetterla nell'ambiente interno).

Risulta abbastanza intuitivo, quindi, che la ventilazione in ambienti interni (uffici, musei, chiese, biblioteche etc.) non possa essere misurata con gli usuali anemometri a coppe e banderuola, utilizzati nella meteorologia classica. I limiti strumentali di questi apparati, infatti, difficilmente consentono di rilevare i valori di flusso d'aria "indoor", in quanto la circolazione interna presenta, tipicamente, valori al di sotto del loro limite registrabile

⁹¹ A palette ad asse orizzontale, orientato da una banderuola, come nell'anemometro Richard ovvero a 3 o 4 coppe emisferiche o coniche; a asse verticale, come nell'anemometro Robinson.

(rilevabile) a causa della loro elevata inerzia (Camuffo, 1998). La ventilazione naturale in ambienti interni, gli influssi d'aria dall'esterno, la ventilazione in prossimità delle superfici, vengono misurati con uno strumento chiamato anemometro a filo caldo. Si tratta di una tecnologia ad alta precisione e con un'elevata sensibilità alle basse velocità. Questo strumento opera sul principio fisico per cui la perdita di calore di un corpo è legata al flusso d'aria che lo attraversa. In particolare, questo tipo di anemometro è costituito da una termoresistenza, ovvero una resistenza il cui valore è proporzionale alla temperatura. Attraverso la corrente elettrica di intensità nota, si alimenta la resistenza in maniera tale da portarla ad una temperatura maggiore di quella del fluido da misurare. In altre parole, il calore perso dall'elemento sensibile dipende dalle caratteristiche del sensore (temperatura, forma geometrica, dimensione) e anche da quelle dell'aria (velocità, temperatura, pressione). Poiché l'unica variabile incognita è la velocità dell'aria, la perdita di calore misura la variazione di velocità. L'elemento sensibile è costituito da un sottilissimo filamento (a seconda della ditta produttrice il diametro può variare nell'ordine di μm o mm) surriscaldato per effetto Joule⁹². La quantità di calore che l'aria in movimento asporta dipende dalla velocità di ventilazione oltre che dallo sbalzo termico. I limiti della misura sono praticamente fissati dallo strumento registratore. In generale, l'anemometro a filo caldo ha una risposta veloce (costante di tempo inferiore a 1 sec), una risoluzione che può arrivare a $1-2 \text{ cms}^{-1}$ ed è molto sensibile alle basse velocità, tipiche di un ambiente confinato.

Per questi motivi, al fine di procedere ad una raccolta di dati sulla velocità dell'aria tale da poter, eventualmente, anche tornare utile per una futura applicazione di un modello di termofluidodinamica computazionale⁹³, è stato utilizzato l'anemometro a filo caldo (modello VelociCalc Plus, modello 8386A della TSI – figura 3-33).

⁹² In appendice.

⁹³ L'applicazione di un modello di termo-fluidodinamica ha esulato gli scopi e gli ambiti di questa tesi, ma potrà costituire un interessante sviluppo futuro di questo lavoro, anche in differenti locali della Biblioteca Classense.



Figura 3-33: anemometro a filo caldo VELOCICALC®Plus Air Velocity Meter, Modello 8386A. Da (TSI, 2010).

Anche questo strumento ci è stato fornito dal Laboratorio di Archeoingegneria della Seconda Facoltà di Ingegneria (Cusercoli – FC).

Si tratta di uno strumento portatile, silenzioso e maneggevole, particolarmente adatto ad analisi condotte in luoghi come musei e biblioteche. Il VELOCICALC®Plus prodotto dalla TSI è in grado di misurare e memorizzare diversi parametri dell'aria in cui è immerso mediante una singola sonda con sensori multipli. Il modello 8386A misura la velocità, la temperatura, la pressione differenziale, l'umidità relativa, la portata volumetrica, il punto di rugiada, la temperatura di bulbo bagnato ed il flusso di calore. Le misure di velocità sono eseguite dal sensore termico. Di seguito sono elencate le caratteristiche tecniche del VELOCICALC®Plus 8386A:

Tabella 3-9: caratteristiche tecniche del modello VELOCICALC®Plus 8386 della TSI (TSI, 2010).

Caratteristiche	Valori
Velocità dal sensore termico	
Range di misura	0 ÷ 50 ms ⁻¹
Accuratezza	± 0.015 ms ⁻¹
Precisione	0.01 ms ⁻¹
Velocità dal tubo di Pitot	
Range di misura	1.27 ÷ 78.7 ms ⁻¹
Accuratezza	± 10.16 ms ⁻¹
Precisione	± 0.1 ms ⁻¹
Portata volumetrica	Il range è una funzione della velocità, pressione e turbolenza
Temperatura	
Range di misura	-10 ÷ 60 °C
Accuratezza	±0.3 °C
Precisione	0.1 °C
Umidità relativa	
Range di misura	0 ÷ 95 %
Accuratezza	±3%
Precisione	0.1 %
Temperatura di bulbo bagnato	
Range di misura	5 ÷ 60 °C
Precisione	0.1 °C
Temperatura di rugiada	
Range di misura	-15 ÷ 49 °C
Precisione	0.1 °C
Tempo di risposta	
Velocità	200 msec
Temperatura	2 min
Umidità	< 1 min
Dimensioni	
Strumento	10.7 cm × 18.3 cm × 3.8 cm
Sonda	101.6 cm × 7.01 mm × 10.03mm

Come si vede dalla figura 3-33, lo strumento è dotato di una sonda su un braccio telescopico, la cui posizione può essere modificata a seconda delle esigenze operative. In generale, l'utilizzo dell'anemometro non presuppone particolari conoscenze da parte

dell'operatore; tuttavia è sempre opportuno comportarsi evitando alcune azioni che possano interferire con la misura. Al momento dell'acquisizione è fondamentale considerare l'influenza derivata dall'operatore: è necessario considerare, infatti, preventivamente, la posizione della sonda in maniera tale da non modificare la presenza di eventuali flussi d'aria naturali con la fisicità di chi effettua la misura. Si tratta di precauzioni dettate dalla ragionevolezza delle misure effettuate; nel nostro caso, ci è sembrato opportuno utilizzare il braccio telescopico per tutte le misure alle differenti altezze. Inoltre, considerando la dipendenza dell'elemento sensibile da altri fattori, come detto precedentemente, prima di procedere con l'acquisizione sono stati impostati nell'anemometro:

- temperatura dell'aria ambiente, misurata tramite termoigrometro tascabile (modello Testo 810, figura 3-31).
- pressione, impostata sulla base di quanto riportato dal sito dell'ARPA relativamente ai dati di pressione (*hPa*) per la stazione di monitoraggio meteo di Ravenna urbana⁹⁴.

Le indagini anemometriche sono state condotte in tutte le sale della Biblioteca Classense al fine di raccogliere una quantità di dati sulla velocità dei flussi d'aria sufficiente all'implementazione di un possibile, futuro, modello di termofluidodinamica. Modello con il quale le informazioni relative alla geometria della sala, ai gradienti termici e ai flussi d'aria sono elaborate attraverso l'applicazione di un modello a volumi finiti di ventilazione interna, quali, ad esempio, un software di termofluidodinamica computazionale (*Computational Fluid Dynamics*, CFD), come il FLUENT. Diversi studi in letteratura affrontano, infatti, il dibattuto tema del *thermal comfort* attraverso il CFD-modelling⁹⁵.

Nel nostro caso di studio, tuttavia, sia in condizioni di ventilazione naturale, sia in condizioni sussidiarie, non sono stati registrati flussi d'aria significativi per l'elaborazione del modello, come inizialmente ipotizzato. L'inerzia termica delle pareti, l'assenza di apparecchiature che forzino il sistema di ventilazione, ci consente di descrivere i flussi d'aria, nelle sale in cui sono state condotte le analisi anemometriche, in regime pressoché stazionario e statico. In conclusione, quindi, per i suddetti motivi di stazionarietà locale dei flussi d'aria esaminati nei locali della Biblioteca Classense, non è

⁹⁴ La stazione di Ravenna urbana rientra tra le stazioni meteo locali della Rete Idrometeorologica Regionale. Latitudine: 44°24'. Longitudine: 12°11'. Altitudine: 16 m.

⁹⁵ Per ulteriori dettagli si vedano (Papakonstantinou et al., 2000) e (Uyttenhove et al., 2004)

stato possibile applicare, nelle condizioni rilevate nell'ambito del presente lavoro, modelli CFD al caso specifico.

3.1.2.5 Luxmetro

Tutti gli ambienti che possono contenere opere od oggetti che necessitano di essere conservati (chiese, biblioteche, archivi etc.) necessitano di un sistema di illuminazione, naturale o artificiale, a seconda dell'ora del giorno, della stagione e della struttura architettonica. È evidente, però, che la presenza di luce comporta, come conseguenza, che una parte di energia che colpisce l'oggetto sarà assorbita dallo stesso. Anche l'Ente Nazionale Italiano di Unificazione prescrive, nella già citata norma UNI 10829:1999, una metodologia per la misurazione in campo sia delle grandezze ambientali termoisometriche, sia di illuminazione, ai fini della conservazione di beni di interesse storico e artistico. Infatti, alla stregua dei parametri di temperatura e umidità, sono riportati valori di riferimento consigliati anche per l'illuminazione.

L'energia luminosa viene emessa da una sorgente (ad esempio, sole o lampada) secondo uno specifico spettro in funzione della temperatura.⁹⁶ La radiazione utile alla visione di un'opera d'arte è chiaramente quella che esplora le lunghezze d'onda della banda del visibile (indicativamente compresa tra $380 \text{ nm} < \lambda < 760 \text{ nm}$). Le altre radiazioni con differenti lunghezze d'onda non sono utili alla visione, ma sono più o meno energetiche e quindi potenzialmente dannose per gli oggetti. Lo spettro della luce emessa dalla sorgente deve, per questa ragione, essere centrato nella banda di frequenza del visibile, riducendo al massimo le frequenze relative alla radiazione infrarossa (IR) ed ultravioletta (UV), entrambe dannose, sebbene per differenti motivi. L'assorbimento della luce nella banda del visibile e dell'ultravioletto è dovuto, infatti, all'eccitazione elettronica: ciò può determinare variazioni di colore, alterazione dei leganti e dei pigmenti organici, quindi sbiadimento e ingiallimento. L'assorbimento nella banda dell'infrarosso, dovuto ad eccitazione molecolare, causa invece un aumento della temperatura (Ginell, 1994). Tuttavia, occorre tener presente che, anche se la radiazione che colpisce l'oggetto ha lunghezze d'onda solo nel visibile, la frazione assorbita dal materiale viene successivamente trasformata in calore. In definitiva, quindi, un oggetto che riceve energia sotto forma di radiazione tende sempre a riscaldarsi, sebbene in misura differente a seconda della lunghezza d'onda. Ai fini di una migliore conservazione occorre cercare di illuminare l'oggetto con un'energia che abbia la massima emissione nel visibile, eliminando, ove possibile, la restante parte dello spettro (Bernardi, 2004). Per questi

⁹⁶ Si veda paragrafo 3.1.2.3. Termocamera e appendice.

motivi, è necessario considerare che le radiazioni luminose, in particolare quelle a frequenza maggiore, determinano il rapido degrado dei materiali organici che costituiscono l'oggetto del presente studio e rappresentano, pertanto, un altro importante fattore di rischio.

Nel corso dei sopralluoghi sono state effettuate indagini illuminotecniche in diversi punti delle sale della Biblioteca Classense. In particolare mediante luxmetro (figura 3-34) sono stati registrati i valori di illuminamento (E).



Figura 3-34: luxmetro HD 9221 con collegato sonda LP9221 per l'illuminamento espresso in lux. Da (Delta Ohm Srl, 2014).

Si tratta di uno strumento, questo, in grado di misurare l'illuminamento, ovvero il rapporto tra il flusso luminoso emesso da una fonte naturale e/o artificiale ricevuto da un elemento di superficie contenente il punto e l'area dell'elemento stesso. L'illuminamento, misurato in *lux*, è la grandezza su cui si basano tutte le norme tecniche per la conservazione e non tiene conto delle caratteristiche di riflessione della superficie investita (il colore) e quindi della quantità di flusso che, una volta riflessa, raggiunge l'occhio dell'osservatore: ciò implica che l'illuminamento non è strettamente connesso alla percezione dell'ambiente luminoso da parte dell'operatore. Lo strumento, nel suo complesso, consta di due parti: il corpo dello strumento e il sensore vero e proprio, costituito generalmente da una cella fotovoltaica (o fotoelettrica) che, sotto l'effetto dell'energia luminosa, reagisce provocando una corrente elettrica che viene rilevata da un galvanometro, la cui scala è tarata in *lux*. L'indagine illuminotecnica è stata condotta il giorno 28 luglio in tutte le sale della Biblioteca. Secondo la distinzione riportata dalla UNI 10829:1999 si suole distinguere due casi di illuminamento: solo artificiale oppure artificiale e naturale. A seconda della tipologia di illuminamento, variano le modalità di esecuzione dei rilievi spazio-temporali. Nel nostro specifico contesto di studio si è assunta

una condizione di illuminamento solo artificiale, dal momento che le aperture verso l'esterno di ogni sala sono munite di schermi per minimizzare la diffusione della luce naturale. In questo caso, quindi, è sufficiente misurare una sola volta l'illuminamento orizzontale su un piano posto ad un'altezza di 0.8 m dal pavimento.

Come suggerisce il manuale dello strumento, per ottenere misure affidabili, bisogna evitare variazioni troppo rapide delle sorgenti luminose, motivo per cui le misurazioni sono state effettuate almeno dopo 15 minuti dall'accensione degli apparecchi.

Di seguito sono riportate alcune caratteristiche tecniche del fotometro utilizzato (tabella 3-10):

Tabella 3-10: caratteristiche tecniche del luxmetro HD9221 con sonda fotometrica da (Delta Ohm Srl, 2014).

Caratteristiche	Valori
Campo spettrale	400 ÷ 760 nm
Range di misura	0 ÷ 200'000 lux
Frequenza di conversione	2 s
Precisione sonda	±5%
Risoluzione	≤ 200 = 0.1
	≥ 200 = 1
Temperatura di lavoro	0 ÷ 50 °C
Umidità relativa di lavoro	10 ÷ 85 %

4. PRESENTAZIONE E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

I dati raccolti sono stati opportunamente elaborati con comuni software commerciali per essere graficati, allo scopo di avere una visione complessiva dell'andamento dei parametri ambientali nell'arco temporale della campagna di misure. A partire dall'analisi dettagliata di ogni specifico parametro, passando per lo sviluppo di una proposta metodologica di analisi del rischio, risulta possibile ricavare considerazioni finalizzate al miglioramento delle condizioni microclimatiche degli ambienti di conservazione. Le misure di illuminamento e anemometriche non sono state elaborate statisticamente poiché per queste variabili è stato eseguito un singolo campionamento. Si riporta, tuttavia, che sulla base di tale unica misura, la velocità dell'aria risulta molto bassa, prossima al limite strumentale; le misure di illuminamento, invece, rientrano nei limiti consigliati dall'UNI per gli ambienti adibiti alla conservazione. Per quanto riguarda le immagini termografiche, invece, non sono stati riscontrati particolari punti freddi o caldi (*hot spot*). Per questo motivo, i risultati della campagna di monitoraggio saranno presentati nei seguenti paragrafi, in quest'ordine:

- Dati termoigrometrici
- Valori di concentrazione di NO₂ e O₃

4.1 Risultati della campagna di monitoraggio

Vi sono diverse modalità di elaborazione e di possibile presentazione dei risultati termoigrometrici: in questo caso, inizialmente, i valori raccolti saranno riportati sotto forma di grafici in cui si mostra l'andamento temporale delle variabili misurate in continuo: temperatura e umidità relativa. Queste variabili saranno poi confrontate con le variabili esterne e, successivamente, con i limiti suggeriti dall'UNI 10586:1997. I grafici elaborati descrivono le variabili termoigrometriche per i seguenti ambienti:

- Sala dei Santi Padri
- Sala Dantesca
- Ex Refettorio
- Aula Magna (livello inferiore)
- Aula Magna (livello superiore)

Come si può notare, nel caso dell'Aula Magna, sono state considerate due altezze differenti, essendo, questa, una grande sala che si sviluppa su due livelli; si è voluto, così, poter verificare un'eventuale stratificazione delle masse d'aria.

I dati relativi all'ambiente esterno sono stati ricavati dal sistema Dexter tramite accesso diretto al database del servizio idrometeorologico della Regione Emilia Romagna. In particolare, sono stati raccolti i dati orari delle condizioni outdoor relativi alla stazione Ravenna Urbana⁹⁷, ossia la stazione più prossima alla Biblioteca Classense e quindi più rappresentativa delle condizioni ambientali esterne.

Di seguito si riportano i risultati della campagna di monitoraggio, in particolare: tabelle, contenenti i valori statistici del database, e grafici descrittivi di ciascun ambiente oggetto di studio, per la lettura dei quali si rimanda alla seguente legenda:

- Temperatura interna
- Temperatura esterna
- · - · Temperatura di rugiada
- Umidità relativa (o RH) interna
- Umidità relativa (o RH) esterna

⁹⁷ La stazione di Ravenna urbana rientra tra le stazioni meteo locali della Rete Idrometeorologica Regionale. Latitudine: 44°24'. Longitudine: 12°11'.

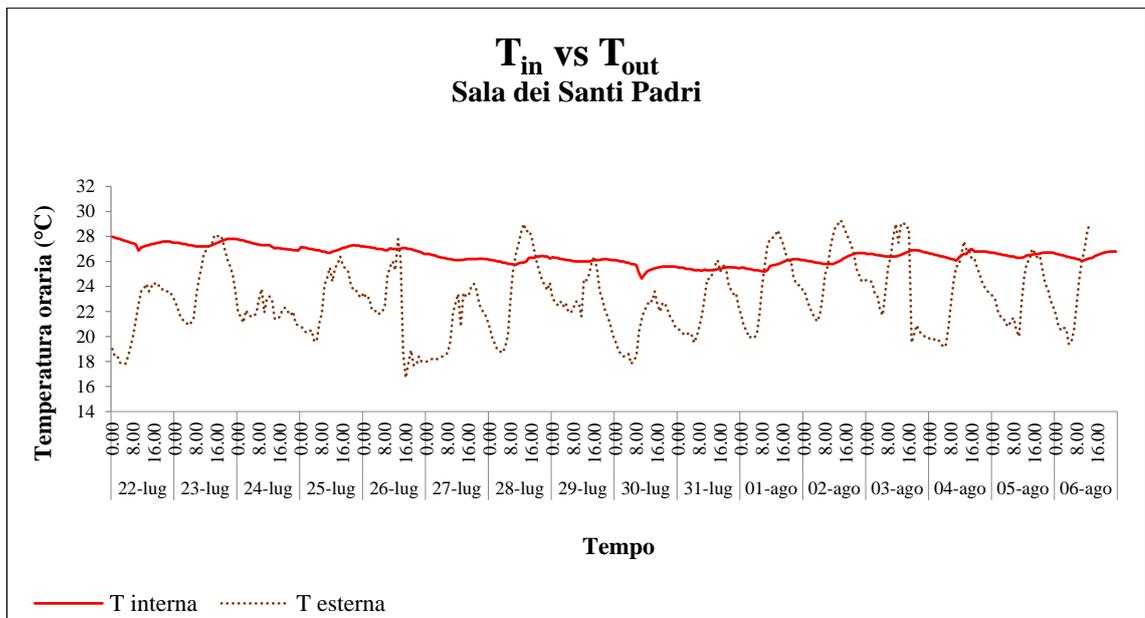


Grafico 4-1: andamento temporale delle temperature medie orarie interne ed esterne per la Sala dei Santi Padri.

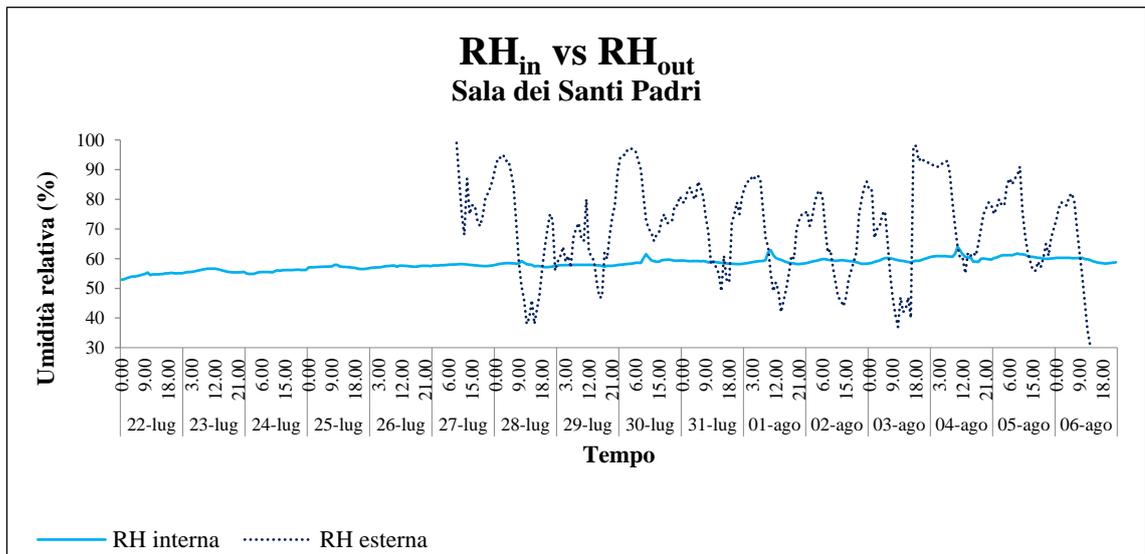


Grafico 4-2: andamento temporale delle umidità relative medie orarie interne ed esterne per la Sala dei Santi Padri.

Tabella 4-1: statistica delle variabili di temperatura e umidità relativa per la Sala dei Santi Padri.

Sala dei Santi Padri	Temperatura		Umidità relativa	
	Interna	Esterna	Interna	Esterna
Numero di osservazioni	5600	374	5600	303
Media	27.1 °C	23.0 °C	57.5 %	69.7 %
Deviazione standard	0.67 °C	2.9 °C	1.97%	15.5 %
Valore minimo	24.6 °C	16.7 °C	52.7 %	31.0 %
Valore massimo	28.0 °C	29.3 °C	64.3 %	99.0 %

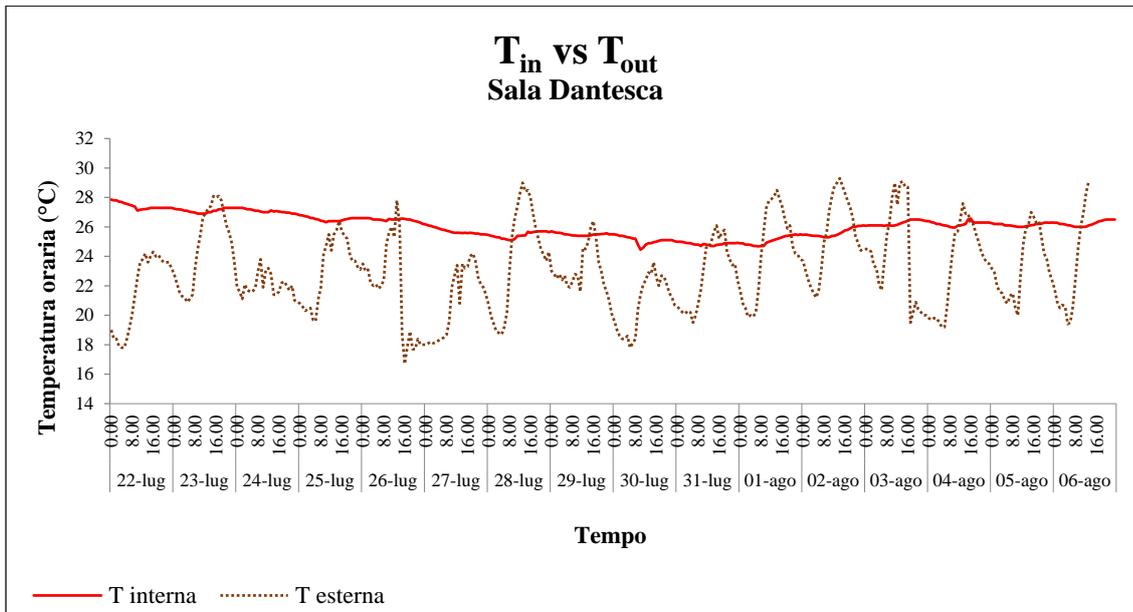


Grafico 4-3: andamento temporale delle temperature medie orarie interne ed esterne per la Sala Dantesca.

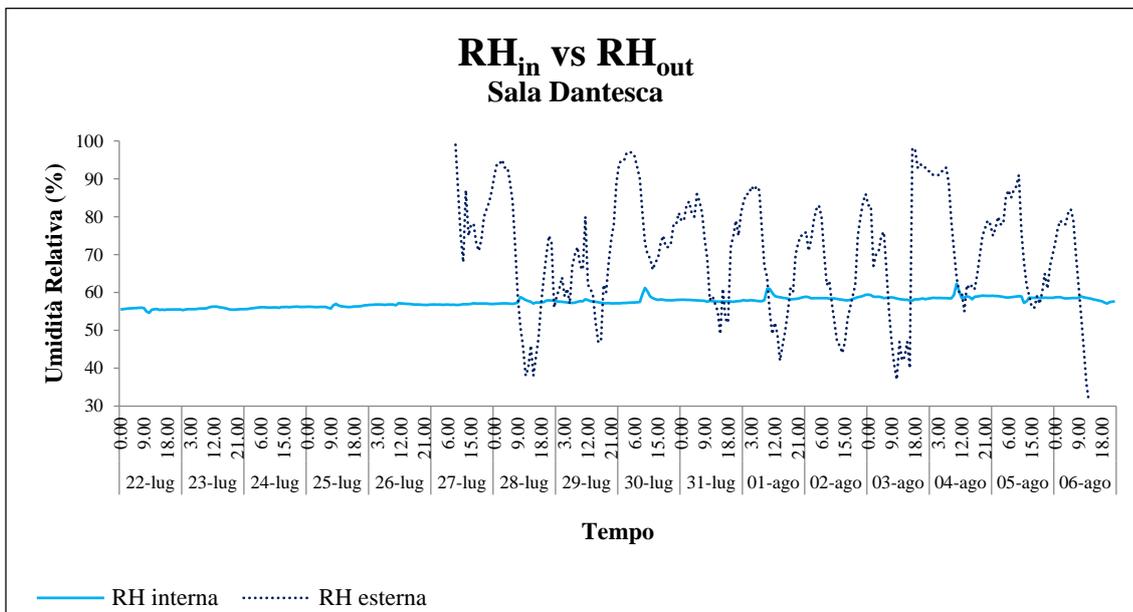


Grafico 4-4: andamento temporale delle umidità relative medie orarie interne ed esterne per la Sala Dantesca.

Tabella 4-2: statistica delle variabili di temperatura e umidità relativa per la Sala Dantesca.

Sala Dantesca	Temperatura		Umidità relativa	
	Interna	Esterna	Interna	Esterna
Numero di osservazioni	5599	374	5599	303
Media	26.7 °C	23.0 °C	56.4 %	69.7 %
Deviazione standard	0.79 °C	2.9 °C	0.79%	15.5 %
Valore minimo	24.4 °C	16.7 °C	53.7 %	31.0 %
Valore massimo	27.9 °C	29.3 °C	62.7 %	99.0 %

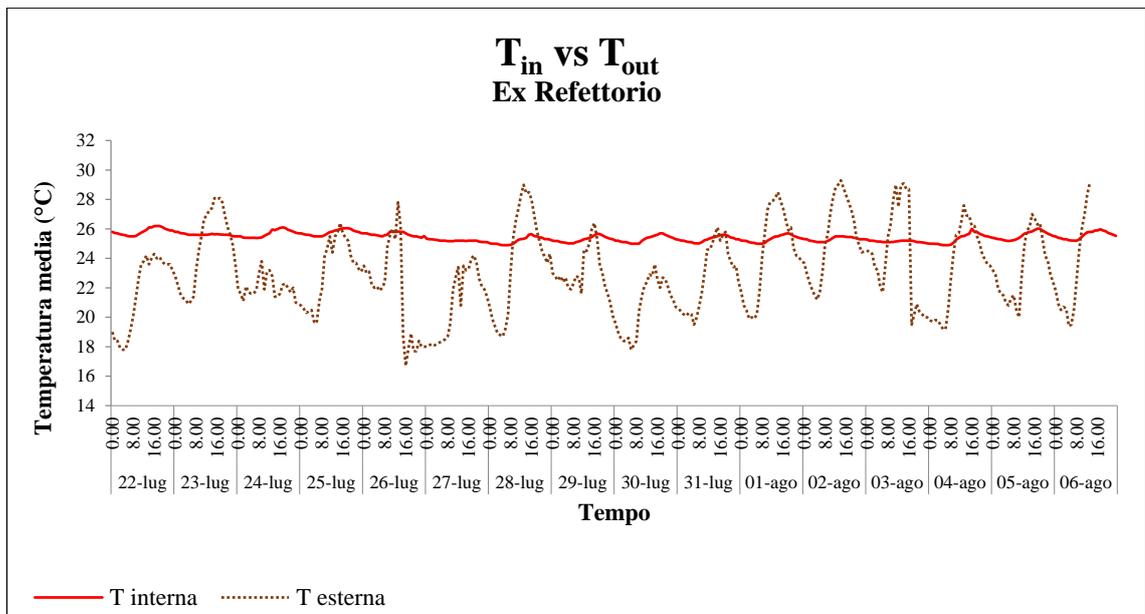


Grafico 4-5: andamento temporale delle temperature medie orarie interne ed esterne per l'Ex Refettorio.

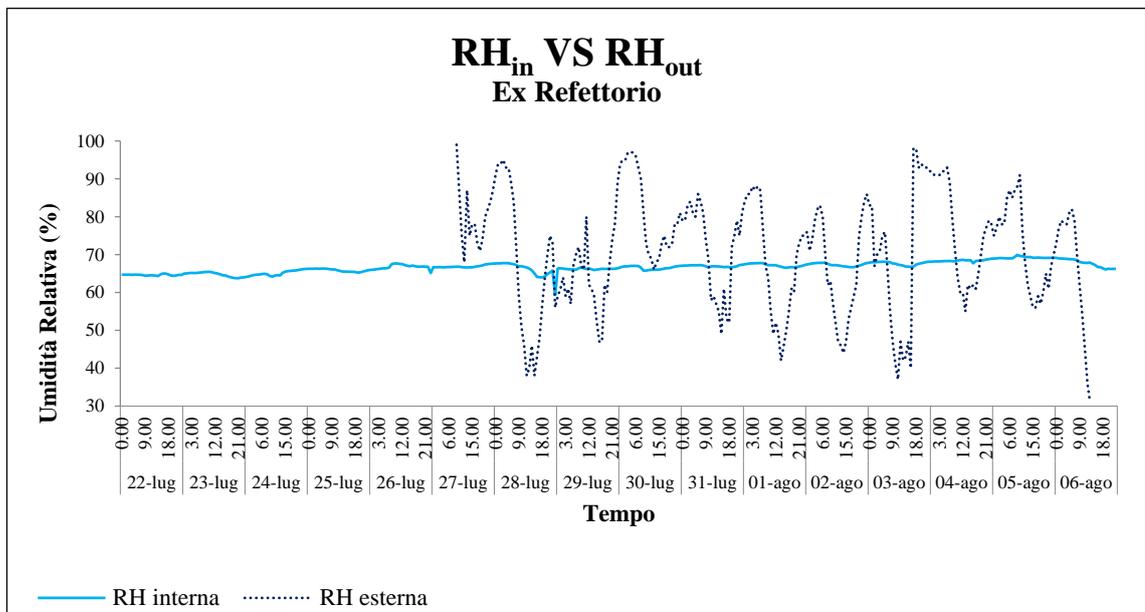


Grafico 4-6: andamento temporale delle umidità relative medie orarie interne ed esterne per l'Ex Refettorio.

Tabella 4-3: statistica delle variabili di temperatura e umidità relativa per l'Ex Refettorio.

Ex Refettorio	Temperatura		Umidità relativa	
	Interna	Esterna	Interna	Esterna
Numero di osservazioni	5702	374	5702	303
Media	25.6 °C	23.0 °C	65.5 %	69.7 %
Deviazione standard	0.28 °C	2.9 °C	1.36 %	15.5 %
Valore minimo	24.9 °C	16.7 °C	63.6 %	31.0 %
Valore massimo	26.5 °C	29.3 °C	70.0 %	99.0 %

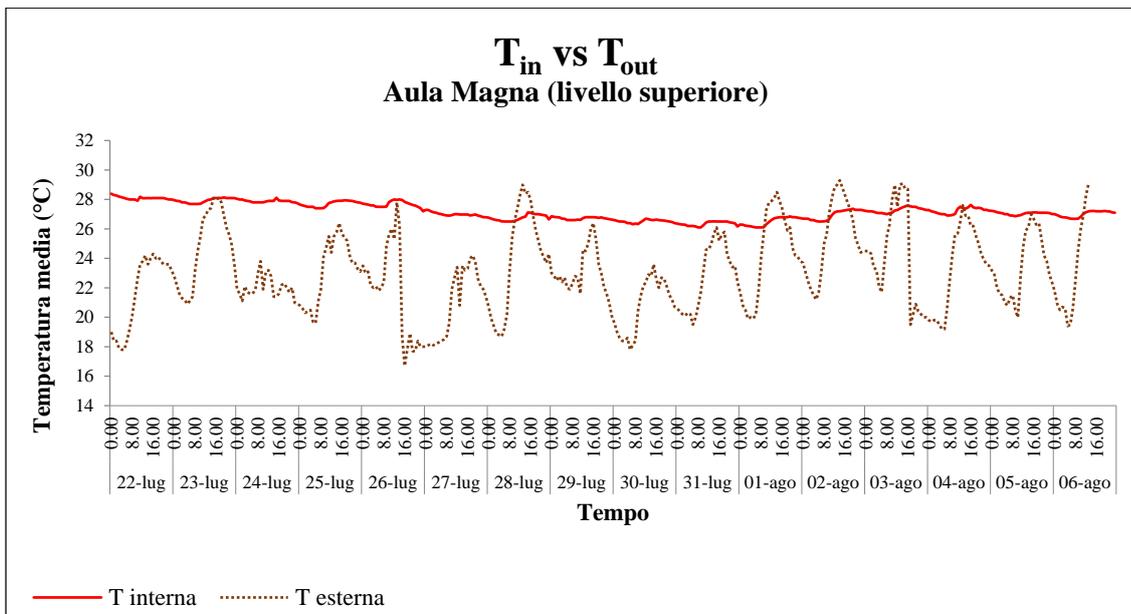


Grafico 4-7: andamento temporale delle temperature medie orarie interne ed esterne per l'Aula Magna (livello superiore).

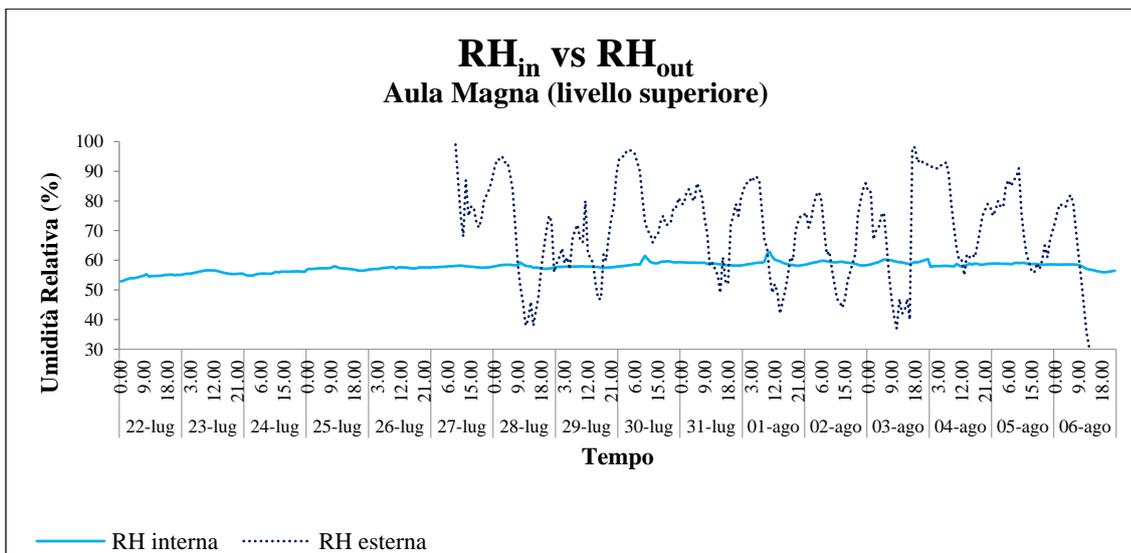


Grafico 4-8: andamento temporale delle umidità relative medie orarie interne ed esterne per l'Aula Magna (livello superiore).

Tabella 4-4: statistica delle variabili di temperatura e umidità relativa per l'Aula Magna (livello superiore).

Aula Magna (livello superiore)	Temperatura		Umidità relativa	
	Interna	Esterna	Interna	Esterna
Numero di osservazioni	5679	374	5679	303
Media	27.6 °C	23.0 °C	54.7 %	69.7 %
Deviazione standard	0.56 °C	2.9 °C	1.66 %	15.5 %
Valore minimo	26.1 °C	16.7 °C	51.8 %	31.0 %
Valore massimo	27.6 °C	29.3 °C	63.7 %	99.0 %

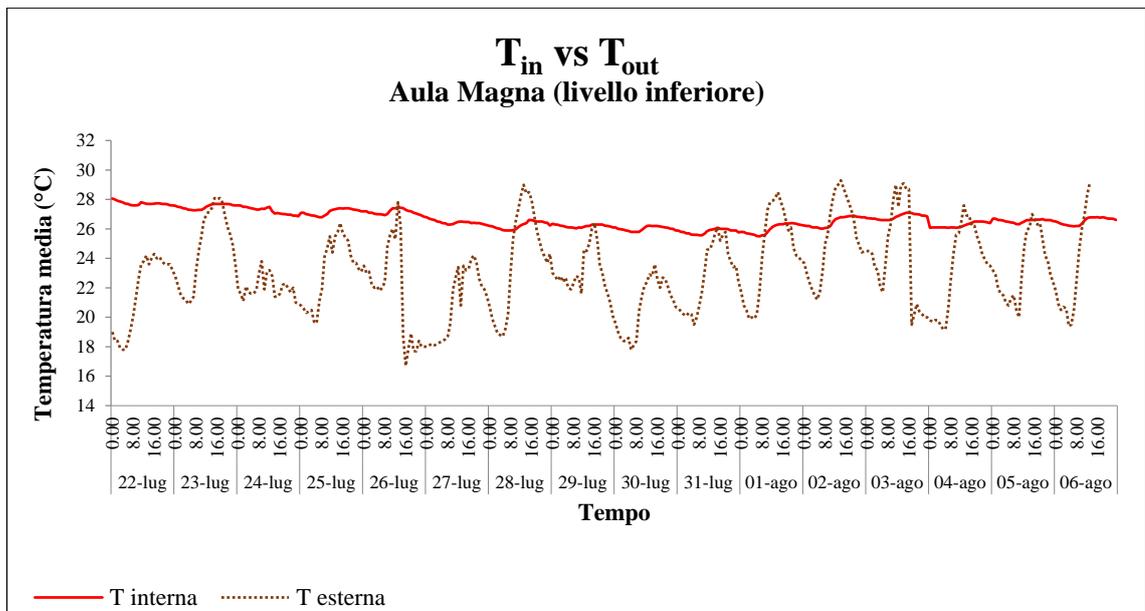


Grafico 4-9: andamento temporale delle temperature medie orarie interne ed esterne per l'Aula Magna (livello inferiore).

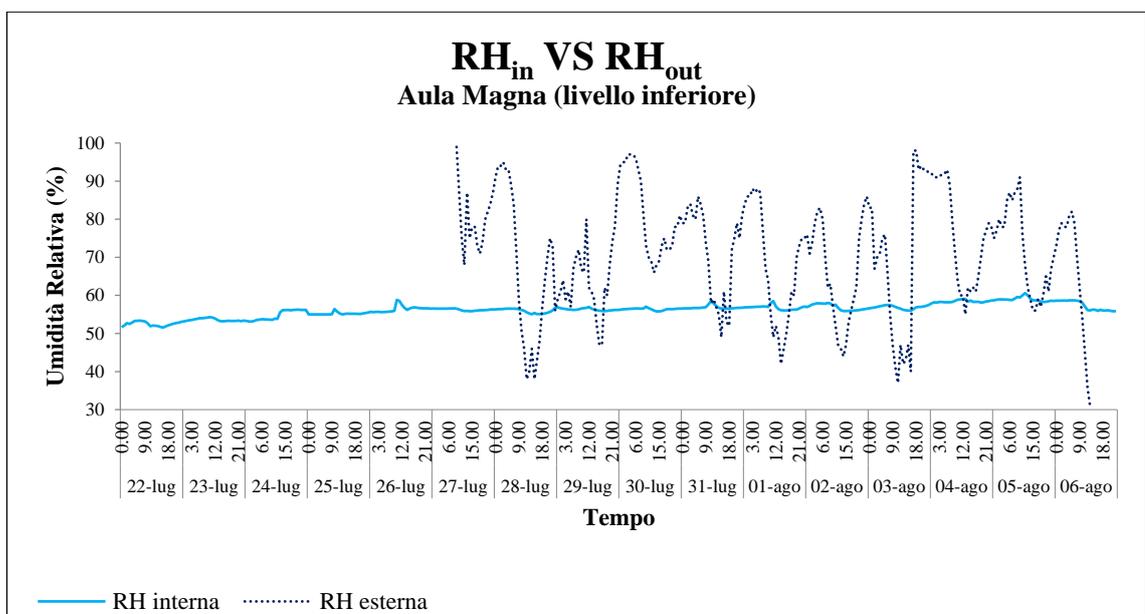


Grafico 4-10: andamento temporale delle umidità relative medie orarie interne ed esterne per l'Aula Magna (livello inferiore).

Tabella 4-5: statistica delle variabili di temperatura e umidità relativa per l'Aula Magna (livello inferiore).

Aula Magna (livello inferiore)	Temperatura		Umidità relativa	
	Interna	Esterna	Interna	Esterna
Numero di osservazioni	5689	374	5689	303
Media	27.2 °C	23.0 °C	54.4 %	69.7 %
Deviazione standard	0.61°C	2.9°C	1.93%	15.5%
Valore minimo	25.5 °C	16.7 °C	51.2 °C	31.0 %
Valore massimo	28.2 °C	29.3 °C	63.6 %	99.0 %

Dall'analisi dei dati registrati si nota come le condizioni termoigrometriche dell'aria negli ambienti interni siano influenzate da quelle esterne: in particolare, gli andamenti della variabili di temperatura (T) e umidità relativa (RH) seguono, con un certo ritardo, quelli esterni dell'edificio. Il motivo di questo andamento probabilmente è da ricercare nel fatto che attraverso le antiche pareti dell'involucro edilizio, sottoposte a sollecitazioni termiche variabili nel tempo, si generino flussi di calore le cui intensità sono funzione dello spessore e delle proprietà termiche delle pareti stesse. Ciò si evince, particolarmente, dalla differenza di escursione termica dal dì alla notte: in ambiente esterno si registrano notevoli variazioni di temperatura nell'arco delle 24 ore, mentre all'interno dell'edificio si rilevano gradienti di temperatura meno accentuati. In conclusione, quindi, la caratteristica più evidente risulta essere l'elevata inerzia termica dell'edificio, capace di isolare considerevolmente, l'ambiente esterno da quello interno.

Per una maggiore comprensione degli andamenti temporali è utile sottolineare che talvolta il personale autorizzato provvede all'apertura delle finestre, dalle ore 9 alle ore 11. Questa prassi è, invero, prevista dalla norma UNI 10586:1997 in casi di necessità, come in questo contesto contingente; ossia in assenza di sistemi di ventilazione e/o condizionamento. La norma stessa al contempo, infatti, stabilisce che gli impianti di ventilazione e condizionamento debbano assicurare il necessario ricambio delle masse d'aria. È quindi giusta prassi della Biblioteca Classense aprire le finestre in alcune sale della Biblioteca (come la Sala dei Santi Padri in esame), con particolari accortezze (in assenza di pioggia, alle prime ore del mattino con temperature atmosferiche più basse, con scudi chiusi per non far entrare la luce solare diretta) per favorire gli scambi d'aria. Ciò è stato registrato anche dai dataloggers, in corrispondenza di alcuni picchi di valore durante le prime ore di apertura della Biblioteca.

Si riporta, a seguire, il grafico che confronta nelle medesime sale temperatura ed umidità relativa interna; ulteriore dimostrazione del fatto che ogni sala può essere approssimata ad un sistema chiuso, il cui stato è funzione unicamente dei suoi parametri termodinamici. Si noti, infatti, come all'aumentare della temperatura diminuisce l'umidità relativa (e viceversa)⁹⁸. Questa caratteristica contraddistingue tutte le sale eccetto l'Ex Refettorio, dal momento che quest'ultimo è frequentato da numerosi utenti della Biblioteca (per lo più studenti), che spesso, viste le alte temperature, lasciavano le porte aperte, provocando così

⁹⁸ Nel raffreddamento dell'aria umida, ad esempio, a pressione totale costante, resta costante la pressione parziale del vapore, mentre diminuisce quella di saturazione; ne segue che anche il contenuto igrometrico del vapore resta costante, mentre l'umidità relativa aumenta.

mixing d'aria nella suddetta sala (ciò si nota particolarmente a partire dai primi giorni di agosto). Nei seguenti grafici è riportata, inoltre, la temperatura di rugiada (o *dew point*), ovvero la temperatura alla quale dovrebbe essere portata (raffreddando) una massa d'aria affinché questa diventi satura di vapore acqueo, quindi inizi la condensazione. Si noti come, nel periodo di misura, la differenza tra temperatura reale e il punto di rugiada si attesti intorno ai 10 °C.

A tal proposito, sarebbe interessante, come sviluppo futuro di questo lavoro di ricerca, ripetere la stessa campagna di monitoraggio in altri periodi dell'anno, che evidentemente mostrano differenti condizioni, come ad esempio, il periodo invernale.

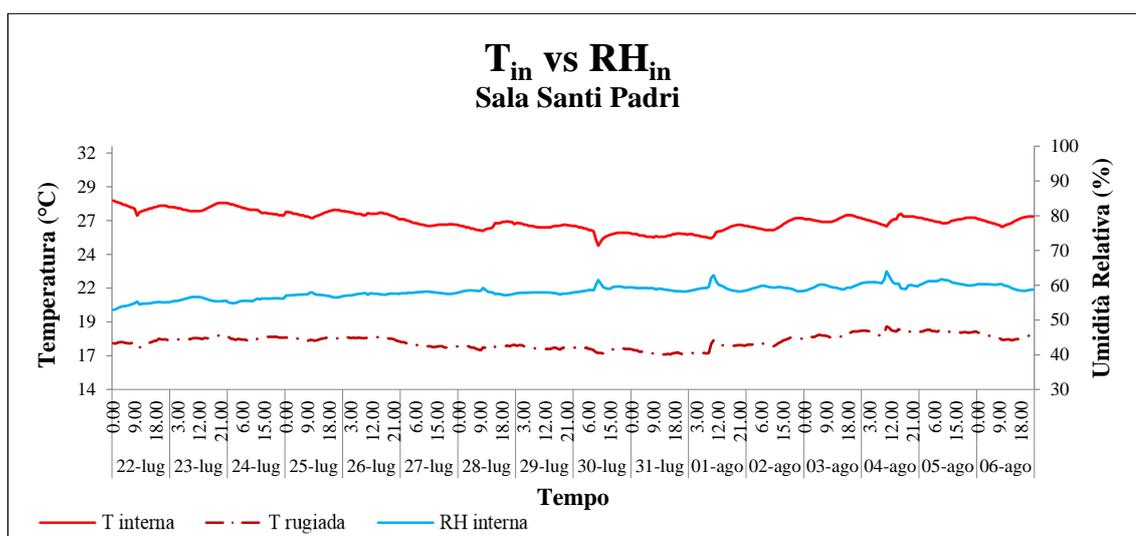


Grafico 4-11: andamenti temporali della temperatura (linea rossa continua), umidità relativa (linea blu continua) e temperatura di rugiada (linea rossa tratteggiata) per la Sala dei Santi Padri.

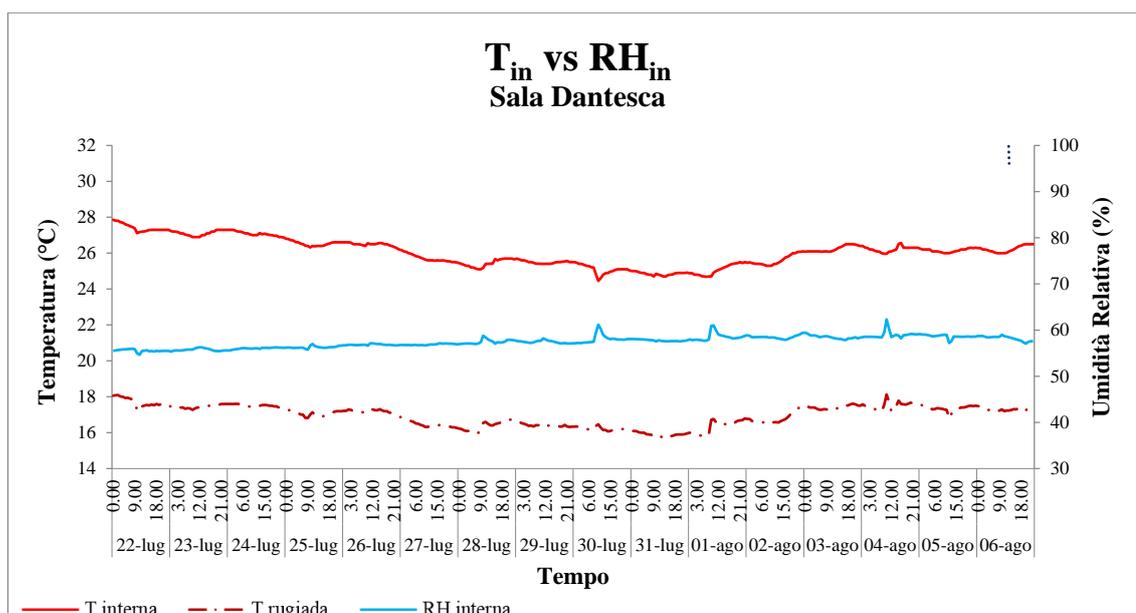


Grafico 4-12: andamenti temporali della temperatura (linea rossa continua), umidità relativa (linea blu continua) e temperatura di rugiada (linea rossa tratteggiata) per la Sala Dantesca.

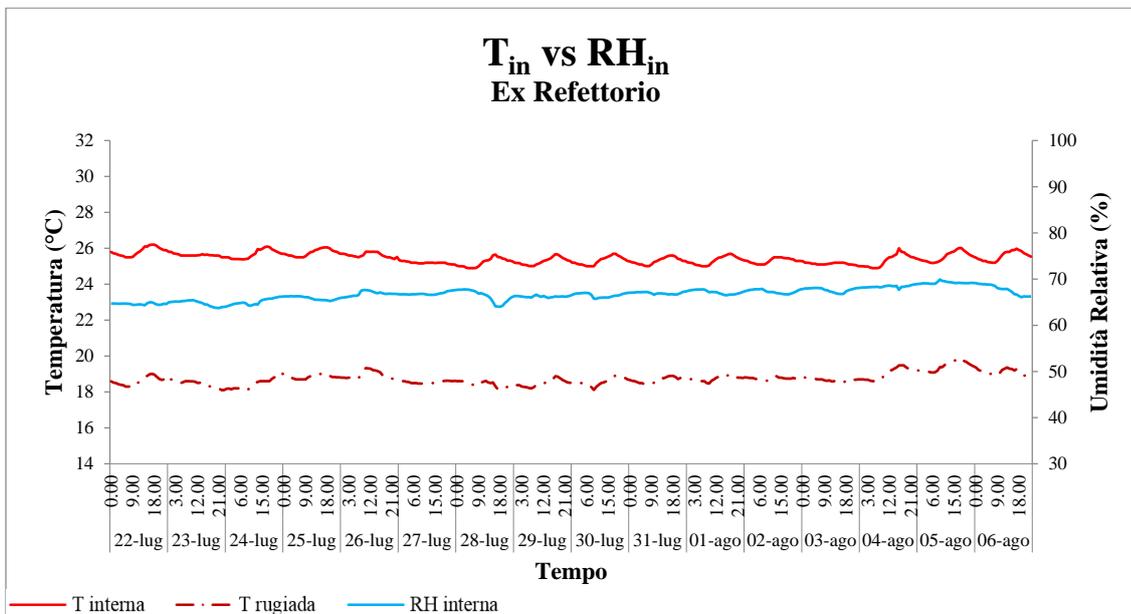


Grafico 4-13: andamenti temporali della temperatura (linea rossa continua), umidità relativa (linea blu continua) e temperatura di rugiada (linea rossa tratteggiata) per l'Ex Refettorio.

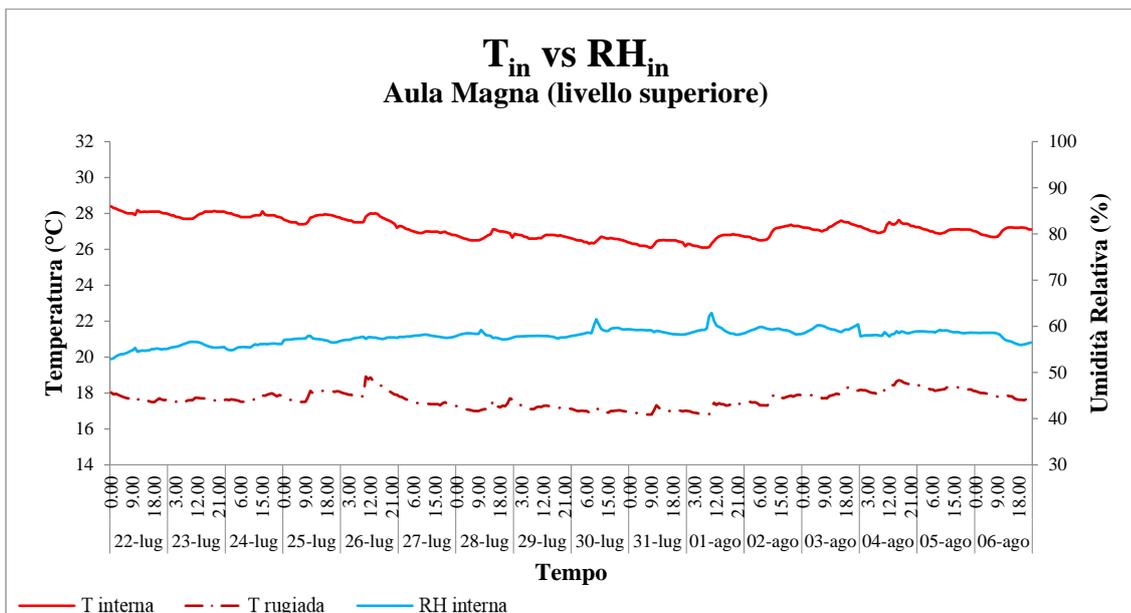


Grafico 4-14: andamenti temporali della temperatura (linea rossa continua), umidità relativa (linea blu continua) e temperatura di rugiada (linea rossa tratteggiata) per l'Aula Magna (livello superiore).

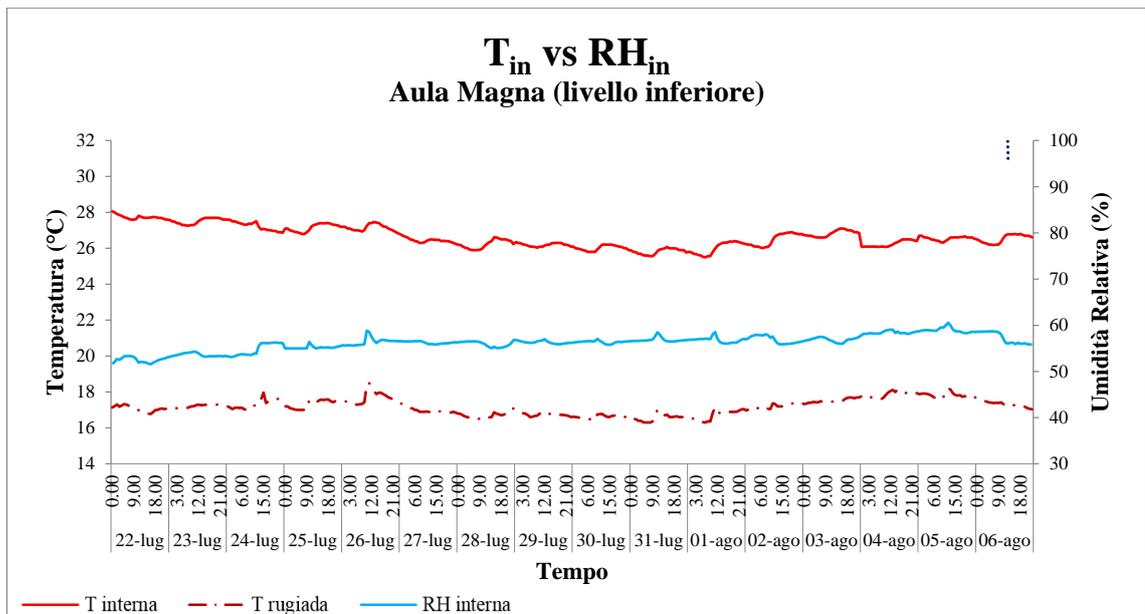


Grafico 4-15: andamenti temporali della temperatura (linea rossa continua), umidità relativa (linea blu continua) e temperatura di rugiada (linea rossa tratteggiata) per l’Aula Magna (livello inferiore).

Nel grafico 4-16, invece, sono riportati i valori termoigrometrici relativi ad entrambi i livelli dell’Aula Magna. In questo modo si evince una naturale e lieve stratificazione delle masse d’aria. Bisogna infine sottolineare che si tratta di una sala in cui, a differenza della Sala dei Santi Padri e della Sala Dantesca, è consentita l’apertura al pubblico, a giorni e orari prestabiliti, con la supervisione del personale.

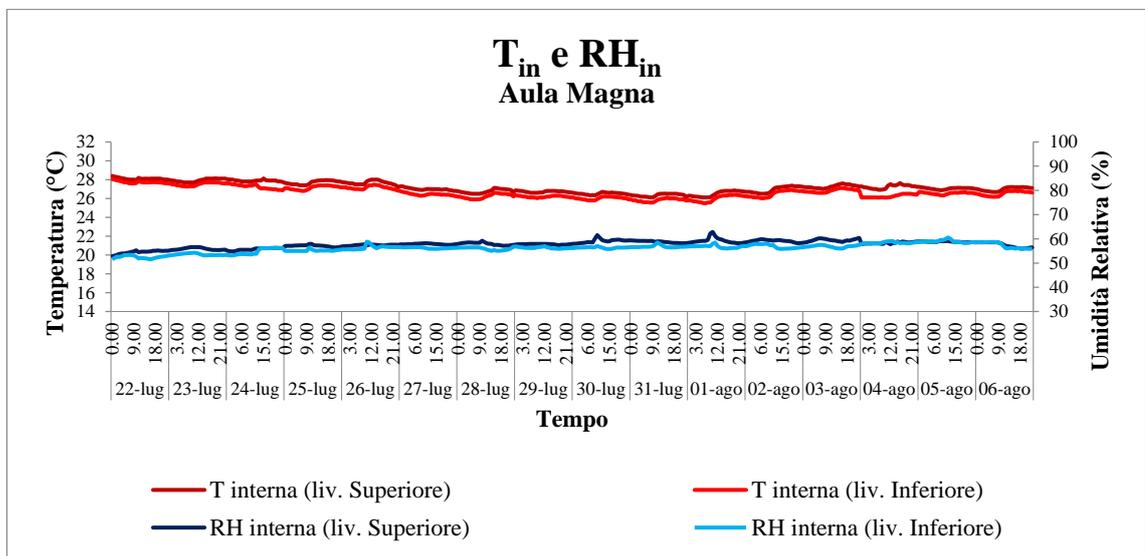


Grafico 4-16: confronto tra gli andamenti temporali di temperatura e umidità relativa tra i due livelli dell’Aula Magna.

La norma UNI 10586:1997 suggerisce di calcolare, per una completa analisi delle condizioni termoigrometriche, oltre ai suddetti parametri, anche le escursioni di temperatura (ΔT) e di umidità relativa (ΔRH). La norma stessa consiglia diversi intervalli temporali che vanno da

un minimo di due ore ad un massimo di un anno. Nel nostro caso, riportiamo le differenze tra valori minimo e massimo calcolate ogni 24 ore, durante tutto il periodo della campagna di monitoraggio, accompagnate dalle soglie suggerite dalla norma di cui prima.

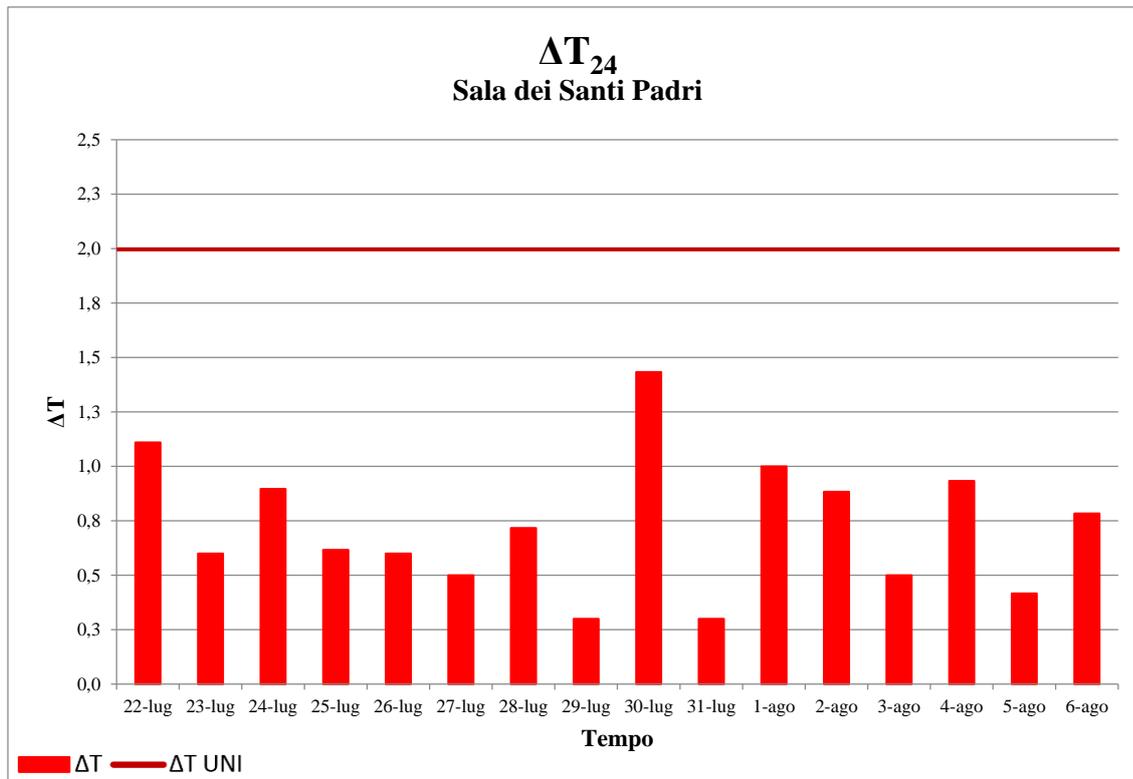


Grafico 4-17: escursioni termiche giornaliere per la Sala dei Santi Padri.

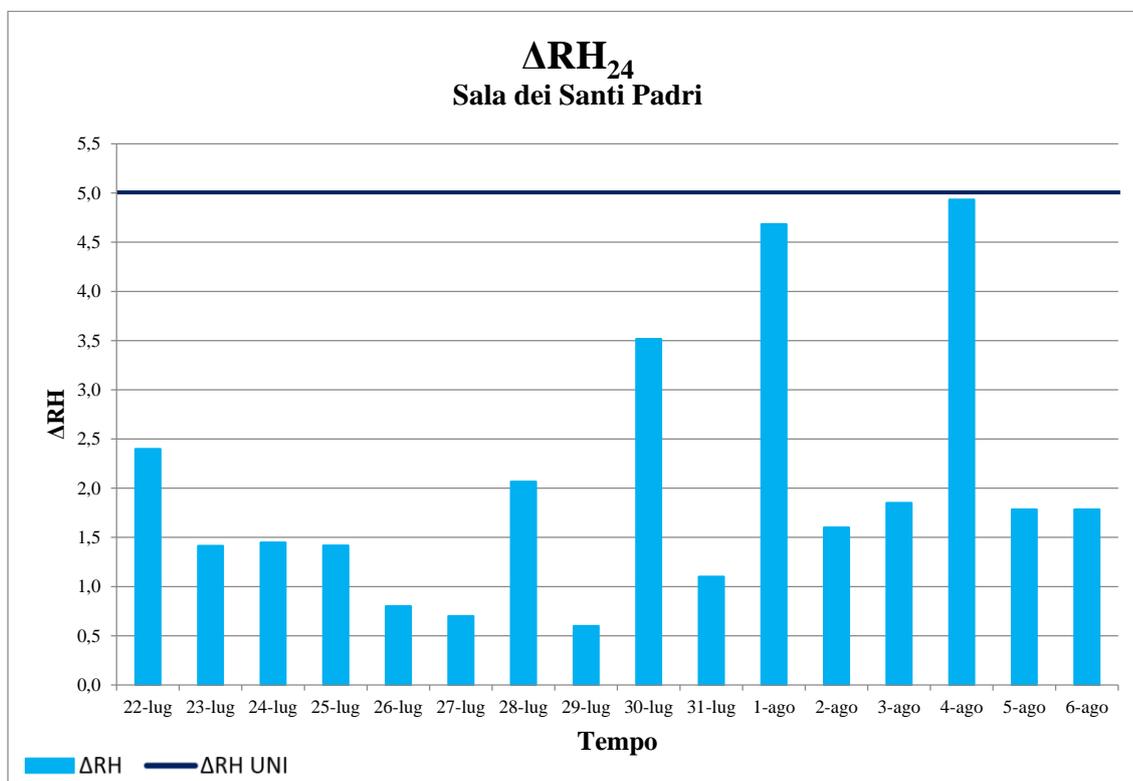


Grafico 4-18: escursioni di umidità relativa per la Sala dei Santi Padri.

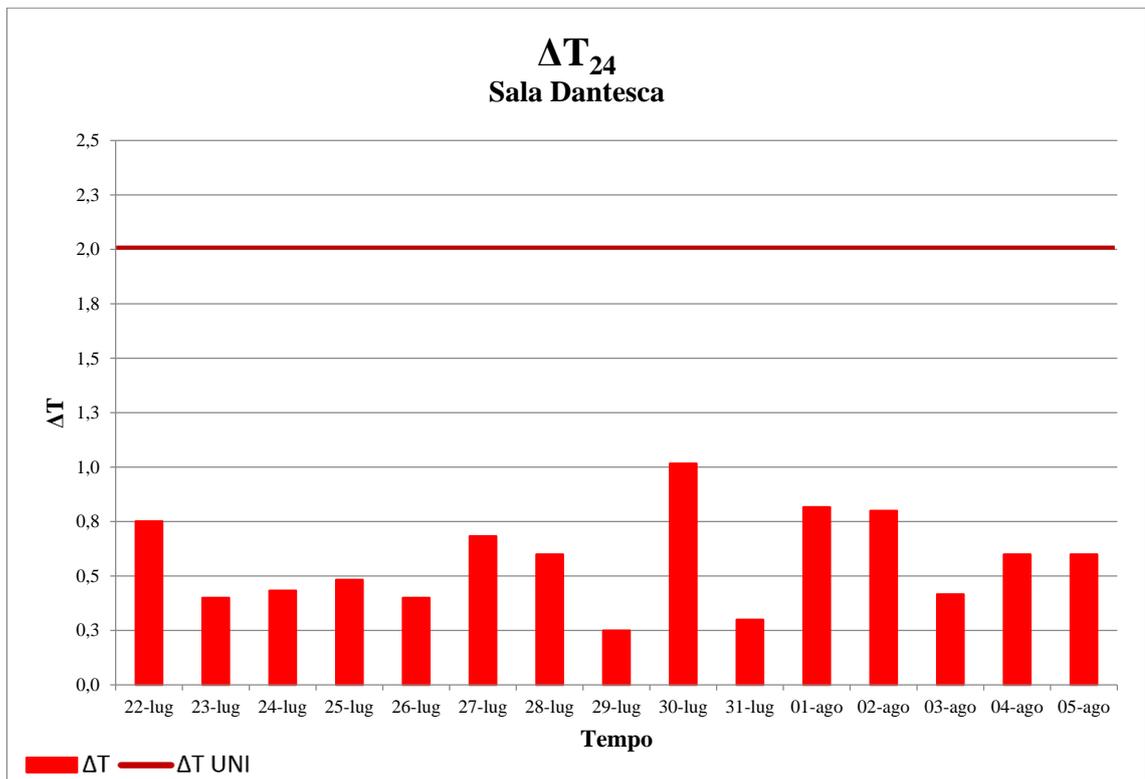


Grafico 4-19: escursioni termiche giornaliere per la Sala Dantesca.

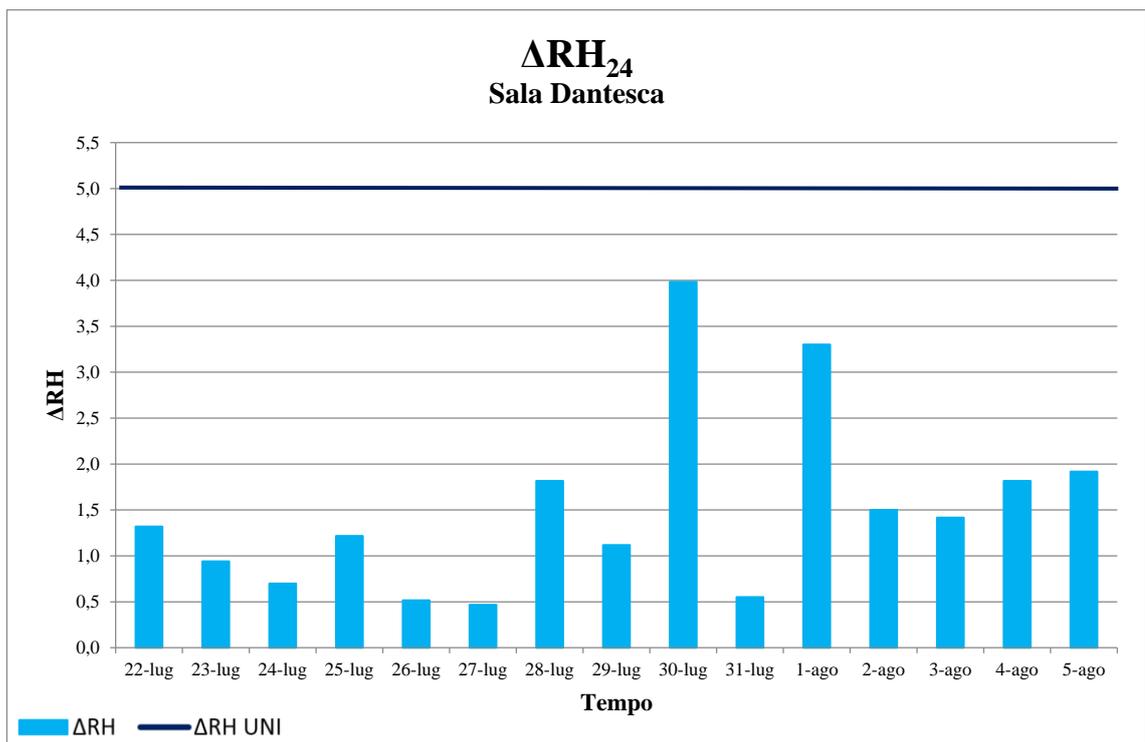


Grafico 4-20: escursioni di umidità relativa per la Sala Dantesca.

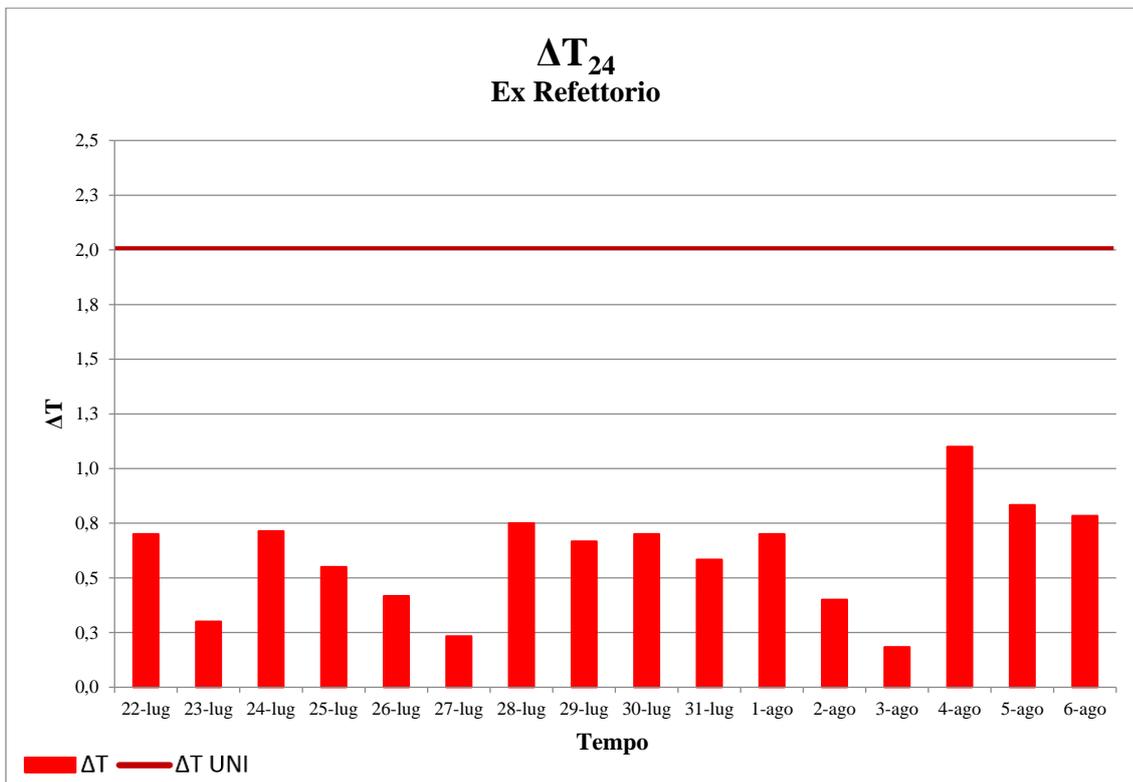


Grafico 4-21: escursioni termiche giornaliere per l'Ex Refettorio.

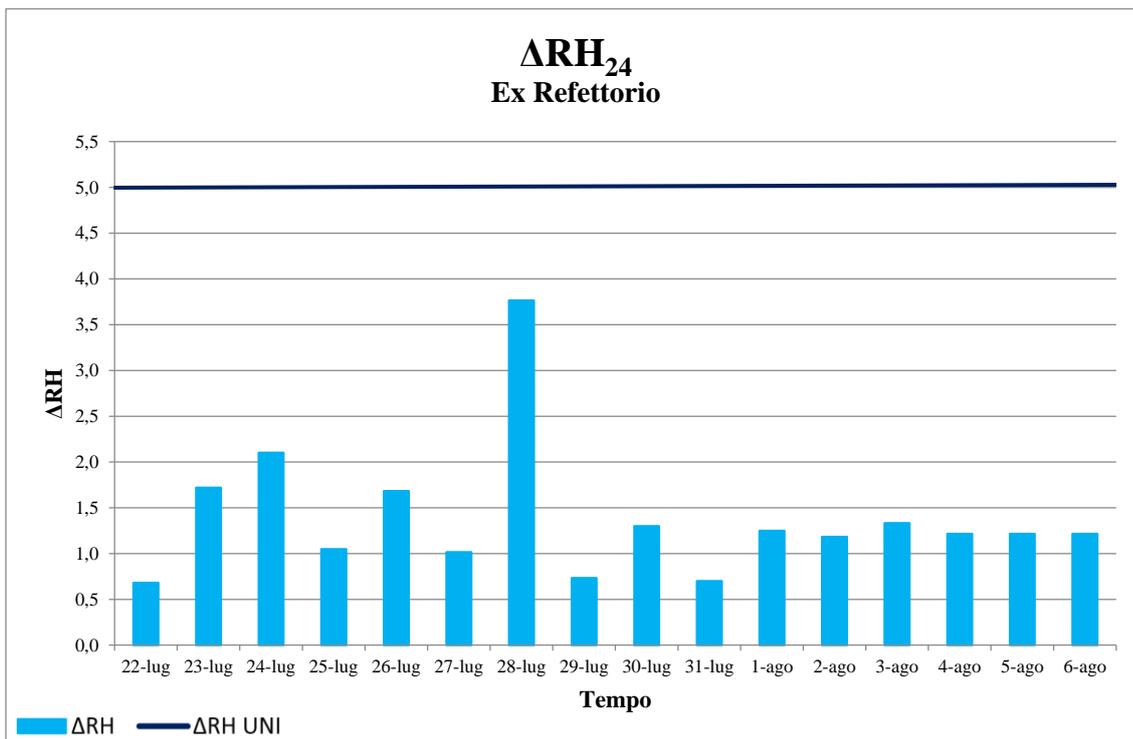


Grafico 4-226: escursioni di umidità relativa per l'Ex Refettorio.

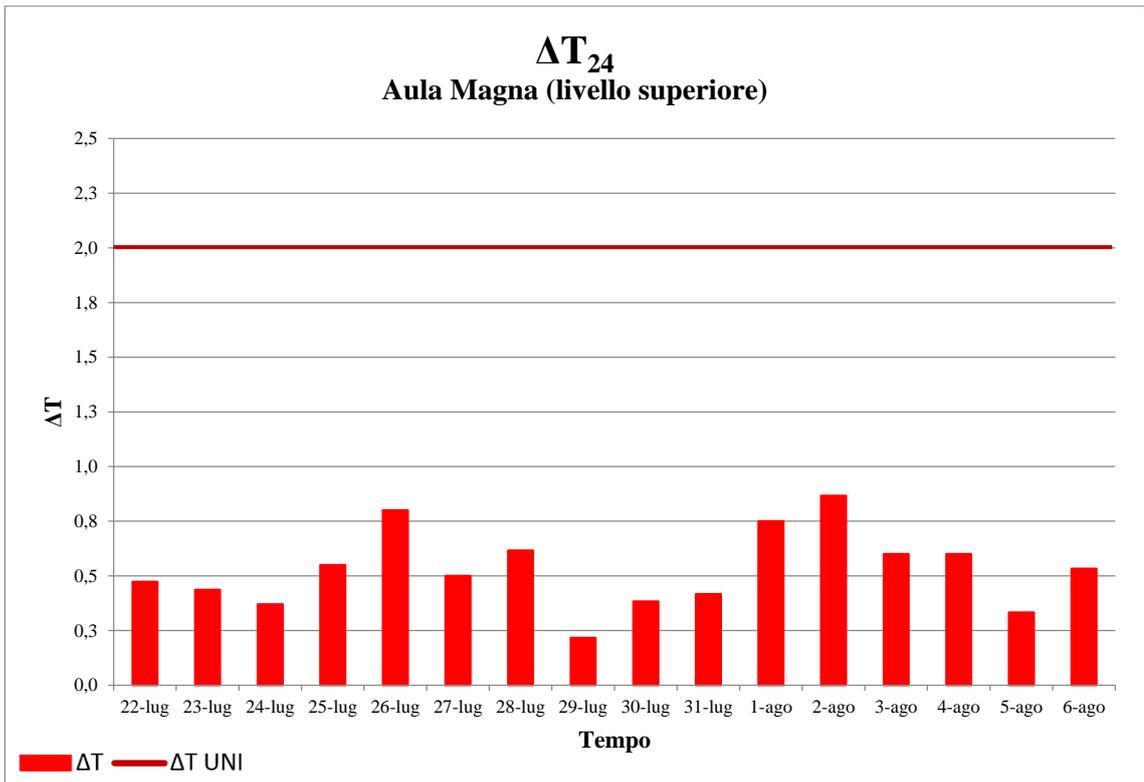


Grafico 4-23: escursioni termiche giornaliere per l'Aula Magna (livello superiore).

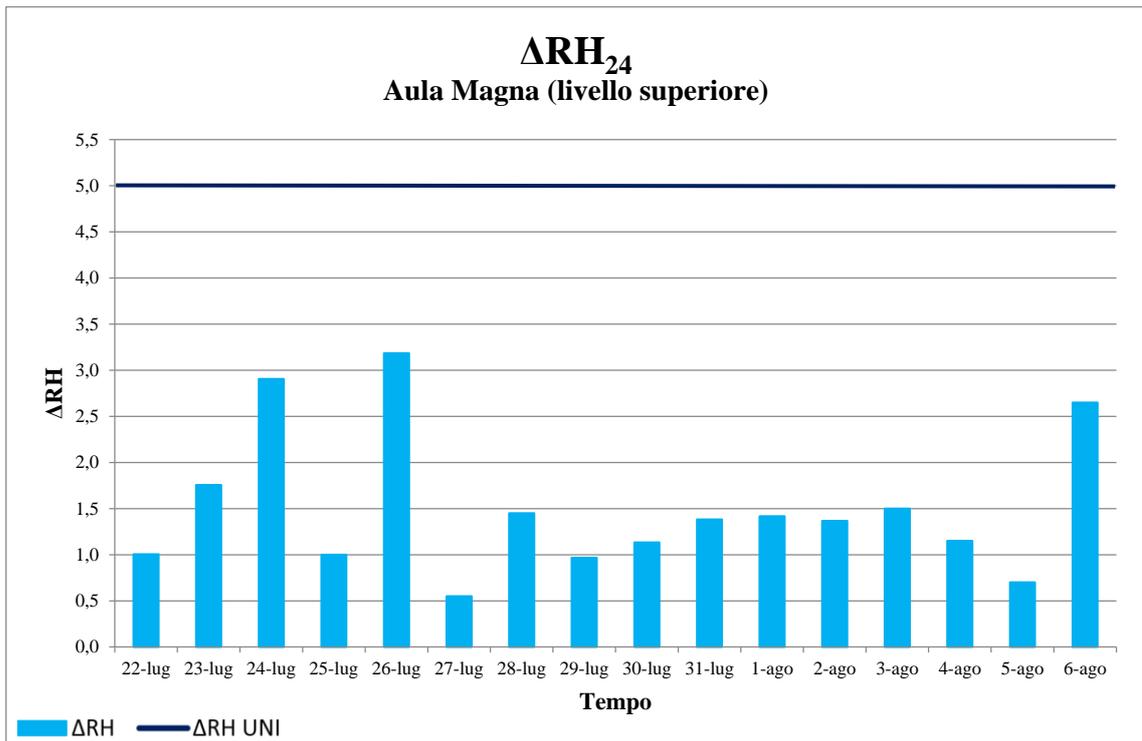


Grafico 4-24: escursioni di umidità relativa per l'Aula Magna (livello superiore).

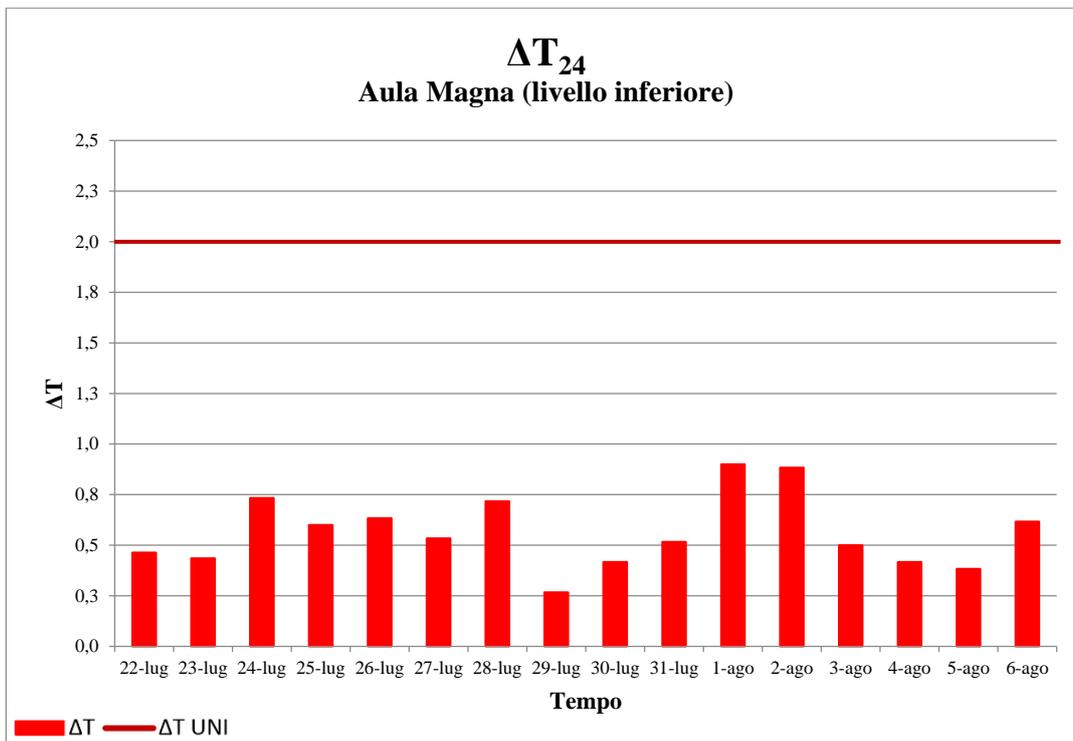


Grafico 4-25: escursioni termiche giornaliere per l'Aula Magna (livello inferiore).

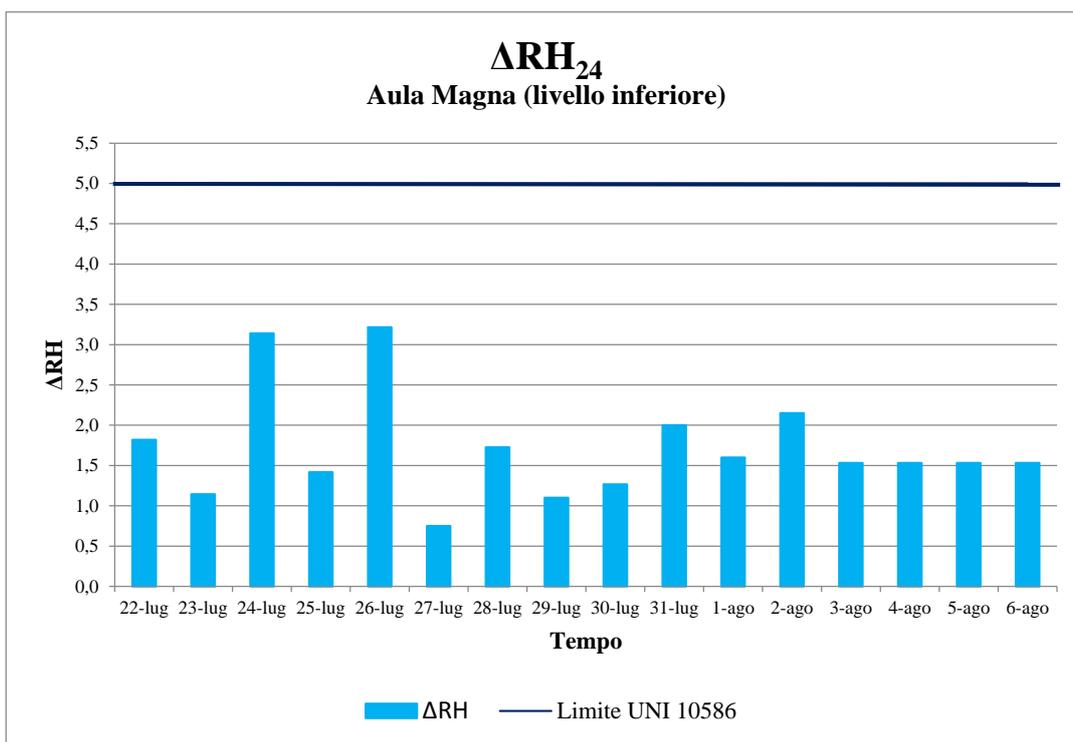


Grafico 4-26: escursioni di umidità relativa per l'Aula Magna (livello inferiore).

Da questi istogrammi risulta che, nell'arco delle 24 ore, non si segnalano superamenti statisticamente significativi rispetto al limite indicato dall'UNI 10586.

4.1.1 Confronto inquinamento indoor-outdoor

Dopo aver discusso dei risultati termoigrometrici, si riportano le misure di concentrazione degli inquinanti gassosi aerodispersi (NO₂ e O₃, nello specifico) per poter confrontare i risultati con i valori consigliati dalla letteratura e al fine di comparare le concentrazioni degli ambienti interni con quelle esterne. Come spesso sottolineato, un aspetto da non sottovalutare è l'analisi della climatologia locale, sia in termini delle condizioni climatiche vere e proprie dell'ambiente, sia in termini di conoscenza delle circolazioni nei locali per l'identificazione della provenienza delle masse d'aria, nonché del loro contenuto in termini di trasporto di inquinanti (Bernardi, 1995).

È ben noto, da oltre 30 anni, che le concentrazioni di NO₂ e O₃ debbano essere vicine allo zero affinché le opere d'arte abbiano una considerevole durata (Cass et al., 1989) (Salmon et al., 2000) (Pavlogeorgatos, 2003) (Loupa et al., 2006). È opportuno, quindi, che le condizioni di qualità dell'aria, affinché sia garantita una corretta conservazione dei manufatti, tengano conto anche dei valori limite raccomandati per gli inquinanti chimici aerodispersi. La letteratura scientifica, il Ministero per i Beni e le Attività Culturali, l'Ente Nazionale di Unificazione consigliano diversi valori limite, alcuni dei quali di seguito riportati (tabella 4-6).

Tabella 4-6: alcuni valori limite consigliati per le concentrazioni di NO₂, O₃ e SO₂.

Riferimento	NO ₂	O ₃	SO ₂	Particolato
(Thomson, 1986)	< 10 μgm^{-3}	< 2 μgm^{-3}	< 10 μgm^{-3}	-
(UNI10586, 1997)	< 10 μgm^{-3}	< 2 μgm^{-3}	< 10 μgm^{-3}	< 50 μgm^{-3}
(MiBACT, 2001)	5 ÷ 10 <i>ppb</i>	5 ÷ 10 <i>ppb</i>	5 ÷ 10 <i>ppb</i>	20 ÷ 30 μgm^{-3}
(MiBACT, 2001)	< 2.5 <i>ppb</i>	< 0.4 <i>ppb</i>	< 1 <i>ppb</i>	20 ÷ 30 μgm^{-3}

Prima di procedere con i risultati, può essere utile precisare che spesso le concentrazioni di sostanze gassose sono riferite con diverse unità di misura⁹⁹: tra le più comuni, per composti

⁹⁹ In generale, per le specie gassose, risulta utile rifarsi ad unità di misura 'sul volume' dal momento che esiste una relazione diretta tra il volume o la pressione parziale di un gas in traccia e il numero di molecole presenti. Così ad esempio, se il metano è rinvenuto in aria a circa 1 *ppm*, una molecola in ogni milione di molecole sarà, in media, di metano. Quando i gas sono presenti in concentrazioni estremamente basse potrebbe essere necessario fare riferimento al numero di molecole per unità di volume. In aria ambiente alla pressione atmosferica, ci sono $2.69 \cdot 10^{19}$ molecole per centimetro cubo (numero conosciuto come *Loschmidt number*). Un gas presente a 1 *ppm* avrà quindi una concentrazione di $2.69 \cdot 10^{13}$ *molecole/cm*⁻³. Di solito per le fasi

in traccia, ritroviamo i ppm ($= 1000 ppb$) e i μgm^{-3} . Tra ppb (o ppm) e μgm^{-3} non esiste un fattore di conversione generale, ossia valido per tutti i composti, dal momento che, per la conversione da unità di misura in parti percentuali a quelle in densità di massa, è necessario considerare il peso molecolare dei diversi gas in esame. Per questo motivo si riporta una tabella con i coefficienti di conversione per il biossido di azoto e l'ozono, calcolato a $0\text{ }^{\circ}C$ e $25\text{ }^{\circ}C$. Questo fattore K può essere corretto in base alle diverse temperature moltiplicandolo per $\frac{273}{T}$, dove T è la temperatura assoluta.

Tabella 4-7: fattori di conversione per NO_2 e O_3 per passare da ppm a μgm^{-3} . Da (Brimblecombe, 1996), modificata.

	Fattore di conversione, K $c(\mu gm^{-3}) = K c$ (ppm) $0\text{ }^{\circ}C$	Fattore di conversione, K $c(\mu gm^{-3}) = K c$ (ppm) $25\text{ }^{\circ}C$	Fattore di conversione, K $c(\mu gm^{-3}) = K c$ (ppb) $25\text{ }^{\circ}C$
NO_2	2050	1886	1.886
O_3	2140	1968	1.968

Contestualizzando, per effettuare questa ricerca, in tutte le sale oggetto di studio, sono stati posizionati alcuni campionatori passivi per la determinazione della concentrazione di NO_2 ; nella Sala dei Santi Padri è stato posizionato anche un campionario passivo per O_3 , per valutare la correlazione tra inquinamento interno ed esterno.

In tabella 4-8 sono riportati i risultati di tutti i campionatori utilizzati nello studio, distinti in base all'inquinante gassoso investigato, al sito di campionamento e al laboratorio presso cui sono state svolte le analisi. Successivamente, questi valori saranno graficati e confrontati con altri dati, al fine di poter elaborare delle considerazioni a riguardo.

liquide e solide le concentrazioni sono espresse in termini di massa per unità di volume dell'aria, spesso con μgm^{-3} . Questa scelta può risultare chiara nel caso del particolato atmosferico in atmosfera, ma spesso è utilizzata anche in riferimento alle sostanze gassose. Infatti, dal momento che due diverse molecole hanno masse differenti allora, sebbene i due gas si trovino alla medesima concentrazione in termini di massa, questi potrebbero differire se espressi in termini di numero di molecole.

Tabella 4-8: dati analitici delle concentrazioni medie di NO₂ ricavate dai campionatori passivi Passam in tutti i siti di campionamento (sia indoor che outdoor).

NO₂ - Misura tramite campionatori Passam							
Codice	Sito di misura	Inizio campionamento		Fine campionamento		Concentrazione media (µg/m ³)	
		Data	Ora	Data	Ora	Laboratorio Attalea	Laboratorio C.I.R.S.A.
Bianco	-	-	-	-	-	< LOD	
Clas1	Sala Santi Padri	21/07/14	16.05	04/08/14	15.45	8.3	
Clas2	Aula Magna	21/07/14	16.25	04/08/14	15.00	8.6	
Clas3	Ex Refettorio	21/07/14	16.45	04/08/14	16.30	10.6	
Clas4	Sala Dantesca	21/07/14	16.50	04/08/14	15.50	6.4	
Clas5	Sala Santi Padri	21/07/14	16.55	04/08/14	15.45		8.5
Clas6	Largo Chartes	21/07/14	17.15	04/08/14	16.40	20.2	
Clas7	Largo Chartes	21/07/14	17.15	04/08/14	16.40		19.7
Roc1	Rocca Brancaleone	21/07/14	8.00	04/08/14	8.00	18.0	

Tabella 4-9: dati analitici delle concentrazioni medie di O₃ ricavate dai campionatori passivi Passam in tutti i siti di campionamento (sia indoor che outdoor).

Concentrazioni medie di O₃ - Misura tramite campionatori Passam							
Codice	Sito di misura	Inizio campionamento		Fine campionamento		Concentrazione media (µg/m ³)	
		Data	Ora	Data	Ora	Laboratorio Attalea	
Clas8	Sala Santi Padri	28/07/14	15.45	04/08/14	15.45	25.1	
Clas9	Largo Chartes	28/07/14	16.00	04/08/14	16.40	74.1	

Nel grafico 4-27 è possibile osservare le concentrazioni medie (µgm⁻³) di biossido di azoto e ozono registrate durante il periodo di campionamento (dal 21 luglio al 4 agosto per l'NO₂ e dal 28 luglio al 4 agosto per l'O₃) nella sale della Classense, oggetto di studio.

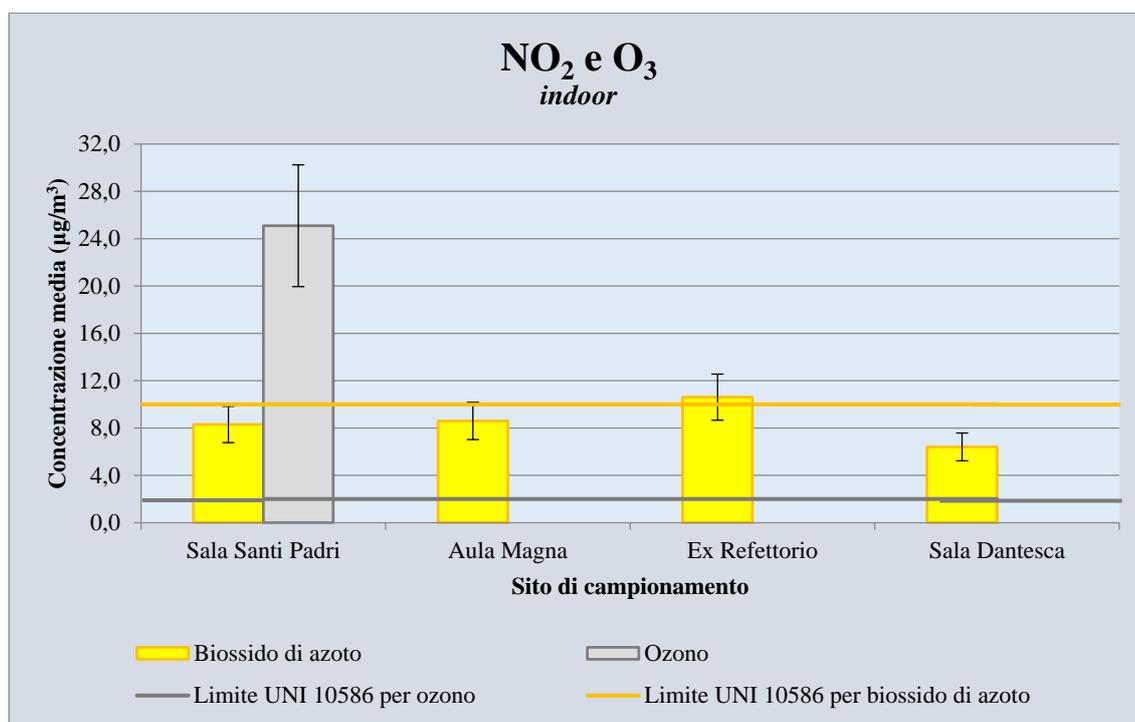


Grafico 4-27: istogrammi delle concentrazioni dei siti di campionamento all'interno della Biblioteca Classense, sia per NO₂ che O₃, confrontati con i valori consigliati dalla UNI 10586.

Nel grafico 4-27 sono riportati i valori consigliati dalla norma UNI 10586 in merito alla qualità dell'aria per i locali di deposito:¹⁰⁰ in arancione, per la concentrazione di NO₂ (10 $\mu\text{g m}^{-3}$ ossia 18.86 *ppb*) e in viola, per la concentrazione di O₃ (2 $\mu\text{g m}^{-3}$ ossia 3.94 *ppb*). Per quanto riguarda il biossido di azoto, si noti come solo in un caso, cioè nell'Ex Refettorio, la concentrazione rilevata superi leggermente (circa il 6%) il valore consigliato. Si ricorda, a tal proposito, che si tratta di una grande sala, costantemente frequentata dagli studenti durante le ore di apertura della Biblioteca, motivo per cui possiamo considerarlo come un ambiente non propriamente adibito alla conservazione dei documenti librari. In questo caso, è possibile ipotizzare che, a causa della maggiore affluenza, aumentino gli ingressi di aria proveniente dall'ambiente esterno, quindi un maggior apporto di inquinanti gassosi. Il maggior ricambio delle masse d'aria è confermato anche dai grafici di temperatura ed umidità per la medesima sala, che evidenziano una maggiore frequenza ed intensità di escursioni termoigrometriche quotidiane.

Per quanto riguarda il singolo campionatore di ozono, si segnala una concentrazione media (25.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ = 49.40 *ppb*) ampiamente superiore a quella consigliata (2 $\mu\text{g m}^{-3}$ = 3.94 *ppb*). Invero, in questa campagna di misura, il campionatore è stato posizionato nella Sala dei Santi Padri soprattutto per valutare il rapporto tra concentrazione interna ed esterna; tuttavia il dato non è trascurabile. Prima di avanzare ipotesi sulle possibili conseguenze, è

¹⁰⁰ Locale di deposito: locale in cui i documenti grafici vengono abitualmente conservati (UNI10586, 1997)

consigliabile uno studio più approfondito che esula l'analisi tra inquinamento interno ed esterno, oggetto di questa ricerca. Fermo restando il consiglio di approfondire tale analisi come possibile sviluppo futuro del presente lavoro (sia da un punto di vista quantitativo, ossia disponendo di un numero maggiore di campionatori per NO₂ e O₃, sia da un punto di vista qualitativo, ripetendo la stessa campagna anche durante il periodo invernale), le concentrazioni di NO₂ non destano particolari preoccupazioni rispetto a quelle dell'O₃. Si delinea quindi una situazione che stabilisce una priorità di approfondimento, per confermare o invalidare tali concentrazioni di O₃.

Di seguito (Grafico 4-28) si riportano i valori di concentrazione esterna misurati con i campionatori passivi Passam, nei siti di campionamento di Largo Chartres e Rocca Brancaleone, insieme con i parametri normativi del D.Lgs. 155/2010.

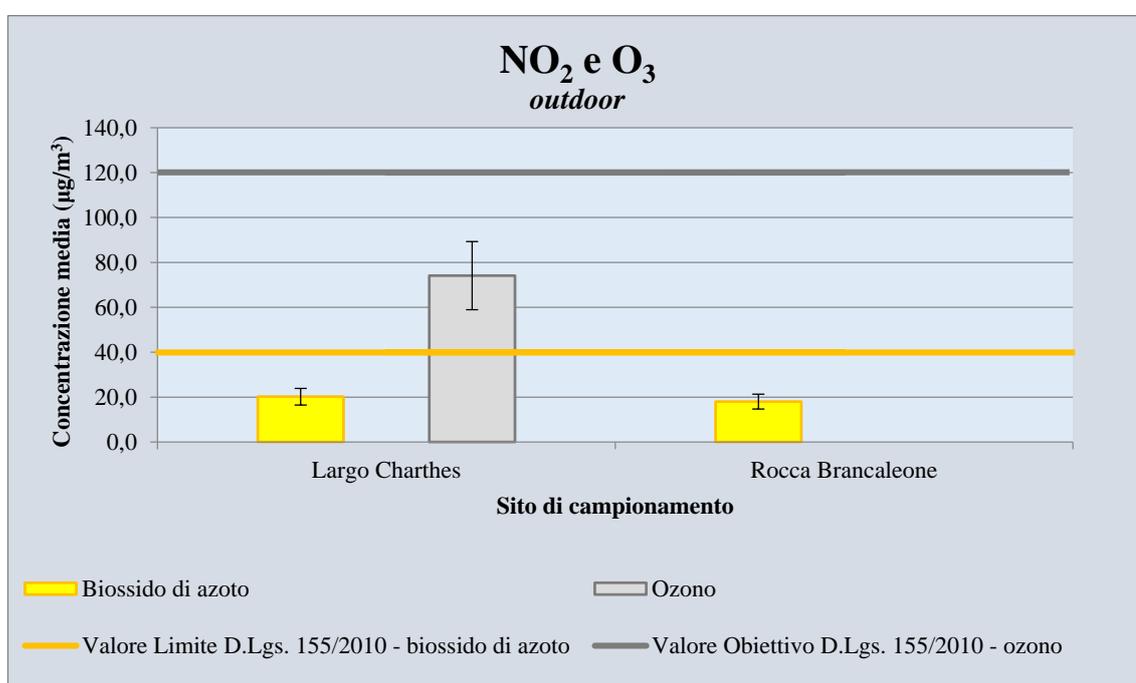


Grafico 4-28: istogrammi delle concentrazioni dei siti di campionamento all'esterno della Biblioteca Classense, sia per NO₂ che O₃, confrontati con i valori normativi del D.Lgs. 155/2010.

Si noti come le concentrazioni rilevate siano inferiori ai valori stabiliti dal D. Lgs. 155/2010 in funzione del periodo di riferimento opportuno.

Come detto in precedenza, un campionatore passivo per l'NO₂ è stato posizionato presso la stazione di qualità dell'aria Rocca Brancaleone, grazie alla collaborazione della Dott.ssa Luciali e della Dott.ssa Valbonetti. Pertanto, prima di commentare i valori di concentrazione esterna con quelli di concentrazione interna, confrontiamo i valori di concentrazione outdoor ricavati dai campionatori Passam con quelli elaborati da ARPA (Grafico 4-29).

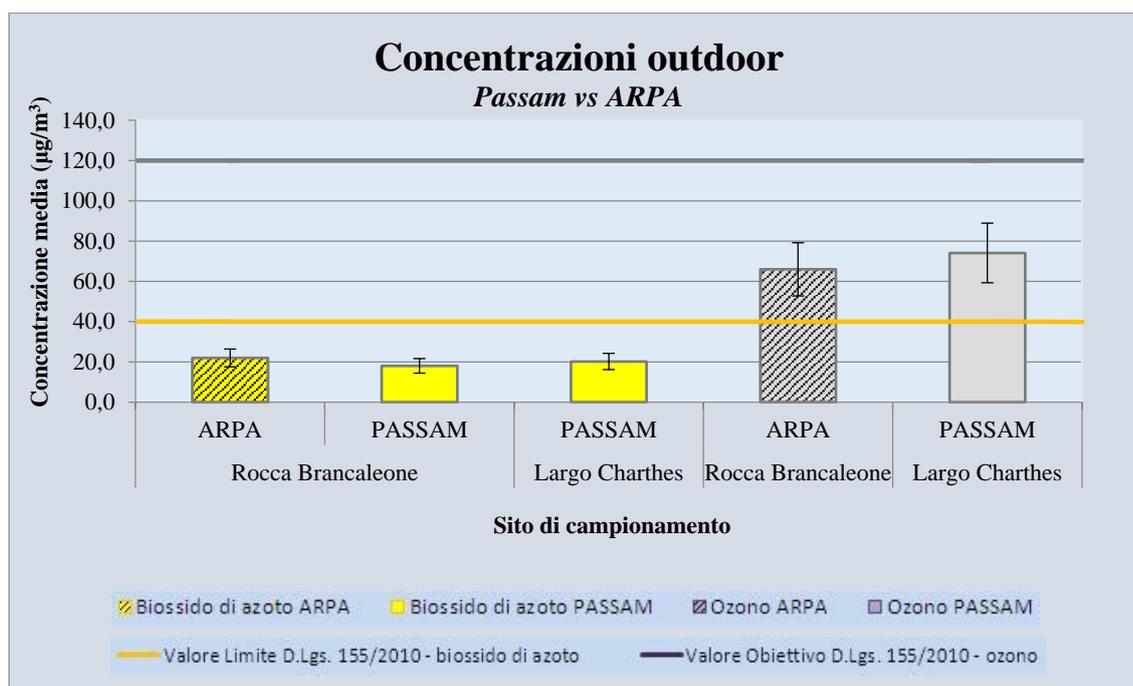


Grafico 4-29: dati analitici delle concentrazioni esterne tramite campionatori passivi Passam e concentrazioni esterne elaborate dalla Rete di Monitoraggio per la Qualità dell’Aria da ARPA nella stazione di Rocca Brancaleone.

Valutando le incertezze analitiche delle due diverse tipologie di campionamento ed analisi, si nota un’ottima correlazione tra i dati ricavati dalla Rete di Monitoraggio per la Qualità dell’Aria di ARPA, mediante analizzatore automatico, e quelli ricavati per lo sviluppo di questa ricerca, tramite campionatori passivi Passam. È opportuno sottolineare, invero, che l’obiettivo principale di questo lavoro di ricerca non è solamente il confronto tra i diversi metodi di campionamento ed analisi in oggetto. Tuttavia, attraverso questo dato e grazie ai dati presenti in letteratura, possiamo considerare attendibili i valori di concentrazione ricavati all’esterno tramite campionatori passivi. Si ricorda, infatti, che i campionatori passivi, a causa della metodica di campionamento (rappresentativa delle concentrazioni medie sul periodo di campionamento), non sono direttamente riconducibili ai valori di legge, ma permettono di avere, abbastanza facilmente ed in maniera economica, una rappresentazione spaziale dei punti critici delle zone urbane, al fine di poter mettere in atto misure di miglioramento (ARPA, 2009). A tal proposito, inoltre, è utile ricordare che risultati di test di laboratorio da letteratura mostrano che la maggior parte dei campionatori passivi soddisfano il 25% di incertezza analitica per l’NO₂ e il 30% per l’O₃ richiesti per la qualità dei dati dalla Comunità Europea¹⁰¹ (Gerboles et al., 2006).

¹⁰¹ La Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 maggio 2008, relativa alla qualità dell’aria ambiente per un’aria più pulita in Europa, riporta (in Allegato I) gli obiettivi di qualità dei dati per la valutazione della qualità dell’aria ambiente, distinguendo le misurazioni in siti fissi per cui l’incertezza non

I risultati dei campionatori passivi finora mostrati sono stati prodotti dal laboratorio milanese Attalea per conto della ditta produttrice Passam. Per confrontare i risultati del suddetto laboratorio sono stati posizionati due campionatori di NO₂ nella Sala dei Santi Padri e altri due nel cortile presso Via Chartres. Così facendo, un campionario per la Sala dei Santi Padri e uno per Largo Chartres sono stati esaminati dal laboratorio Attalea, mentre i restanti due sono stati analizzati presso i laboratori di chimica del C.I.R.S.A di Ravenna, grazie alla collaborazione del Professor Alberto Modelli. Dopo aver preparato le soluzioni reagenti e ricavato la curva di calibrazione,¹⁰² i due campioni sono stati misurati tramite lettura dell'assorbanza della soluzione risultante, mediante spettrofotometro. Di seguito si riportano i risultati (Tabella 4-10)¹⁰³ e gli istogrammi (Grafico 4-30) dei valori di concentrazione ottenuti da entrambi i laboratori con la relativa barra di incertezza analitica.

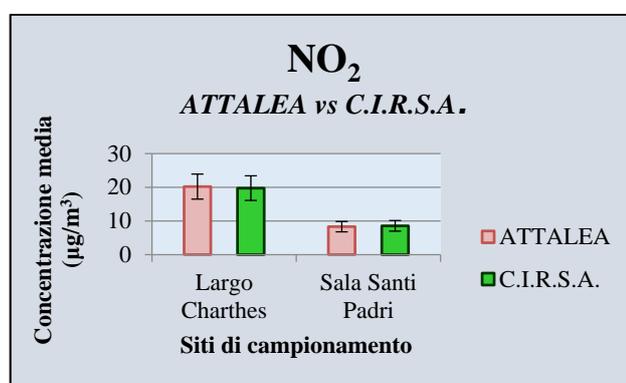


Grafico 4-30: istogrammi delle concentrazioni ricavate dai campionatori Passam e analizzate presso due laboratori: Attalea e C.I.R.S.A.

Tabella 4-10: dati analitici delle concentrazioni ricavate dai campionatori PASSAM e analizzate presso due laboratori: Attalea e C.I.R.S.A.

Valore medio ATTALEA (µg/m ³)	Incertezza analitica (=18.4%)	Valore medio CIRSA (µg/m ³)	Incertezza analitica (=18.4%)
20	4	20	4
8.3	1.5	8.5	1.6

deve superare il 15% e le misurazioni indicative (25% per NO₂ e 30% per O₃, ossia le percentuali riportate nel testo).

¹⁰² In appendice.

¹⁰³ Nel riportare i risultati, i valori sono stati arrotondati tenendo conto delle cifre significative conseguenti alle rispettive incertezze analitiche.

Si noti l'ottima correlazione tra i risultati Attalea e C.I.R.S.A. per i campioni analizzati. Per quanto riguarda il confronto tra inquinamento indoor e outdoor, in letteratura è possibile trovare numerosi studi dedicati, molti dei quali sono rivolti alla determinazione della relazione che lega i valori di concentrazione interna con quelli esterni di diverse specie inquinanti. I livelli di concentrazione interna degli inquinanti gassosi dipendono dalla loro concentrazione esterna, dalle loro eventuali fonti interne, dal design, dall'uso e dal funzionamento dell'ambiente interno considerato (Cass et al., 1989). Nel tempo sono stati investigati diversi ambienti interni: dagli ospedali agli uffici, dagli edifici scolastici alle abitazioni private, dalle palestre ai musei. Visti gli obiettivi posti in questo lavoro di tesi, di seguito saranno riportati i dati di studi che investigano le relazioni in diversi ambienti dedicati alla conservazione (da gallerie open space a stanze di piccole dimensioni). Per illustrare l'intervallo tipico di inquinamento dell'aria negli edifici museali, di seguito sono riportati (Tabella 4-11 e 4-12) i risultati delle concentrazioni outdoor e indoor dei campionatori passivi Passam e altri dati provenienti da letteratura:

Tabella 4-11: dati di concentrazione interna ed esterna per NO₂ provenienti da letteratura e di questa ricerca, con il relativo rapporto I/O. Da (Ryhl-Svendsen, 2006).

Sito di campionamento	Uso dell'edificio	NO ₂		
		Indoor (ppb)	Rapporto I/O	Note
Tate Gallery	Gallerie	12 - 15	-	(Hackney, 1984)
Tate Gallery	Magazzino	2 - 3	-	(Hackney, 1984)
National Museum of Denmark	Galleria	12	0.66	(Ryhl-Svendsen et al., 2003)
Alcazar Castle	Gallerie	4	0.72	(Ryhl-Svendsen et al., 2003)
National Gallery	Gallerie	10 - 24	0.38-0.80	(Saunders, 1993)
National Gallery	Gallerie	2 - 5	0.05-0.19	(Saunders, 1993)
Chiesa di San Luigi dei Francesi	Chiesa	6 - 21	0.19-0.78	(De Santis et al., 1992)
Sainsbury Centre for Visual Art	Galleria	9	0.74	(Brimblecombe et al., 1999) (Camuffo et al., 2001)
Sainsbury Centre for Visual Art	Galleria	13	1.32	(Brimblecombe et al., 1999) (Camuffo et al., 2001)
Correr Museum	Gallerie	10	0.43	(Camuffo et al., 1999)

Correr Museum	Gallerie	11	0.75	(Camuffo et al., 1999)
National Library of Wales	Biblioteca	0.7 - 5	0.26-0.75	(Blades, 1996)
British Library	Biblioteca	5 - 13	0.17-0.38	(Blades, 1996)
Museum of London	Gallerie	6	0.19	(Cassar et al., 1999)
Bethnal Green Museum	Galleria	23	0.84	(Cassar et al., 1999)
Manchester Museum	Galleria	14	0.66	(Blades et al., 2000)
Sala dei Santi Padri	Biblioteca	15.65	0.41	
Aula Magna	Biblioteca	16.21	0.42	
Ex Refettorio	Biblioteca	19.99	0.52	
Sala Dantesca	Biblioteca	12.07	0.32	

Tabella 4-12: dati di concentrazione interna ed esterna per O₃ provenienti da letteratura e di questa ricerca, con il relativo rapporto I/O. Da (Ryhl-Svendsen, 2006).

Sito di campionamento	Uso dell'edificio	O ₃			
		Indoor (ppb)	Rapporto I/O	Note	Riferimenti
Sainsbury Centre for Visual Art,	Galleria	<3-40	0.70		(Davies et al., 1984)
Baxter Art Gallery	Galleria	120	0.60		(Shaver et al., 1983)
Huntington Gallery	Galleria	<10	0.10		(Shaver et al., 1983)
Los Angeles County Museum of Art	Galleria	<10	0.10		(Shaver et al., 1983)
National Museum of Denmark	Galleria	2	0.05		(Ryhl-Svendsen et al., 2003)
Alcazar Castle	Gallerie	8	0.18		(Ryhl-Svendsen et al., 2003)
Musical Instrument Museum	Gallerie	<1	0.03		(Kontozava et al., 2005)

Plantin-Moretus Museum	Gallerie	<1	0.05	(Kontozava et al., 2005)
National Museum Krakow	Gallerie	5-6	0.19-0.23	(Salmon et al., 2000)
Virginia Steele Scott Gallery	Gallerie	14	0.45	(Nazaroff e Cass, 1986)
Villa Montezuma	Casa storica	14-22	0.33-0.49	(Druzic et al. 1990)
Southwest Museum	Gallerie	90-143	0.69-0.84	(Druzic et al. 1990)
Pasadena Historical Museum	Gallerie	19-25	0.14-0.16	(Druzic et al. 1990)
Lang Gallery	Gallerie	17-30	0.10-0.20	(Druzic et al. 1990)
Virginia Steele Scott Gallery	Gallerie	43-65	0.24-0.29	(Druzic et al. 1990)
Montgomery Gallery	Gallerie	60-67	0.39-0.40	(Druzic et al. 1990)
Huntington Art				
J. Paul Getty Museum	Gallerie e biblioteche	<10	<0.10	(Druzic et al. 1990)
Southwest Museum Library				
Los Angeles Museum of Art				
Sala dei Santi Padri	Biblioteca	49	0.34	

Nei grafici seguenti (Grafico 4-31, 4-32, 4-33, 4-34) sono riportati gli istogrammi dei dati provenienti da letteratura ed i valori descrittivi della Biblioteca Classense, ricavati nel corso di questa ricerca, evidenziati dalle frecce.

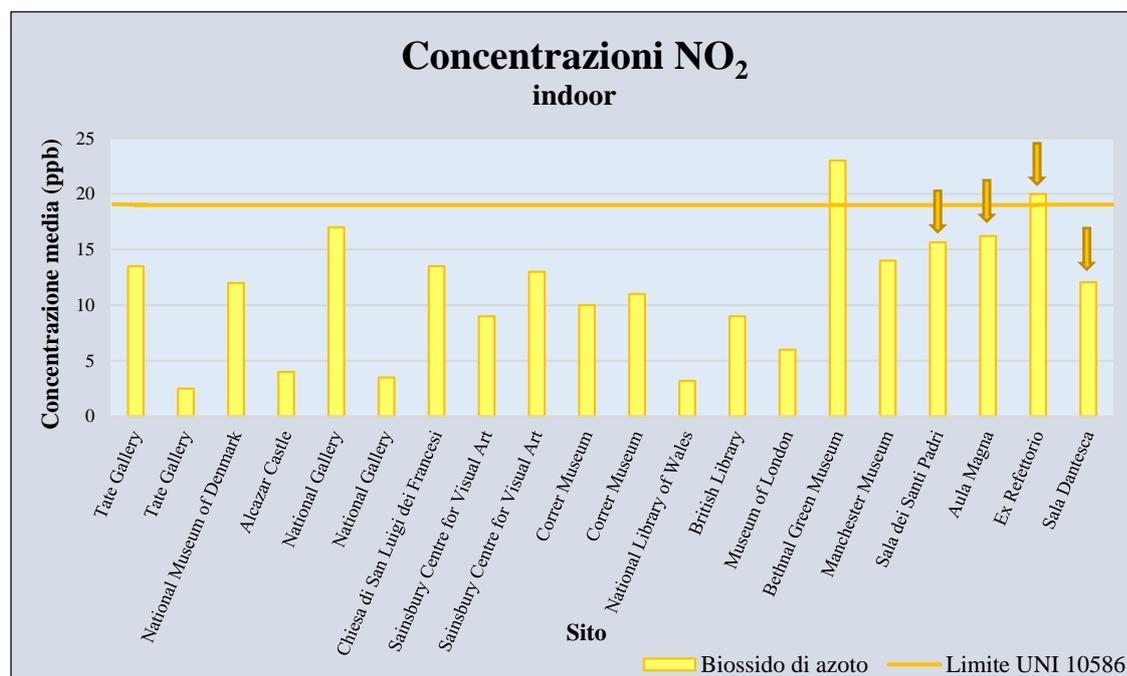


Grafico 4-31: istogrammi con le concentrazioni interne di NO₂ provenienti da letteratura e quelle rilevate nelle sale della Biblioteca Classense.

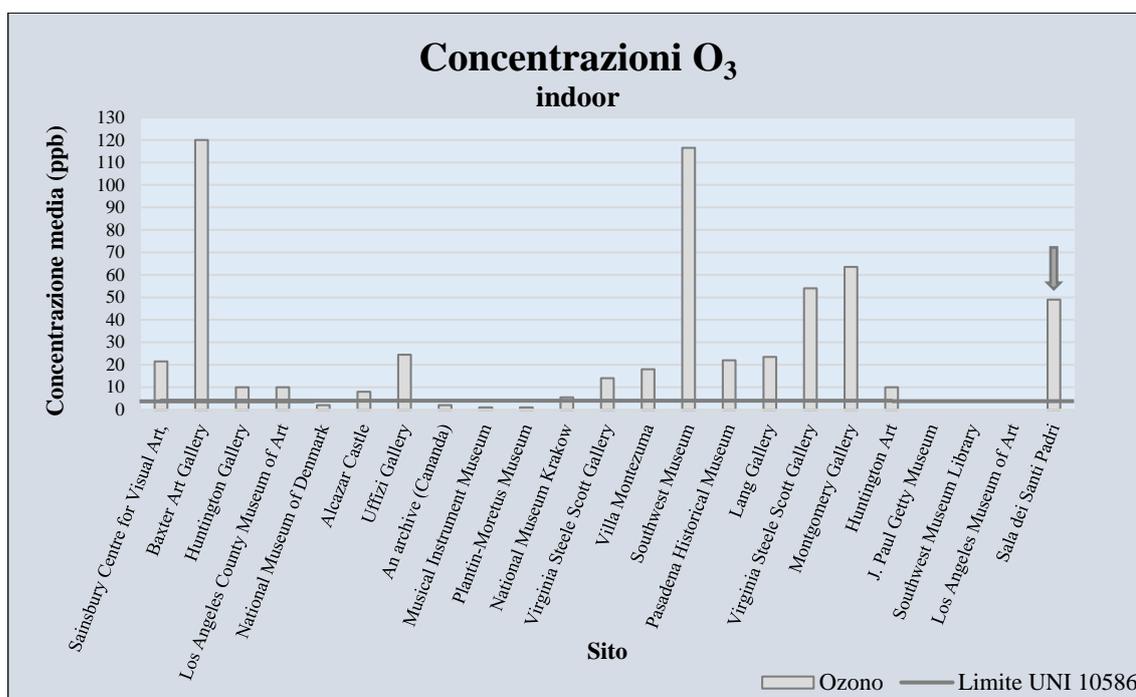


Grafico 4-32: istogrammi con le concentrazioni interne di O₃ provenienti da letteratura e quelle rilevate nelle sale della Biblioteca Classense.

La tendenza per l'ozono è che le concentrazioni, per oltre il 70% delle osservazioni, sono inferiori a 30 ppb ($= 15.24 \mu\text{gm}^{-3}$); tuttavia, relativamente al valore limite suggerito dalla norma UNI 10586, cioè 4 ppb, solo il 20% dei casi risulta inferiore. Inoltre, si segnalano alcuni episodi dove sono stati riscontrate concentrazioni più elevate fino a 143 ppb ($= 72.66 \mu\text{gm}^{-3}$). Questi episodi, innanzitutto, devono essere contestualizzati: i dati di letteratura riguardano valori misurati prima degli anni '90 ed all'interno di edifici con elevato tasso di ricambio dell'aria, ma senza meccanismi di filtrazione chimica dell'aria. Per quanto riguarda il biossido di azoto, invece, tutte le concentrazioni riportate sono inferiori a 25 ppb ($= 13.25 \mu\text{gm}^{-3}$) e solo due risultano superiori al limite consigliato dalla UNI 10586.

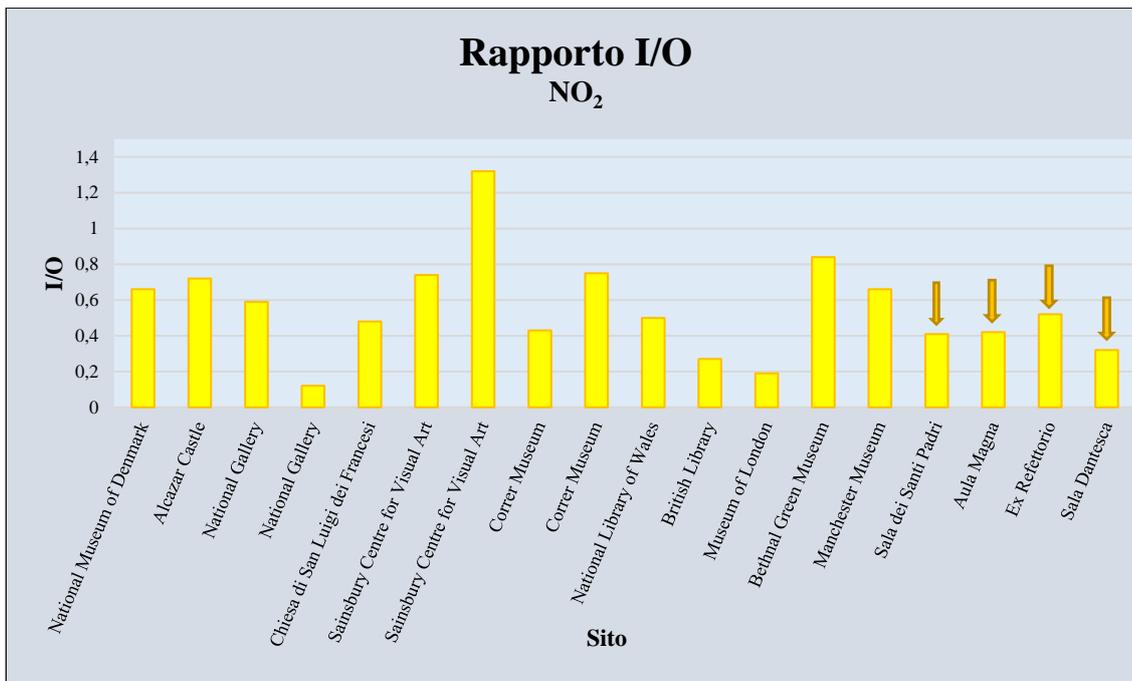


Grafico 4-33: rapporti Indoor-Outdoor di NO₂ provenienti da letteratura e quelli rilevati nelle sale della Biblioteca Classense.

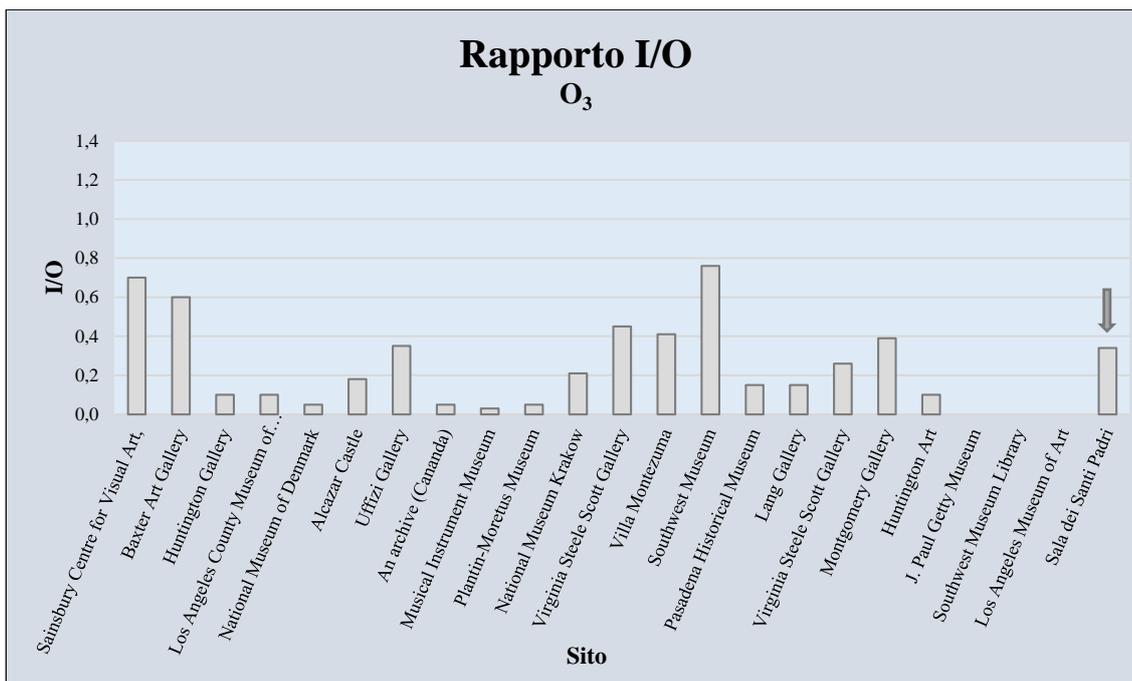


Grafico 4-34: rapporti Indoor-Outdoor di O₃ provenienti da letteratura e quelli rilevati nelle sale della Biblioteca Classense.

Si noti che per i siti con un basso tasso di ricambio dell'aria o con un impianto che prevede la filtrazione dell'aria, il rapporto I/O può essere inferiore a 0.10. Invero, può succedere che, in alcune situazioni, le concentrazioni interne superino quelle esterne, con un conseguente rapporto I/O > 1. Questo si verifica, ad esempio, nel caso in cui nell'edificio sia presente una fonte di biossido di azoto come per la "Sainsbury Centre for Visual Arts". È evidente che le

tabelle e i grafici precedentemente riportati comprendono solo una parte della notevole mole di dati presente in letteratura e ne evidenziano i trend (Ryhl-Svendsen, 2006). Per esempio, i dati estivi ed invernali provenienti dallo studio di Camuffo et al. presso il Correr Museum (Venezia) riflettono il caso in cui la diffusione degli inquinanti dall'esterno verso l'interno è maggiore nel momento in cui è possibile un maggior ricambio di aria (attraverso le finestre, ad esempio), come constatazione che i livelli indoor siano fortemente dipendenti dai ricambi d'aria, nonché dal livello di concentrazione esterna. I rapporti I/O più elevati sono stati riscontrati durante la stagione estiva, quando le finestre e le porte sono, di norma, tenute aperte durante le ore di apertura della struttura (Ryhl-Svendsen, 2006).

Nell'ambito della nostra ricerca, a partire dai dati di concentrazione rilevati durante la campagna di monitoraggio, è stato calcolato il rapporto indoor/outdoor per ogni sala, considerando che il valore di concentrazione esterna corrispondesse a quello misurato tramite campionatore passivo presso Via Chartres. Nel grafico 4-35 sono riportati, in dettaglio, i rapporti indoor/outdoor osservati nelle sale della Classense ed i relativi intervalli di errore sperimentale:

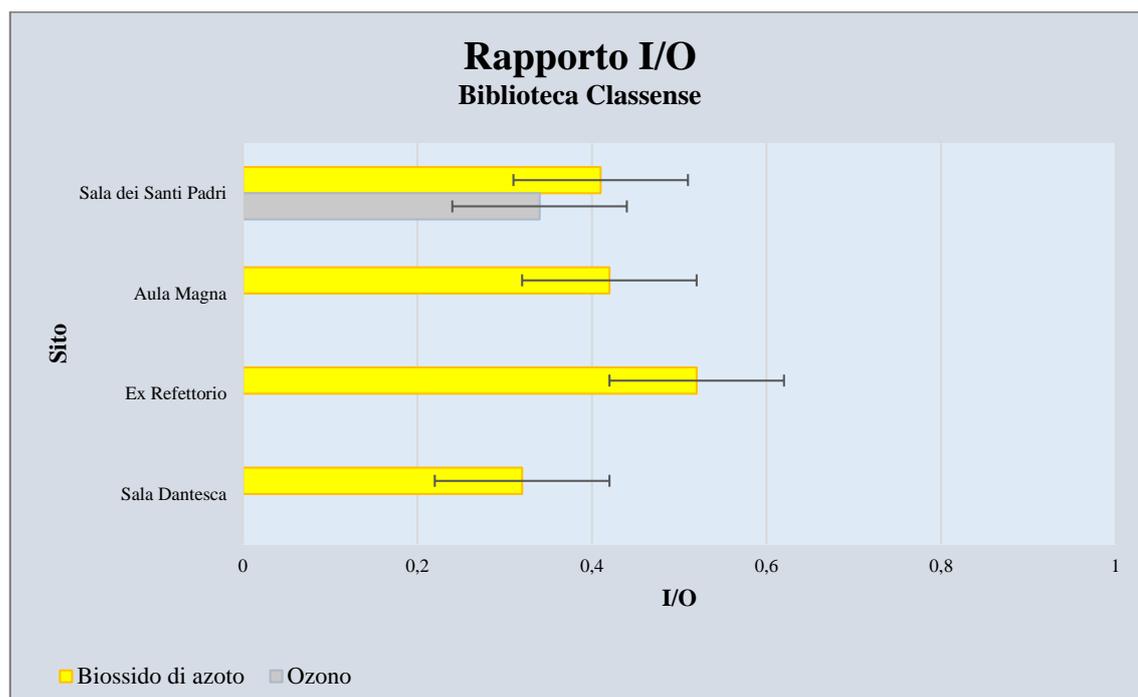


Grafico 4-35: rapporto I/O nelle sale della Classense con relativo errore calcolato per la propagazione dell'errore (=0.1).

Appare chiaro, che il rapporto I/O mostra una tendenza simile ai valori riportati in letteratura, con un intervallo tipico compreso tra 0.2 e 0.7, così come riportato anche da Weschler (2000).

Si sottolinea, inoltre, come il rapporto I/O calcolato per la Sala dei Santi Padri, partendo dai dati di concentrazione di NO₂ ed O₃ - rispettivamente, per l'NO₂ (0.4 ± 0.1) e per l'O₃ (0.3

± 0.1) - risultino sperimentalmente compatibili, considerando i rispettivi intervalli degli errori sperimentali.

E', tuttavia, opportuno evidenziare, più in generale, come il rapporto I/O così calcolato, per la Sala Dantesca, l'Ex Refettorio e l'Aula Magna si prevede sia affetto da una certa approssimazione: la concentrazione outdoor, alla quale è rapportata quella indoor per ciascuna sala sopra citata, è sempre quella di Via Chartres. In realtà, con un buon grado di approssimazione, possiamo considerare che il campionatore posto su Via Chartres sia un buon riferimento per descrivere la qualità dell'aria ambiente che circonda le sale superiori della Classense. È necessario tener presente che la Biblioteca Classense, come spiegato precedentemente, si trova in un'area urbana: l'edificio nel suo complesso, però, è esposto sia su una Zona a Traffico Limitato (ZTL), come accade per l'entrata da Via Baccarini, sia lungo strade molto trafficate, ad esempio, tra Via Chartres e Via Alcide De Gasperi. Per questo motivo il campionatore per confrontare la concentrazione indoor della Sala dei Santi Padri con quella esterna è stato posizionato nel cortile di Via Chartres. Per avere una descrizione più precisa e dettagliata di quello che si verifica nell'Aula Magna e nell'Ex Refettorio, sarebbe opportuno posizionare altri campionatori passivi presso il cortile interno della Biblioteca, sul quale affacciano le due sale, e confrontare i valori ottenuti con quelli interni. Inoltre, ogni sala riflette una situazione di ricambio dell'aria differente. In Sala Dantesca ad esempio, non essendo mai aperte le finestre, il tasso di ricambio dell'aria potrebbe, forse, essere calcolato, come suggerito in alcuni lavori di letteratura,¹⁰⁴ in funzione della concentrazione della stanza adiacente presa come concentrazione outdoor. Per questi motivi, i ragionamenti riportati nel seguito saranno finalizzati a descrivere, essenzialmente, la situazione che si verifica all'interno della Sala dei Santi Padri. A partire da queste considerazioni possiamo, infatti, ricavare altre informazioni. Weschler et al. (1989) hanno descritto la relazione Indoor/Outdoor (I/O) per l'ozono negli edifici, in condizioni steady-state, mediante l'equazione del bilancio di massa, per cui:

$$\frac{C_i}{C_o} = \frac{E_x}{E_x + v_d \left(\frac{A}{V}\right)}$$

Dove:

C_i è la concentrazione interna dell'inquinante [ppb o $\mu g m^{-3}$]

¹⁰⁴ Secondo quanto suggerito da Ruhl-Svednsen (2006), nel caso di sale posizionate all'interno di un edificio, il valore esterno che dovrebbe essere preso come riferimento è quello delle sale adiacenti piuttosto che la concentrazione esterna.

C_o è la concentrazione esterna dell'inquinante [ppb o $\mu g m^{-3}$]

E_x è il tasso di ricambio dell'aria [h^{-1}]

v_d è la velocità di deposizione dell'inquinante [mh^{-1}]

A è l'area totale all'interno della stanza [m^2]

V è il volume della stanza [m^3]

Questo modello, molto citato in letteratura, descrive, con buona approssimazione, la reale situazione, riferita a tutti gli inquinanti gassosi, seppur con alcune limitazioni. Per poter applicare questo modello si suppone, infatti, che non vi siano fonti di inquinamento indoor e che le possibili reazioni chimiche degli inquinanti abbiano luogo solo in corrispondenza delle superfici e non in aria. Da queste reazioni con le superfici, inoltre, si considera che l'inquinante venga rimosso irreversibilmente. Pur con queste ipotesi, a prima vista approssimative, il modello prevede, in maniera soddisfacente, le concentrazioni di inquinanti quali O_3 , SO_2 e NO_2 (Ryhl-Svendsen, 2006).

La velocità di deposizione, v_d , è un fattore importante del modello di Weschler descritto. La velocità v_d è definita come il flusso di un inquinante su una superficie divisa per la concentrazione nell'aria ed è un coefficiente di trasferimento di massa con le unità di misura di una velocità. Per inquinanti reattivi come l'ozono, la rimozione in seguito a reazioni superficiali costituisce una parte molto significativa della perdita totale dell'inquinamento interno, rispetto alla rimozione mediante il ricambio dell'aria. Dall'equazione precedente è possibile determinare la velocità media di deposizione su tutte le superfici presenti all'interno di una stanza, così come è possibile determinare il cosiddetto tasso di rimozione superficiale, k_d , dato da:

$$k_d = v_d \left(\frac{A}{V} \right)$$

Ipotizzando, ad esempio, che una stanza abbia un tasso di rimozione superficiale di $2h^{-1}$, allora gli inquinanti potranno reagire con le superfici interne per una quantità pari a quella che si avrebbe se fosse ventilato in modo da garantire 2 ricambi di aria per ora: pertanto, k_d è direttamente equiparabile al tasso di ricambio d'aria, TR_{aria} . La velocità di deposizione di uno specifico inquinante, inoltre, varia in funzione della diversa tipologia dei materiali e di altre condizioni, come i cambiamenti di umidità relativa. In letteratura, sono riportati numerosi dati dei tassi di rimozione superficiale per l'ozono, che si collocano in un range di $1 \div 8 h^{-1}$, variabile a seconda delle dimensioni della stanza e del materiale che costituisce le possibili superfici di interazione: da quelle inerti (quali vetro e acciaio) a quelle più reattive (come oggetti tessili). Per quanto riguarda il biossido di azoto, invece, il tasso di rimozione

superficiale va da un minimo di $0.4 h^{-1}$, per una sala adibita alla conservazione, a $4.5 h^{-1}$, per una galleria ampia e aperta.

Abbiamo già accennato al fatto che l'equazione del bilancio di massa è valida esclusivamente in condizioni di stato stazionario. In generale, però, un bilancio di massa può essere descritto in funzione della variazione della concentrazione dell'inquinante interno in un tempo infinitesimo, dt :

$$\frac{dC_i}{dt} = C_o E_x - C_i E_x - C_i k_d + S$$

Dove:

t è il tempo [h^{-1}]

S è il tasso di emissione interna dell'inquinante [$\mu g h^{-1}$]

Moltiplicando entrambi i membri per il volume, V , otteniamo:

$$V \frac{dC_i}{dt} = C_o Q_v - C_i Q_v - C_i Q_a + S$$

Dove:

$Q_v = E_x \cdot V$ è il tasso del flusso di ventilazione [$m^3 h^{-1}$]

$Q_a = v_d \cdot A$ è il tasso del flusso di assorbimento [$m^3 h^{-1}$]

La soluzione generale dell'equazione è data da:

$$C_i(t) = \frac{S + E_x C_o}{E_x} [1 - e^{(-E_x t)}] + C_i(0) e^{(-E_x t)}$$

Semplificando l'equazione per le condizioni di stato stazionario con $t \rightarrow \infty$, per cui $\frac{dC_i}{dt} = 0$,

la soluzione dell'equazione risulta:

$$C_i = \frac{E_x}{E_x + k_d} C_o + \frac{S}{E_x + k_d}$$

Inoltre, nell'ipotesi di assenza di sorgenti interne degli inquinanti, esplicitando il termine k_d , otteniamo l'equazione di partenza applicata nel modello da noi utilizzato:

$$C_i = \frac{E_x}{E_x + k_d} C_o$$

Le reazioni tra i composti in aria, per poter influenzare significativamente i livelli di inquinamento interno, dovrebbero essere caratterizzate da una velocità di reazione uguale o maggiore al tasso di rimozione conseguente al ricambio dell'aria. Per esempio, per l'ozono, la reazione più veloce in aria coinvolge l'ossido di azoto, in cui il tempo di dimezzamento di $50 ppb$ ($= 25.4 \mu g m^{-3}$) di ozono si raggiunge a partire da mezzo minuto ($= 0.0087 h^{-1}$). Questa reazione produce un nuovo composto di interesse, il biossido di azoto; quest'ultimo potrebbe reagire nuovamente con l'ozono formando il radicale nitrato, il quale,

in assenza di elevati livelli di illuminamento, tenderà, dapprima, ad accumularsi e poi a convertirsi in acido nitrico. In opportune condizioni, il tasso di formazione dell' NO_2 può essere notevole: ad esempio, all'interno di un'ampia galleria d'arte, la concentrazione di biossido di azoto è stata misurata essere superiore a quella rinvenuta all'esterno (con un rapporto I/O di circa 1.3) (Brimblecombe et al., 1999). Allo stesso tempo, però, le reazioni superficiali potrebbero rimuovere l' NO_2 dall'aria, trasformandolo in acido nitroso e nitrico. L'acido nitrico costituirà il film acquoso superficiale, mentre l'acido nitroso giungerà all'equilibrio tra la fase liquida e quella gassosa (Weschler e Shields, 1997). De Sanctis et al. (1992) hanno riscontrato che i livelli di acido nitrico interni superano, in alcuni casi, quelli esterni, in ambienti indoor collocati in aree urbane, in particolare nella Galleria degli Uffizi¹⁰⁵ (Firenze) e nella chiesa di San Luigi dei Francesi¹⁰⁶ (Roma).

Per i composti inorganici, come l' NO_2 , negli ambienti interni nei quali questi composti sono presenti esclusivamente per il trasporto indoor-outdoor, ossia in assenza di sorgenti, la reazione tra O_3 e NO ha una notevole influenza in corrispondenza dei "tide turns", ossia quando la concentrazione di una di queste specie, dopo un andamento crescente inizia a diminuire. In questa ricerca si tiene conto della concentrazione media in un certo intervallo temporale, motivo per cui non è possibile evidenziare le escursioni giornaliere degli inquinanti.

Volendo descrivere con maggior dettaglio le reazioni appena illustrate, avremo la prima reazione omogenea molto veloce:



Di conseguenza, elevate concentrazioni di O_3 possono essere raggiunte solamente quando l' NO è poco presente e viceversa. All'esterno, in presenza di luce solare, la fotolisi dell' NO_2 può nuovamente rigenerare NO e O_3 . Mentre, negli ambienti interni, in caso di assenza di luce solare diretta, la reazione sopradescritta costituisce una *source* per l' NO_2 e un *sink* per NO e O_3 .

Segue l'altra reazione omogenea per la quale:

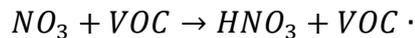
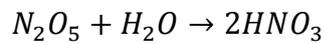
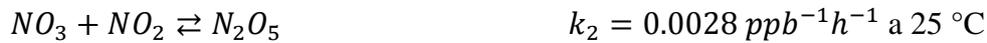


All'esterno, durante le ore diurne, questa reazione ha poca influenza, dal momento che il radicale nitrato è fotochimicamente instabile. D'altro canto, durante le ore buie, le concentrazioni dell' NO_3^- possono superare notevolmente le contemporanee concentrazioni di O_3 e NO_2 (Weschler et al., 1994). Comunque, una volta formato, il radical

¹⁰⁵ (De Santis et al., 1992)

¹⁰⁶ (De Santis et al., 1996)

nitrate e il biossido di azoto sono in equilibrio con il pentossido di diazoto. A questo punto, sia l' N_2O_5 sia l' NO_3 , reagendo rispettivamente con acqua e composti organici volatili (*VOC* – Volatile Organic Compound), possono contribuire alla formazione dell'acido nitrico in ambiente interno, secondo le reazioni:



Dato che le concentrazioni interne dei *VOC* sono generalmente maggiori di quelle esterne, si verifica la rimozione ad opera del radical nitrate di un atomo di idrogeno da un doppio legame C – C di un insieme di composti dei *VOC*. Inoltre, l'ozono stesso può reagire con una parte dei *VOC* (come 1-2-dicloetilene, canfene, isoprene, d-limonene, α -pinene, stirene), ovvero quei composti che contengono uno o più legami C – C insaturi. Studi recenti mostrano che le reazioni tra l'ozono e gli idrocarburi insaturi possono portare ad un aumento delle concentrazioni del radicale idrossile ($HO \cdot$) negli ambienti interni, fino a raggiungere lo stesso ordine di grandezza delle concentrazioni esterne, specie durante le ore di massima insolazione piuttosto che durante le ore notturne. Inoltre, uno dei maggiori prodotti formati dalla reazione tra l'ozono e la maggior parte degli idrocarburi insaturi tipici di ambienti indoor, che presentano un doppio legame terminale, è la formaldeide. Altri prodotti includono il metil-vinil-chetone (dall'isoprene), il 4-acetyl-1-metilcicloesene (dal limonene), la benzaldeide (dallo stirene) e molti altri composti che possono essere più irritanti dei loro stessi precursori (Weschler, 2000). Dall'analisi dei tempi di dimezzamento per la reazione dell'ozono con i composti organici volatili, comunemente presenti in ambiente interni, si evince che le reazioni sono troppo lente per competere con i tassi di ricambio dell'aria. Invero, la maggior parte dei *VOC* reagisce con l' O_3 così lentamente che sarebbe necessario più di un anno affinché una concentrazione di $100 \mu\text{g m}^{-3}$ di ozono dimezzi la concentrazione di uno tra questi composti organici volatili. Pertanto, data una concentrazione indoor compresa tra $100 \div 200 \mu\text{g m}^{-3}$, risulteranno effetti trascurabili sulle concentrazioni della maggior parte dei *VOC* comunemente trovati negli ambienti interni (Weschler, 2000).

Infine, per quanto riguarda l'ozono, tra tutte le possibili reazioni energeticamente favorite con gli altri composti presenti negli ambienti interni, l'ozono reagisce con un esiguo numero di questi composti, con una velocità di reazione almeno comparabile al tasso di ricambio dell'aria. Nel caso in cui questi composti reagiscano abbastanza velocemente, allora le reazioni possono portare alla formazione di inquinanti addizionali (Weschler, 2000).

Secondo quanto detto finora, quindi, mentre l' NO_2 e l' NO non costituiscono una notevole minaccia e, in realtà, agiscono anche come un sink per l' O_3 ; bisogna, altresì, tenere in seria considerazione che questi composti finiscono per formare acido nitrico sulle superfici interne (Ryhl-Svendsen, 2006).

Si tenga presente che l'equazione del bilancio di massa I/O, come precedentemente detto, non prende in considerazione le possibili reazioni, appena descritte, che possono avere luogo in aria, il che rappresenta la più grande limitazione del modello. Per gli ossidi di azoto e per alcune reazioni tra l'ozono e i VOC, l'aria rappresenta in realtà un significativo sink. Quindi, volendo aggiungere questo termine nell'equazione del bilancio di massa, otteniamo:

$$\frac{dC_i}{dt} = C_o E_x - C_i E_x - C_i k_d - C_i(t) \sum_i k_n C_{chem-i} + S$$

Dove:

C_{chem-i} è la concentrazione dell' i -esimo composto nell'aria che reagisce con l'inquinante [ppb o $\mu g m^{-3}$]

k_n rappresenta la velocità di reazione del secondo ordine tra il composto i -esimo e l'inquinante in aria [$ppb^{-1} h^{-1}$ o $\mu g^{-1} m^3 h^{-1}$]

$$C_i(t) = \frac{S + E_x C_o}{E_x} [1 - e^{(-E_x t)}] + C_i(0) e^{(-E_x t)} - C_i$$

Si ricorda che, in questa ricerca, uno degli obiettivi è descrivere il confronto tra inquinamento indoor e outdoor, relativamente alla Sala dei Santi Padri. Tuttavia, come ulteriore approfondimento, è stato calcolato anche il tasso di ricambio dell'aria, utilizzando il modello semplificato. Come possibile sviluppo futuro di quest'analisi è possibile integrare il modello qui utilizzato con altri, più complessi, che tengono in considerazione le reazioni che avvengono in aria. In quest'ultimo caso infatti, sarebbe meglio avere a disposizione dati relativi alle altre sale limitrofe.

Per questa ricerca, avendo a disposizione i dati di concentrazioni interna ed esterna, possiamo calcolare il tasso di ricambio dell'aria, E_x . Il modello su cui ci siamo basati è quello semplificato proposto da Weschler, per cui non sono considerate sorgenti di inquinanti interne e non si valutano le reazioni che avvengono in aria. Risolvendo l'equazione per E_x , avremo:

$$E_x = \frac{I/O \cdot v_d (A/V)}{1 - I/O}$$

I dati utilizzati per calcolare i tassi di ricambio dell'aria nella Sala dei Santi Padri hanno tenuto conto: del valore medio dei rapporti I/O - e relativi errori sperimentali - calcolati per

l'NO₂ e per l'O₃, valore pari a 0.35; degli intervalli di velocità di deposizione¹⁰⁷ riportati da Nazaroff e Cass (1986) per O₃ (0.02 ÷ 0.06 cms⁻¹) e per NO₂ (0.0003 ÷ 0.12 cms⁻¹); del rapporto A/V calcolato considerando le superfici dovute ai ripiani degli scaffali e alla scultura della Guiccioli; si è, inoltre, fatta l'approssimazione che la stanza considerata sia un parallelepipedo.¹⁰⁸ Pertanto, si è ottenuto, considerando il range di variabilità dei parametri utilizzati:

Tabella 4-13: valori utilizzati per il calcolo di E_x per la Sala dei Santi Padri

NO₂		
I/O	0.35	-
$v_{d_{min}}$	0.011	mh^{-1}
$v_{d_{med}}$	2.165	mh^{-1}
$v_{d_{max}}$	4.320	mh^{-1}
A/V	1.13	m^{-1}

Il valore così calcolato del tasso di ricambio dell'aria della Sala dei Santi Padri risulta pari a:

$$E_x = 0.006 \div 2.628 h^{-1}$$

Si osservi come l'ampio intervallo di valori calcolati sia dovuto alla variabilità dei dati di letteratura relativi alla velocità di sedimentazione dell'NO₂.

In Tabella 4-14 si riportano i valori di A/V e E_x presenti in letteratura:

Tabella 4-14: valori di A/V e E_x provenienti da letteratura. Note: (a) considerando l'intero edificio; (b) quando l'edificio è chiuso; (c) con porte e finestre aperte; (d) in condizioni di funzionamento normali. Da (Cass et al., 1988).

Sito	A/V [m^{-1}]	E_x [h^{-1}]	Note
Southwest Museum	0.72	3.2	a
Pasadena Historical Museum	0.94	0.06 ÷ 2.2	b ÷ c
		1.5	d
Lang Gallery	1.01	0.0 ÷ 0.99	b ÷ c
Villa Montezuma	1.59	1.8 ÷ 2.6	
Montgomery Gallery	0.94	1.6	

¹⁰⁷ Le velocità di deposizione del monossido di azoto rientrano nel range del biossido.

¹⁰⁸ L'assunzione che la Sala dei Santi Padri sia un parallelepipedo è stata confrontata calcolando l'ipotesi di una geometria con volta circolare. Il rapporto differisce di poco (rispettivamente 1.11 e 1.01). La scelta di ipotesi come parallelepipedo è stata presa dal momento che nel calcolo è verosimilmente impossibile calcolare tutte le superfici esposte (considerando ad esempio, i dettagli della scultura della Guiccioli, dei libri etc.).

Infine, il Grafico 4-36 mostra, sotto forma di istogrammi, i valori di E_x provenienti da letteratura e quello calcolato in questo studio, $E_x = 1.317 h^{-1}$, ossia la media dell'intervallo prima riportato di E_x .

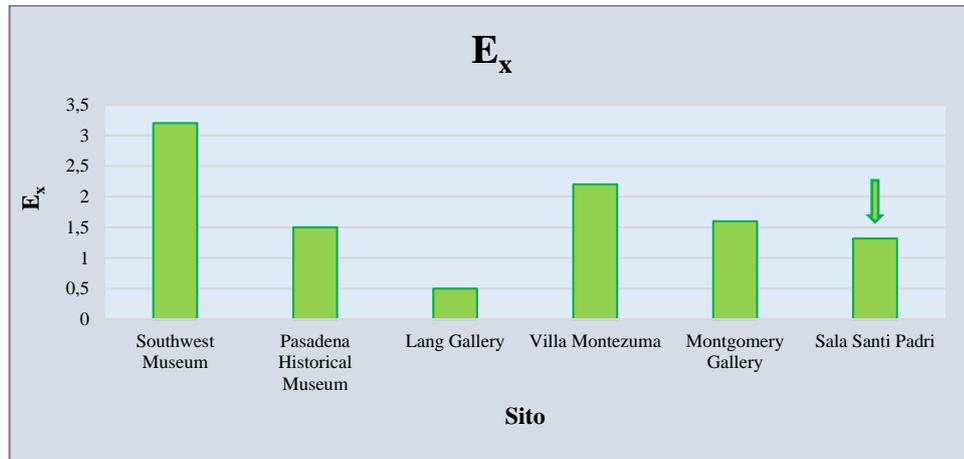


Grafico 4-36: valori di E_x provenienti da letteratura e valore di E_x per la Sala dei Santi Padri.

Si noti come il valore calcolato in questa ricerca è coerente con i dati riportati in letteratura per quegli ambienti che non prevedono sistemi di condizionamento, né di filtrazione dell'aria, ma si caratterizzano per ventilazione naturale.

Come ulteriore confronto, i dati ottenuti sono stati confrontati con i risultati ottenuti mediante l'implementazione del modello IMPACT.¹⁰⁹ Si tratta di un modello di supporto per la scienza della conservazione nei musei, nelle gallerie e nelle librerie, che può stimare il rapporto indoor/outdoor di SO_2 , NO_2 e O_3 se è nota la concentrazione esterna. Oltre al dato di concentrazione esterna è necessario conoscere l'area di tutte le superfici esposte e indicarne la tipologia (pareti, pavimento, soffitto, ...), il volume dell'ambiente interno investigato, il tasso di ricambio dell'aria (E_x), la temperatura e l'umidità relativa interna. Per prima cosa, prima ancora di inserire i dati nel modello è possibile scegliere tra due modalità: edificio naturalmente ventilato o ventilato artificialmente.

¹⁰⁹ Il software IMPACT è stato sviluppato in ambito al progetto EC FP5 Project - Innovative Modelling of Museum Pollution and Conservation Thresholds, 2000-2004, Contract No. EVK4-CT-2000-00031. E' stato implementato grazie alla collaborazione di diverse istituzioni: UCL Centre for Sustainable Heritage in partnership with the Norwegian Institute for Air Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, National Museum of Krakow, Emcel Filters Ltd and Architecture Project, Malta. Disponibile sul sito: <http://www.ucl.ac.uk/sustainableheritage-save/impact/using.htm>

Utilizzando questo modello, sempre con l'assunzione di parallelepipedo, implementando i valori minimo, medio e massimo di E_x , si ricavano le seguenti stime di concentrazione interna:

Tabella 4-15: risultati delle concentrazioni interne stimate tramite modello IMPACT. Si noti che potendo inserire una sola cifra significativa, il valore minimo utilizzato è stato 0.1.

Valore di E_x	Stima concentrazione interna (μgm^{-3})
$E_x = 0.1$	16.031
$E_x = 1.3$	62.238
$E_x = 2.6$	66.010

Possiamo, quindi, concludere che il modello IMPACT fornisce risultati consistenti con i dati analitici-sperimentali e con le stime teoriche effettuate per questa ricerca, compatibili con tassi di ricambio molto bassi: i valori rientrano nell'intervallo prima calcolato. In particolare, un tasso di ricambio di 0.03 h^{-1} corrisponde, secondo i risultati del modello IMPACT, eseguito con le caratteristiche della Sala dei Santi Padri della Classense, ad un valore di concentrazione stimata di $8.5 \mu\text{gm}^{-3}$, pari alla concentrazione interna rilevata durante le nostre campagne di misura. Tale tasso di ricambio corrisponde, viste le caratteristiche della sala dei Santi Padri ad una velocità di deposizione media v_d di 0.049 mh^{-1} ed ad un tasso di deposizione superficiale medio K_d pari a 0.055 h^{-1} . I risultati dell'applicazione del modello IMPACT alla conformazione della Sala dei Santi Padri sono mostrati nel Grafico 4-37.

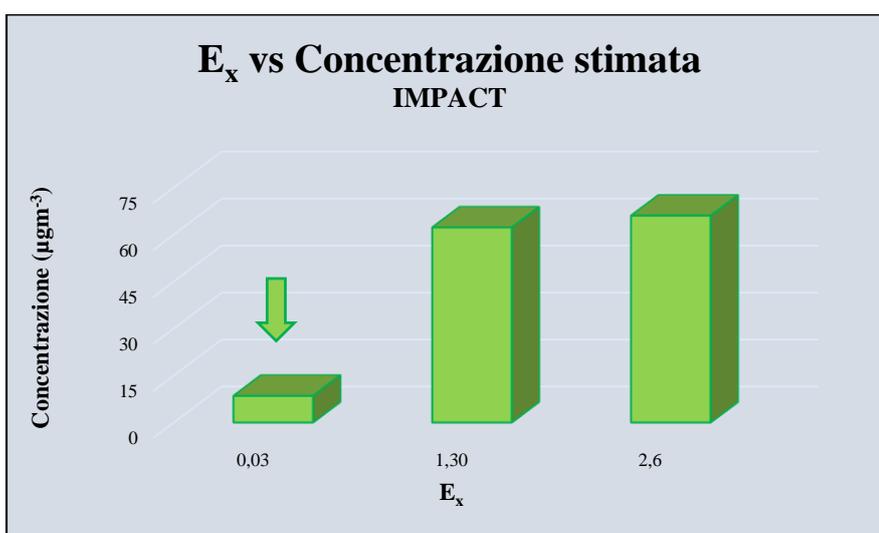


Grafico 4-37: tassi di ricambio dell'aria e le concentrazioni stimate tramite il modello IMPACT.

4.2 Proposta metodologica di valutazione del rischio per i beni culturali

Si precisa che la metodologia proposta è rivolta, specificatamente, alla determinazione del rischio relativo a cui sono soggetti i beni culturali, in particolare librari, conservati in ambienti confinati. Prima di mostrare la proposta della stima del rischio, in virtù della complessità del sistema e degli elementi di cui è costituito, come descritto nei precedenti paragrafi, è opportuno descrivere le fasi preliminari che si consiglia di seguire mediante un approccio sequenziale-deduttivo. È bene sottolineare che l'originalità della metodologia proposta è relativa alla stima del rischio per i beni cartacei, in particolare librari, ma, attraverso la sequenza di queste fasi, comuni ad altre metodologie, vengono acquisite le informazioni necessarie anche per possibili generalizzazioni della stessa. In particolare avremo:

1. Definizione del contesto
2. Elaborazione del piano di monitoraggio
3. Raccolta dati microclimatici e di qualità dell'aria
4. Analisi dei dati
5. Stima dell'Indice di Rischio

La definizione del contesto consiste nella descrizione dei dati che devono essere considerati per un'analisi microclimatica. A tal proposito è necessario contestualizzare lo studio, sia dal punto di vista spaziale, sia temporale. Ad esempio, se l'ambiente di conservazione si trova in un'area urbana piuttosto che in un'area agricola o costiera, oppure se lo studio è effettuato durante la stagione estiva o invernale. È bene dunque documentarsi sulle caratteristiche microclimatiche esterne all'edificio, prima ancora di avviare lo studio, per evitare l'uso improprio delle risorse. Per definizione del contesto, tuttavia, non s'intende considerare esclusivamente ciò che circonda l'ambiente confinato in esame, ma evidenziare le caratteristiche dell'ambiente stesso. Bisogna, quindi, acquisire le informazioni che riguardano l'ambiente museale, ad esempio, planimetrie della struttura, destinazione d'uso, tipologia di impianti (ventilazione o condizionamento) attivi e presenza di eventuali sorgenti di inquinamento interno. In questo modo, da queste informazioni è possibile avere una conoscenza preliminare di quelle che possono essere le criticità più significative.

Sulla base delle conoscenze maturate, quindi, è possibile redigere il piano di monitoraggio, indicando i punti e il periodo di campionamento, attenendosi a quanto stabilito dalle norme tecniche più idonee. Nel caso in cui l'analisi del rischio sia svolta per la prima volta in quell'ambiente confinato, il monitoraggio deve interessare sia l'ambiente esterno, sia quello

interno. Non è possibile, infatti, considerare *a priori* l'ambiente indoor come un sistema completamente chiuso ed isolato dall'ambiente outdoor; di conseguenza, per un'analisi corretta, i confini del sistema devono essere allargati rispetto a quelli che caratterizzano strettamente i locali confinati oggetto di indagine. Ciò consente il confronto tra ambiente indoor e outdoor, dal quale è possibile evincere informazioni fondamentali per la valutazione del rischio. Ad esempio, il conoscere il rapporto tra i livelli di inquinanti interni ed esterni (rapporto I/O) e il tasso di ricambio dell'aria permette di ottenere informazioni molto utili alla comprensione della complessità del sistema che si desidera analizzare. Inizia così il campionamento dei parametri microclimatici e di qualità dell'aria mediante l'utilizzo di molteplici strumenti. Durante la campagna di monitoraggio è bene considerare anche altre variabili come l'affluenza di pubblico, l'apertura delle finestre, i guasti dell'impianto di condizionamento etc.; qualsiasi informazione, in pratica, che possa influenzare i fattori misurati. Sul panorama internazionale vi sono diverse norme tecniche a cui riferirsi. Molte di queste, tra cui le UNI riportate nella seguente ricerca, indicano le modalità di svolgimento del monitoraggio, le caratteristiche degli strumenti (precisione, accuratezza, limite di rilevabilità), con quali tempistiche etc.

I dati così misurati devono essere analizzati statisticamente. A seconda della tipologia di dati si devono eseguire diverse operazioni. Come ogni analisi ambientale, è utile considerare le statistiche descrittive quali medie, gradienti, valore minimo e massimo.

A questo punto dell'indagine è possibile proseguire con la stima dell'Indice di Rischio. Il rischio R è stato precedentemente definito come la probabilità che si verifichi un effetto avverso E_a in relazione ai possibili stati anomali che producono un danno. Questa probabilità è il risultato di tutti gli stati anomali ST_a che possono provocare un danno di magnitudo M_d nel sistema indagato. In questa ricerca sarà formulata una proposta di analisi relativa del rischio. In particolare, se da un punto di vista matematico il rischio è stato definito come:

$$R = P(E_a | M_d) \cdot P(M_d)$$

La metodologia proposta, in questo lavoro di ricerca, è rivolta alla determinazione del secondo membro dell'equazione, $P(M_d)$, ossia la probabilità incondizionata che si verifichi il danno di magnitudo M_d . Questa funzione racchiude gli eventi statistici dei possibili eventi caratterizzati da una specifica magnitudo e dipende da tutti gli stati anomali che provocano il danno. Per come è stato definito il rischio, rifacendoci allo schema logico riassunto nella Figura 1-1, considerando M_d come variabile statistica indipendente al posto di ST_a , è possibile giungere alla determinazione di $P(M_d)$ mediante un'analisi dettagliata del sistema in esame. In altre parole, questo termine può essere espresso come funzione della frequenza dell'evento che determina il danno e della magnitudo del danno stesso, ossia:

$$P(M_d) = f(F_d, M_d)$$

Per poter definire i termini di frequenza e magnitudo è necessario conoscere il sistema in esame. Nel nostro caso, avendo a che fare con un ambiente confinato il cui fine è la conservazione degli oggetti in esso contenuti, è fondamentale conoscerne le caratteristiche in termini di variabili chimico-fisiche, ossia variabili microclimatiche e di qualità dell'aria. Tali ambienti siano essi musei, biblioteche etc. devono essere analizzati come un sistema complesso, in virtù dei differenti elementi che li compongono (microclima interno, microclima esterno, elementi statico-strutturali dell'edificio, impianti di condizionamento o ventilazione, numero di visitatori, natura dei manufatti conservati etc.). Per tali ragioni è opportuno specificare che la metodologia ha l'obiettivo di investigare l'ambiente museale per quanto concerne, esclusivamente, i fattori microclimatici e di qualità dell'aria, trascurando, in particolare, aspetti quali quelli statico/strutturali o collegati ad atti vandalici o furti.

Sia la frequenza, sia la magnitudo, devono essere classificate e categorizzate. In questo modo, è possibile assegnare a ciascuna variabile un punteggio che lo caratterizzi in termini di F_d e M_d .

Per quanto riguarda la magnitudo del danno, essendo una proposta rivolta alla valutazione del rischio per i beni culturali, è necessario partire dalle condizioni ritenute ottimali e man mano che ci si allontana da queste, associare un livello di rischio maggiore. In letteratura, come riportato in tabella 1-3, esistono diverse ricerche che indicano i valori ottimali da tenere in considerazione per iniziare l'analisi proposta. Per ragioni di coerenza con le modalità di campionamento svolto, in questo lavoro di ricerca sono stati presi in considerazione i dati consigliati dalla norma UNI 10586, norma che ci è sembrata particolarmente indicata al nostro obiettivo, quello di caratterizzare l'ambiente di conservazione. Questa norma fornisce i valori, le tolleranze e le massime escursioni giornaliere termoisometriche per quanto riguarda i locali di deposito (adibiti alla conservazione dei documenti grafici). Per quanto riguarda i dati di qualità dell'aria, relativamente ai livelli di inquinanti citati NO_2 , O_3 e SO_2 , sono indicate le concentrazioni massime ammissibili per tutte le tipologie di locale considerate. A tal proposito, per poter entrare nel merito della valutazione del rischio, tali dati devono essere classificati all'interno di intervalli (fasce di magnitudo del danno) alla stregua dei valori di temperatura, umidità relativa ed illuminamento. Per fare ciò i valori proposti dalla UNI sono stati confrontati con l'Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei (D.Lgs. n.112/98 art. 150 comma 6), descritto precedentemente. In particolare, differendo i valori riportati nei due su citati documenti a volte, anche, sensibilmente, altre volte meno (come per la concentrazione di

ozono), abbiamo considerato, per quanto riguarda gli inquinanti aerodispersi, un approccio precauzionale: abbiamo, così preso il valore minimo riportato nei suddetti riferimenti, al quale abbiamo associato la fascia di magnitudo del danno inferiore; abbiamo poi preso il valore massimo come limite inferiore della fascia di magnitudo del danno più alta (rispettivamente il valore consigliato dalla UNI e dal MiBAC). Una volta scelti i due estremi, abbiamo diviso l'intervallo così formato in quattro parti al fine di ottenere lo stesso numero di classi di magnitudo della temperatura, umidità relativa e illuminamento. In questo modo avremo:

Tabella 4-16: fasce di magnitudo calcolate per temperatura, umidità relativa, gradienti giornalieri delle stesse, illuminamento, livelli di concentrazione di NO₂, O₃ e SO₂.

	Fascia 0	Fascia 1	Fascia 2
Temperatura (°C)	14 ≤ T ≤ 20	12 ≤ T < 14 20 < T ≤ 22	10 ≤ T < 12 22 < T ≤ 24
Relative Humidity (%)	50 ≤ RH ≤ 60	45 ≤ RH < 50 60 < RH ≤ 65	40 ≤ RH < 45 65 < RH ≤ 70
ΔT₂₄ (°C)	ΔT ₂₄ ≤ 2	2 < ΔT ₂₄ ≤ 4	4 < ΔT ₂₄ ≤ 6
ΔRH₂₄ (%)	ΔRH ₂₄ ≤ 5	5 < ΔRH ₂₄ ≤ 10	10 < ΔRH ₂₄ ≤ 15
Illuminamento (lux)	E ≤ 50	50 < E ≤ 75	75 < E ≤ 100
NO₂ (μgm⁻³)	NO ₂ ≤ 10.0	10.0 < NO ₂ ≤ 12.5	12.5 < NO ₂ ≤ 15.0
O₃ (μgm⁻³)	O ₃ ≤ 2.0	2.0 < O ₃ ≤ 6.5	6.5 < O ₃ ≤ 11.0
SO₂ (μgm⁻³)	SO ₂ ≤ 10.0	10.0 < SO ₂ ≤ 14.0	14.0 < SO ₂ ≤ 18.0
	Fascia 3	Fascia 4	Fascia 5
Temperatura (°C)	8 ≤ T < 10 24 < T ≤ 26	6 ≤ T < 8 26 < T ≤ 28	6 > T > 28
Relative Humidity (%)	35 ≤ RH < 40 70 < RH ≤ 75	30 ≤ RH < 35 75 < RH ≤ 80	30 > T > 80
ΔT₂₄ (°C)	6 < ΔT ₂₄ ≤ 8	8 < ΔT ₂₄ ≤ 10	ΔT ₂₄ > 10
ΔRH₂₄ (%)	15 < ΔRH ₂₄ ≤ 20	20 < ΔRH ₂₄ ≤ 25	ΔRH ₂₄ > 30
Illuminamento (lux)	100 < E ≤ 125	125 < E ≤ 150	E > 150
NO₂ (μgm⁻³)	15.0 < NO ₂ ≤ 17.5	17.5 < NO ₂ ≤ 20.0	NO ₂ > 20.0
O₃ (μgm⁻³)	11.0 < O ₃ ≤ 15.5	15.5 < O ₃ ≤ 20.0	O ₃ > 20.0
SO₂ (μgm⁻³)	18.0 < SO ₂ ≤ 22.0	22.0 < SO ₂ ≤ 26.0	SO ₂ > 26.0

Elaborando queste classificazioni, si è cercato di ripercorrere le relazioni individuate da una tipica e generale curva dose-risposta di forma generica (D-R): secondo i ragionamenti condotti, infatti, i diversi intervalli da noi proposti, presi singolarmente, possono essere visti come rappresentazione delle diverse porzioni di una tipica curva dose-risposta. In particolare, l'intervallo di fascia di magnitudo del danno 0 (ossia i valori consigliati da letteratura e/o norme tecniche) corrisponde, di fatto, alla parte della curva precedente alla RfD o a quella porzione della curva D-R relativa ad un rischio accettabile. Per contro, la fascia 5 rappresenta, di fatto, la parte asintotica della curva D-R. Ne consegue che le fasce intermedie, dalla 2^a alla 4^a descrivono la parte centrale della curva stessa, quella descrivibile,

di fatto come “lineare a tratti”. A questo proposito, vorremmo qui sottolineare come in un recente articolo (Menart et al., 2011) si evidenzi proprio la necessità di una revisione della funzione dose-risposta nell’ambito dei beni culturali. Nonostante i numerosi studi sul degrado della carta, manca ancora una funzione generale che tenga conto dei più importanti agenti di deterioramento, quali: temperatura, umidità relativa, sostanze inquinanti e composizione della carta etc. Infatti, solo attraverso una tale funzione, sarà possibile una precisa valutazione del rischio assoluta per quanto concerne i fattori microclimatici e, quindi, modellizzare questi processi sulla base dell’influenza di alcuni parametri tipici dell’ambiente di conservazione. In altri termini, per determinare la probabilità condizionata $P(E_d | M_d)$ che si verifichino effetti avversi a causa del danno di magnitudo M_d , è necessario conoscere, nel modo più preciso possibile le relazioni di dose-risposta. Un approccio percorribile, come sviluppo futuro di questa tesi, è quello suggerito da Tétreault (2003),¹¹⁰ il quale formula una valutazione del rischio a cui sono soggetti manufatti in funzione della dose a cui sono esposti; dose definita come prodotto della concentrazione per un periodo temporale di esposizione (da lui assunto pari a: 1, 10 o 100 anni).

Per quanto riguarda la frequenza, ritornando alla $P(M_d)$, sono state considerate le frequenze relative del numero di osservazioni che ricadono all’interno di ciascun intervallo di magnitudo sulla base del numero di osservazioni totali. Risulta la seguente classificazione:

Tabella 4-17: classi di frequenza.

Classe di frequenza	Frequenza relativa	Probabilità (%)
1	$0.00 \leq F \leq 0.17$	$0 \leq P \leq 17$
2	$0.17 < F \leq 0.33$	$17 < P \leq 33$
3	$0.33 < F \leq 0.50$	$33 < P \leq 50$
4	$0.50 < F \leq 0.67$	$50 < P \leq 67$
5	$0.67 < F \leq 0.83$	$67 < P \leq 83$
6	$0.83 < F \leq 1.00$	$83 < P \leq 100$

Come già detto in precedenza, questa metodologia è finalizzata ad una valutazione del rischio relativo, per cui il risultato non sarà un valore stimato di probabilità secondo il quale un effetto avverso potrà avere luogo (10^{-6} , 10^{-3} etc.); bensì una classificazione dell’Indice di Rischio, che mostri la significatività del danno (stati anomali) al sistema, considerando la frequenza e la magnitudo dei suoi stati anomali, secondo quanto appena esposto. Bisogna procedere, infatti, con un’analisi statistica dei dati misurati o stimati per capire in quale classe di magnitudo ciascuno dei parametri ambientali considerati si collocano e con quale

¹¹⁰ In appendice.

frequenza. Come risultato, si delinea, quindi, una situazione esprimibile mediante un matrice, nella quale le colonne sono le fasce di magnitudo del danno e le righe le frequenze relative o probabilità (%) di accadimento, come riassunto nella tabella successiva:

Tabella 4-18: matrice risultante dalla combinazione delle fasce di magnitudo e frequenza.

$P(D_m) = f(F_{\%d}, M_d)$		Magnitudo del danno					
		0	1	2	3	4	5
Frequenza del D ϵ	1	0	1	2	3	4	5
	2	0	2	4	6	8	10
	3	0	3	6	9	12	15
	4	0	4	8	12	16	20
	5	0	5	10	15	20	25
	6	0	6	12	18	24	30

In particolare, avremo che:

$$(F_{\%d} \cdot M_d)_x = IR_x$$

Dove il pedice x rappresenta la variabile in esame.

La matrice 6x6 così ottenuta indica i valori dell'Indice di Rischio in funzione della frequenza $P(D_m)$ e della magnitudo del danno per ciascuna variabile. Nel caso, comunque possibile, di un doppio valore dell'indice di rischio per una stessa variabile, si è considerato quello corrispondente al valore di magnitudo del danno maggiore (sempre in virtù del principio di precauzione o di massima conservatività). Per giungere ad una classificazione che ci consenta di gestire con maggiore elasticità questi dati, è utile suddividere in classi di Indice di Rischio i valori ottenuti dal prodotto della frequenza per la magnitudo.

Bisogna, tuttavia, sottolineare che, utilizzando le classificazioni e/o la scelta del "caso peggiore", vi è comunque una perdita di informazione rispetto al dato originario. In questa proposta metodologica, come già visto, sono presentate diverse classificazioni, alle quali spesso si associano attributi o scale cromatiche. Queste operazioni offrono molteplici vantaggi: con esse è possibile gestire una notevole mole di dati e confrontare diverse variabili tra loro con differenti unità di misura; inoltre, esse forniscono una visione sintetica, che rende più immediata la comprensione del fenomeno, consentendo, nel contempo, una maggiore fruibilità del dato etc. Fermo restando che, nel caso in cui si sia interessati al maggior dettaglio possibile della ricerca, è necessario ricorrere ai dati originari. In virtù di queste considerazioni, proponiamo quanto segue:

$$0 \leq IR_x \leq 3$$

$$IR \in \mathbb{N}$$

- $(F_{\%d} \cdot M_d)_x = 0 \rightarrow IR0 \rightarrow$ Accettabile
 - $1 \leq (F_{\%d} \cdot M_d)_x \leq 5 \rightarrow IR1 \rightarrow$ **Basso**
 - $6 \leq (F_{\%d} \cdot M_d)_x \leq 15 \rightarrow IR2 \rightarrow$ **Medio**
 - $16 \leq (F_{\%d} \cdot M_d)_x \leq 30 \rightarrow IR3 \rightarrow$ **Alto**
-

Il significato di questo indice di rischio deve essere inteso come la probabilità che si presenti una situazione nel sistema considerato (nel nostro caso le sale della Biblioteca Classense) che possa causare un danno ai bersagli di interesse (nello specifico, rappresentati dai beni librari). Come già detto in precedenza, in questa ricerca, incentrata su una metodologia di rischio relativo, non si valuta il rischio assoluto, ma si pone in evidenza la possibilità che eventi anomali possano verificarsi e da questi possano derivare dei rischi. Ne consegue, quindi, che nel caso di $IR = 0$, trovandoci nelle condizioni di ammissibilità consigliate dalle norme tecniche a cui ci si è riferiti (nel nostro caso UNI 10586 e Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei), non dovrebbe corrispondere alcun pericolo per i bersagli di interesse: per questo motivo è stato scelto l'attributo "Accettabile", dal momento che il rischio, in questa accezione, corrisponde al degrado minimo, e comunque inevitabile del bene considerato; in altre parole, qualora fossero mantenute tutte le condizioni ottimali termoigrometriche e di qualità dell'aria, non sarà, comunque, possibile interrompere il naturale processo di deterioramento a cui sono soggetti tutti i manufatti. A tal proposito, è utile ribadire che uno dei rischi presi in considerazione per quanto riguarda i beni culturali consiste, proprio, nella velocità del processo di deterioramento: pertanto a valori lontani da quelli ottimali, in generale, corrisponde un'accelerazione del naturale processo.

Nella seguente tabella, ad ogni indice di rischio (0, 1, 2, 3), vengono associati i relativi valori ottenuti dalla matrice. Si tenga presente che nella matrice 6x6 proposta precedentemente sono possibili 18 valori; di questi, se escludiamo il valore 0 al quale viene associato l'indice di rischio 0 (Accettabile), ne restano 17. Non potendo dividere 17 in un intervallo di quattro classi, abbiamo deciso assegnare alle classi degli indici 1, 2 e 3 quattro valori ciascuna; ne consegue che l'ultima classe di indice di rischio risulti composta da cinque valori. Il motivo per cui è stato preferito inserire un valore in più nell'ultima classe, piuttosto che negli indici di rischio precedenti è da rintracciare nel cosiddetto principio di precauzione.¹¹¹

¹¹¹ Tale principio, formulato per la prima volta in occasione della Conferenza sull'Ambiente e lo Sviluppo delle Nazioni Unite di Rio de Janeiro (1992), è sancito dalla Comunità Europea e, in sua ottemperanza, dalla legislazione italiana nel D.Lgs. 152/2006 Parte I, art. 3-ter. Si precisa inoltre che tale principio dovrebbe essere considerato nell'ambito di una strategia strutturata di analisi dei rischi ecologico e sanitario (CCE, 2012).

In altri termini, a partire dal calcolo di $P(D_m)$, si ottengono diversi punteggi di IR per ciascuna variabile considerata in questa ricerca:

- $IR_T \rightarrow$ indice di rischio associato alla variabile temperatura;
- $IR_{RH} \rightarrow$ indice di rischio associato all'umidità relativa;
- $IR_{\Delta T} \rightarrow$ indice di rischio associato al gradiente di temperatura registrato nelle 24 ore;
- $IR_{\Delta RH} \rightarrow$ indice di rischio associato al gradiente di umidità relativa registrato nelle 24 ore;
- $IR_E \rightarrow$ indice di rischio associato all'illuminamento;
- $IR_{NO_2} \rightarrow$ indice di rischio associato ai livelli di concentrazione di biossido di azoto;
- $IR_{O_3} \rightarrow$ indice di rischio associato ai livelli di concentrazione di ozono;
- $IR_{SO_2} \rightarrow$ indice di rischio associato ai livelli di concentrazione di biossido di zolfo;

Infine, volendo considerare il sistema nel suo complesso, sulla base della definizione di rischio riportata nell'introduzione di questo lavoro, risulta che uno scenario è dato dalla somma di tutti i rischi individuati. Pertanto, in ultima analisi, è possibile calcolare quanto segue:

$$Scenario = \sum IR_T IR_{RH} IR_{\Delta T} IR_{\Delta RH} IR_E IR_{NO_2} IR_{O_3} IR_{SO_2}$$

Considerando che ogni IR può assumere valori interi discreti da 0 a 4, avremo che:

$$0 \leq S \leq 24 \quad S \in \mathbb{N}$$

Invitando sempre alle considerazioni riportate in precedenza, anche in questo caso può essere utile fornire il risultato sulla base della seguente classificazione:

- $S = 0 \rightarrow$ Scenario Accettabile
 - $1 \leq S \leq 8 \rightarrow$ Priorità di intervento **Bassa**
 - $9 \leq S \leq 16 \rightarrow$ Priorità di intervento **Alta**
 - $17 \leq S \leq 24 \rightarrow$ Priorità di intervento **Molto Alta**
- } Necessità di interventi

Il risultato della metodologia proposta ci indica, quindi, una priorità di interventi a livello di scenario o di rischio per una singola variabile. Può risultare utile, ad esempio, per confrontare diversi ambienti tra loro e investire le risorse economiche a disposizione sulla situazione che presenta il punteggio di rischio relativo più elevato, oppure investire le risorse in merito alla variabile che produce l'indice di rischio maggiore.

Infine, sia nel caso di IR , sia di S , sono possibili diverse riproduzioni grafiche dei risultati, mostrate nel paragrafo successivo.

4.2.1 Applicazione della metodologia proposta al caso della Biblioteca Classense

Questa ricerca è iniziata con l'obiettivo di applicare la proposta metodologica all'area di studio della Biblioteca Classense. Sono state eseguite le fasi preliminari alla sua applicazione

nel periodo compreso tra giugno e settembre 2014. In particolare, dopo aver contattato la direzione dell'Istituzione Biblioteca Classense, ed ottenuta la disponibilità per questa ricerca, è stato elaborato il piano di monitoraggio descritto in precedenza; piano che, essenzialmente, ha visto come step fondamentali: diversi sopralluoghi, il posizionamento di strumenti, il controllo ed il download dei dati acquisiti. In seguito, questi dati sono stati elaborati per fornire un'analisi microclimatica preliminare e per applicare la nuova metodologia.

Per evitare alcuni passaggi ripetitivi, già descritti in precedenti capitoli di questa tesi, si riportano, a titolo esemplificativo, alcune tabelle elaborate in Excel con i dati relativi alla Sala dei Santi Padri, per quanto concerne la temperatura. I dati ricavati con i datalogger sono stati elaborati per ottenere le medie orarie e ciascuna di queste osservazioni orarie è stata confrontata con gli intervalli delle fasce di magnitudo indicate nel paragrafo precedente.

Tabella 4-19: esempio delle elaborazioni statistiche e dei risultati ottenuti applicando la metodologia proposta.

Data	Ora	Media (°C)	Fasce di magnitudo	Intervallo inferiore	Intervallo superiore	Intervallo complessivo	Numero di osservazioni	Frequenza relativa	Probabilità	IR																																																									
22-lug	0.00	28.0	0 (UNI)			$14 \leq T \leq 20$	0.0	0.00	0.00																																																										
	1.00	27.9	1	12+14	20+22	$12 \leq T \leq 22$	0.0	0.00	0.00																																																										
	2.00	27.8	2	10+12	22+24	$10 \leq T \leq 24$	0.0	0.00	0.00																																																										
	3.00	27.8	3	8+10	24+26	$8 \leq T \leq 26$	92.0	0.24	23.96	6																																																									
	4.00	27.7	4	6+8	26+28	$6 \leq T \leq 28$	292.0	0.76	76.04	20																																																									
	5.00	27.6	5	4+6	28+30	$4 \leq T \leq 30$	0.0	0.00	0.00																																																										
	6.00	27.6					384.0	1.00	100.00																																																										
	7.00	27.5	numero totale di osservazioni = 384																																																																
	8.00	27.4																																																																	
	9.00	27.4																																																																	
	10.00	26.9		<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2" style="text-align: center;"><i>IR</i></th> <th colspan="7" style="text-align: center;"><i>M_D</i></th> </tr> <tr> <th style="text-align: center;">0</th> <th style="text-align: center;">1</th> <th style="text-align: center;">2</th> <th style="text-align: center;">3</th> <th style="text-align: center;">4</th> <th style="text-align: center;">5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="6" style="text-align: center;"><i>F_%</i></td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">10</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">9</td> <td style="text-align: center;">12</td> <td style="text-align: center;">15</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">12</td> <td style="text-align: center;">16</td> <td style="text-align: center;">20</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">15</td> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">25</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">12</td> <td style="text-align: center;">18</td> <td style="text-align: center;">24</td> <td style="text-align: center;">30</td> </tr> </tbody> </table>							<i>IR</i>	<i>M_D</i>							0	1	2	3	4	5	<i>F_%</i>	1	0	1	3	3	4	5	2	0	2	4	6	8	10	3	0	3	6	9	12	15	4	0	4	8	12	16	20	5	0	5	10	15	20	25	6	0	6	12	18	24	30
	<i>IR</i>	<i>M_D</i>																																																																	
		0	1	2	3	4	5																																																												
	<i>F_%</i>	1	0	1	3	3	4	5																																																											
		2	0	2	4	6	8	10																																																											
		3	0	3	6	9	12	15																																																											
		4	0	4	8	12	16	20																																																											
		5	0	5	10	15	20	25																																																											
		6	0	6	12	18	24	30																																																											
11.00	27.1																																																																		
12.00	27.2																																																																		
13.00	27.3																																																																		
14.00	27.3																																																																		
15.00	27.4																																																																		
16.00	27.4																																																																		
17.00	27.5																																																																		
18.00	27.5																																																																		
19.00	27.6																																																																		

In questo modo si è calcolata la frequenza relativa di ciascuna classe di magnitudo. Le stesse operazioni sono state eseguite per tutte le altre variabili microclimatiche, eccetto l'illuminamento. Sebbene, infatti, sia stato utilizzato un luxmetro non è stato possibile acquisire una quantità di dati sufficiente per elaborare statistiche frequentiste. A tal proposito è tuttavia giusto sottolineare che l'unico rilievo illuminotecnico effettuato non ha mostrato dati di illuminamento superiori a quanto riportato dalla norma UNI. La Biblioteca Classense, infatti, per quanto concerne le sale superiori investigate, ha adottato alcuni accorgimenti (scudi agli infissi, tende, teli davanti alle finestre) che consentono di evitare l'esposizione alla luce solare diretta dei manufatti. Inoltre, per lo stesso motivo dell'illuminamento, i

termogrammi rilevati con l'uso della termocamera non sono riportati in questa ricerca; tuttavia, si segnala che l'analisi dei termogrammi non ha evidenziato punti particolari in cui la temperatura superficiale assuma valori marcatamente diversi da quelli dell'ambiente circostante (punti freddi e punti caldi, hotspot). Probabilmente ciò è dovuto al fatto che temperature superficiali minori di quelle ambiente possono essere individuate su pareti o spigoli affacciati all'esterno durante la stagione invernale oppure su pareti addossate al terreno, durante la stagione estiva. Mentre temperature superficiali maggiori di quelle ambiente sono causate da sorgenti di calore (impianti, tubazioni, pareti esterne e finestre) (UNI10829, 1999). Inoltre, le pareti divisorie esterne della Biblioteca Classense presentano, come risulta evidente anche da tutte le misure termiche effettuate nel corso delle campagne di misura condotte, un'inerzia termica¹¹² molto elevata, che fa sì che la temperatura interna, una volta raggiunto un valore di equilibrio fra indoor ed outdoor, non presenti oscillazioni o variazioni interne significative .

Prima di mostrare i risultati ottenuti, è opportuno sottolineare che, per quanto riguarda i dati di qualità dell'aria, dai campionatori passivi utilizzati abbiamo ricavato la concentrazione media del periodo di misura, quindi un singolo valore. Non sarebbe pertanto possibile fare una statistica con tale singolo valore; per questo motivo, si è pensato di stimare l'andamento delle concentrazioni indoor a partire dai dati di concentrazione media oraria forniti dall'ARPA, grazie alla collaborazione della Dott.ssa Valbonetti, e sulla base del rapporto I/O calcolato in precedenza ($R_{I/O} = 0.35$). In particolare, questa stima è stata effettuata considerando che il modello dinamico che descrive la dipendenza della concentrazione indoor da quella esterna si comporta come un sistema dinamico del primo ordine. Vale a dire, un sistema nel quale la variabile di ingresso (concentrazione outdoor, nel nostro caso) si trasforma in quella di uscita con l'introduzione di un ritardo e di una distorsione. In generale, dalla teoria dei sistemi dinamici di ordine 1 si ottiene:

$$a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = f(t)$$

Nel nostro caso, partendo dall'equazione del bilancio di massa, in condizioni stazionarie, risulta:

$$\frac{1}{(E_x + k_d)} \frac{dC_i}{dt} + C_i = \frac{E_x}{(E_x + k_d)} C_o$$

¹¹² L'inerzia termica è definita, in termotecnica, come “la capacità di un materiale o di una struttura di variare più o meno lentamente la propria temperatura come risposta a variazioni di temperatura esterna o ad una sorgente di calore/raffreddamento interno” ed è data dall'effetto combinato di due caratteristiche termiche degli edifici: l'accumulo termico, o capacità termica, e la resistenza termica.

Considerando che la costante di tempo risulta essere: $\tau = \frac{1}{(E_x+k_d)} \cong 11.628 \text{ h}^{-1}$, il fattore di smorzamento¹¹³ $\phi = \frac{1}{\sqrt{1+\tau^2\Omega^2}} \cong 0.311$ e lo sfasamento $\delta = \tan^{-1}(-\Omega\tau) \cong -\frac{2}{5}\pi$ e se si considera che la frequenza di taglio $\Omega_{t_{0.7}} \equiv \frac{1}{\tau} = 0.0137 \text{ h}^{-1}$, si ottiene che il periodo più corretto per calcolare la stima delle concentrazioni indoor è di circa 73.06 h^{-1} , pari a circa 3 giorni. A tal proposito, si riporta un grafico dove è possibile confrontare le concentrazioni medie misurate con i campionatori passivi e quelle stimate con le considerazioni or ora descritte:

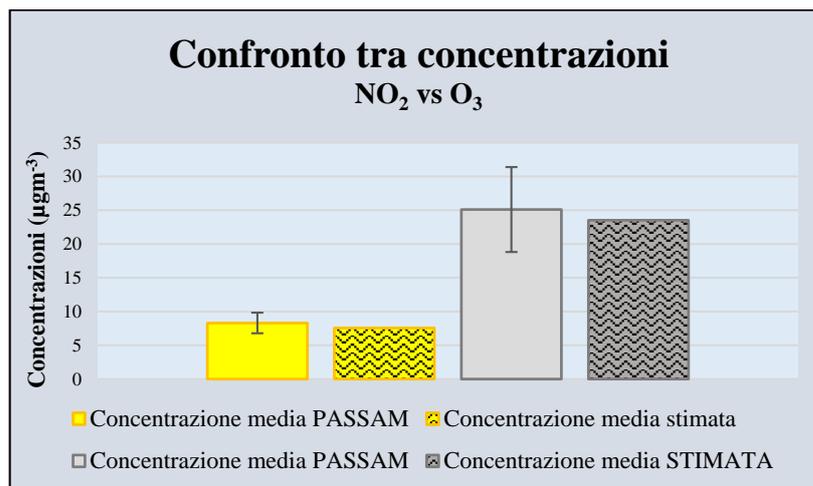


Grafico 4-38: Confronto tra livelli di concentrazione misurata tramite campionatori PASSAM e stimata dalle relazioni I/O.

Da questo grafico (Grafico 4-38) si evince che le medie delle concentrazioni, calcolate su periodi di 3 giorni sono confrontabili con le medie campionate su tutto il periodo di misura; per questo motivo abbiamo inserito anche le variabili di qualità dell'aria in questo caso di studio, riferite alla Sala dei Santi Padri (locale all'interno del quale è stata calcolata la dinamica delle concentrazioni).

Di seguito saranno mostrati diverse rappresentazioni dei dati ottenuti; da ognuna di queste è possibile evincere informazioni utili, in alcuni casi in maniera diretta, in altri indiretta. Tuttavia, come sottolineato dalla proposta metodologica, può essere opportuno mostrare i dati con diversi livelli di dettaglio, così da poter scegliere il livello più opportuno. I grafici sono raggruppati come segue:

- Grafici con gli andamenti giornalieri per ciascuna variabile termoigrometrica (T, RH, ΔT , ΔRH) in tutte le sale (dal Grafico 4-40 al Grafico 4-55) e per la qualità dell'aria (NO_2 e O_3) nella Sala dei Santi Padri (dal Grafico 4-56 al Grafico 4-57); I grafici

¹¹³ Ipotizzando che la frequenza fondamentale delle variazioni degli inquinanti outdoor abbia un periodo giornaliero.

saranno commentati per ciascuna variabile, evidenziando, eventualmente, le differenze riscontrate nei diversi ambienti esaminati.

- Grafici con indice di rischio in virtù degli stati psicometrici, umidità relativa in ascissa e temperatura in ordinata (dal grafico 4-58 al 4-61). Sono rappresentate, nella scala cromatica proposta, le fasce di magnitudo per le due variabili considerate e l'insieme dei punti che rappresenta tutte le osservazioni. In questo modo, si individuano 9 aree all'interno del grafico: quella centrale, in verde, caratterizza la regione di benessere, le altre individuano le regioni che si discostano dalle condizioni accettabili per una o entrambe le variabili. Il posizionamento delle osservazioni in una regione piuttosto che in un'altra mette in evidenza la variabile termoigrometrica, causa dello scostamento della condizione di benessere. Il grafico 4-39 non riporta le osservazioni ma spiega sinteticamente ciascuna regione. Di seguito sono riportati i grafici con le osservazioni per ogni sala investigata.

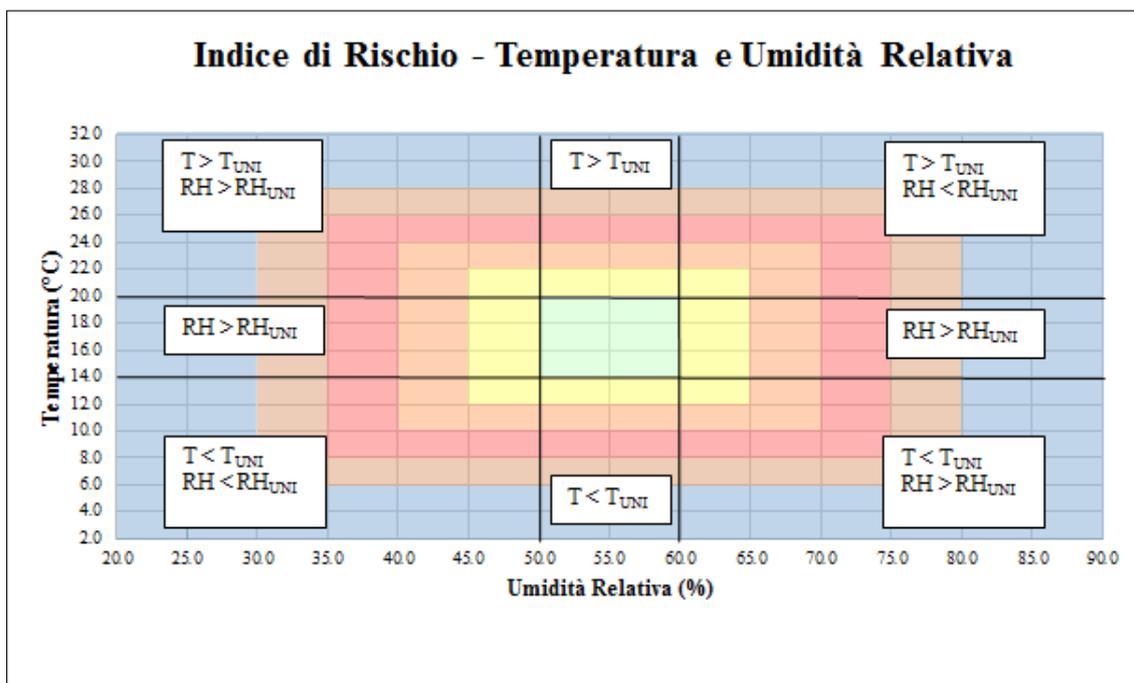


Grafico 4-39: Diagramma generico che mostra le asce di magnitudo in funzione delle variabili di temperatura e umidità. Si individuano 8 regioni, per ognuna di queste si indicano le condizioni ambientali che la caratterizzano.

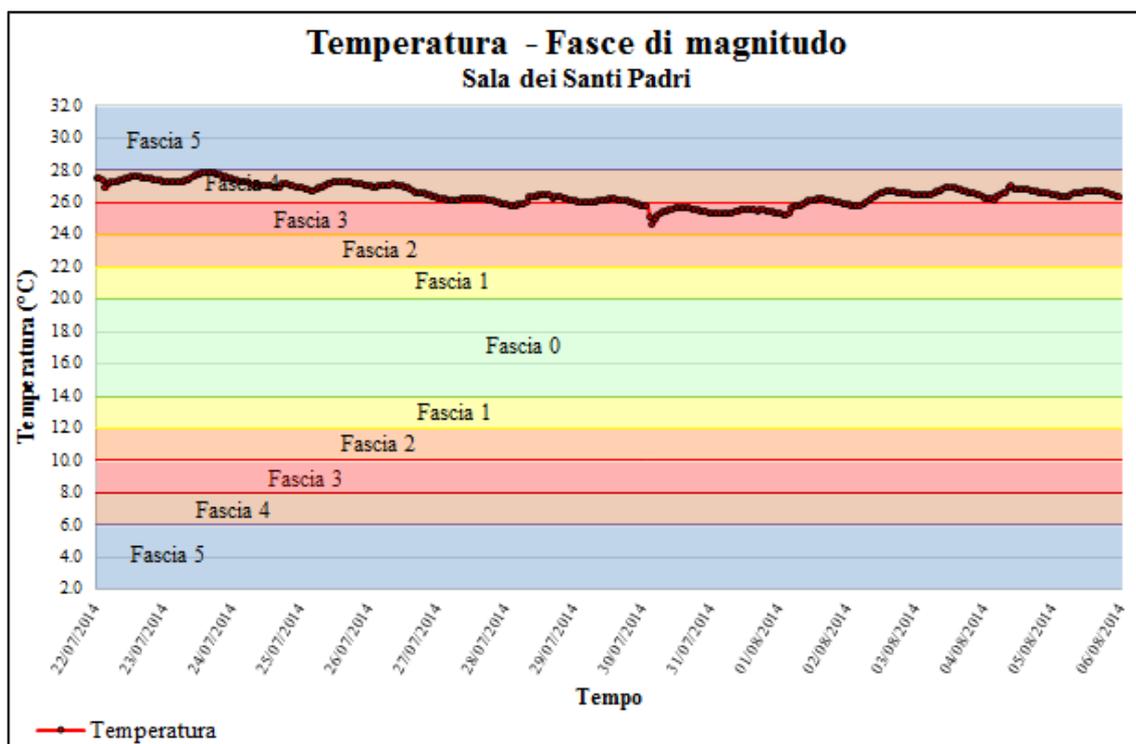


Grafico 4-40: andamento dei valori di temperatura medi orari registrati nella Sala dei Santi Padri e confrontati con le fasce di magnitudo.

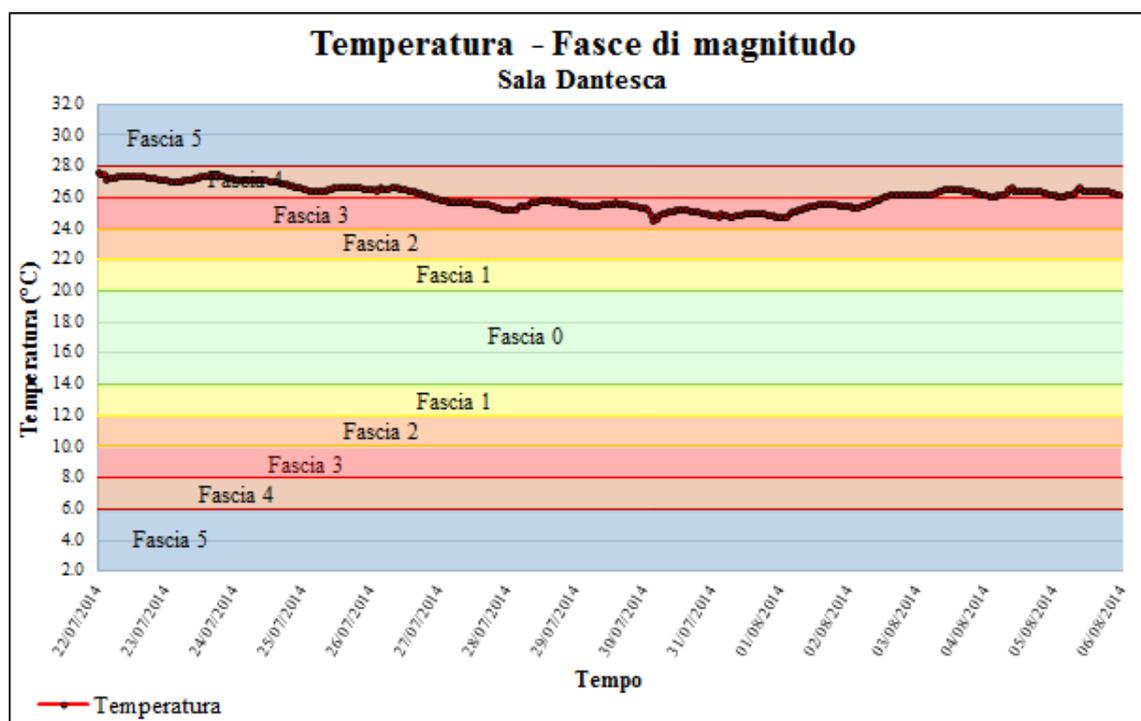


Grafico 4-41: andamento dei valori di temperatura medi orari registrati nella Sala Dantesca e confrontati con le fasce di magnitudo.

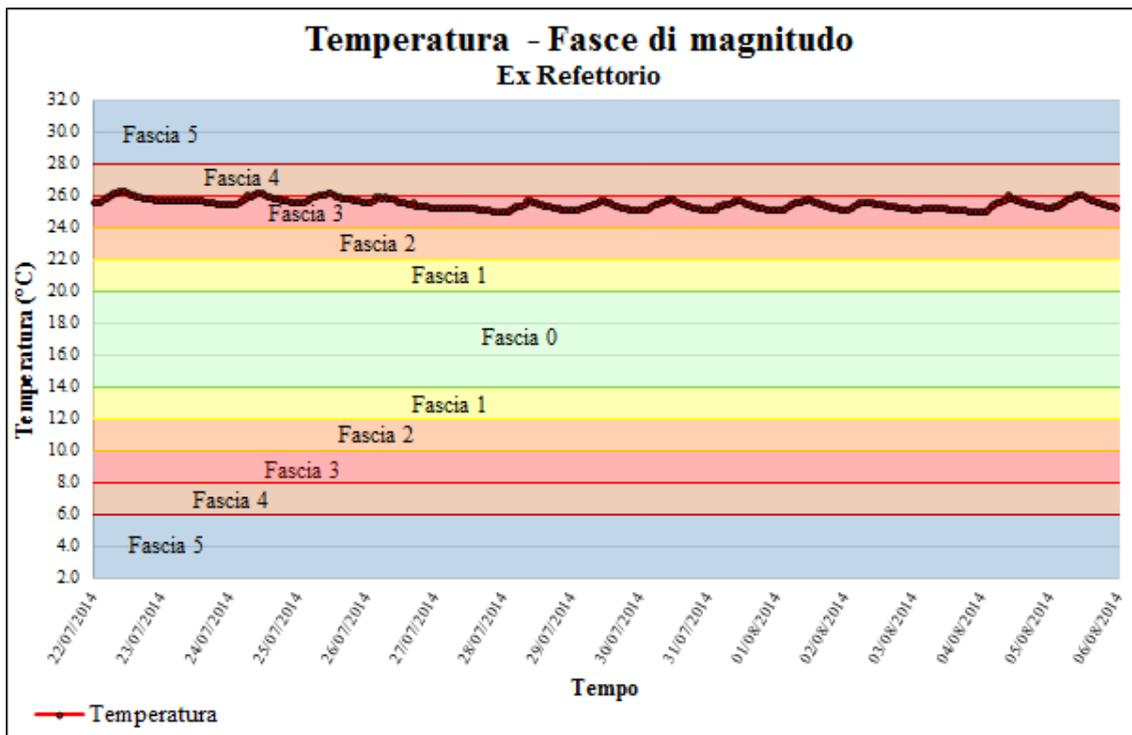


Grafico 4-42: andamento dei valori di temperatura medi orari registrati nell'Ex Refettorio e confrontati con le fasce di magnitudo.

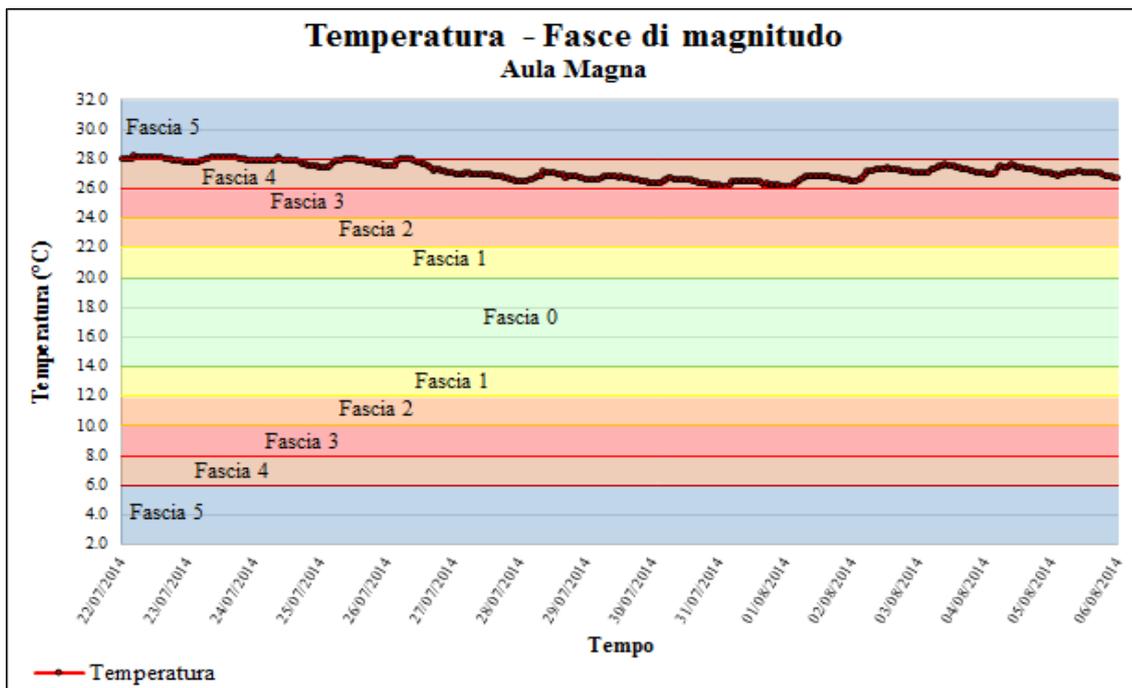


Grafico 4-43: andamento dei valori di temperatura medi orari registrati nell'Aula Magna e confrontati con le fasce di magnitudo.

Da questi grafici si evince che in tutte le sale investigate, la variabile temperatura non rientra nella fascia di magnitudo 0, o fascia di benessere. Si evince così, immediatamente, che sussiste una situazione caratterizzata da stati anomali del sistema. Per poter assegnare, però, a ciascuna situazione un maggior dettaglio, la metodologia proposta prevede l'elaborazione

statistica dei dati calcolando, in particolare, la frequenza delle osservazioni per ciascuna classe di magnitudo.

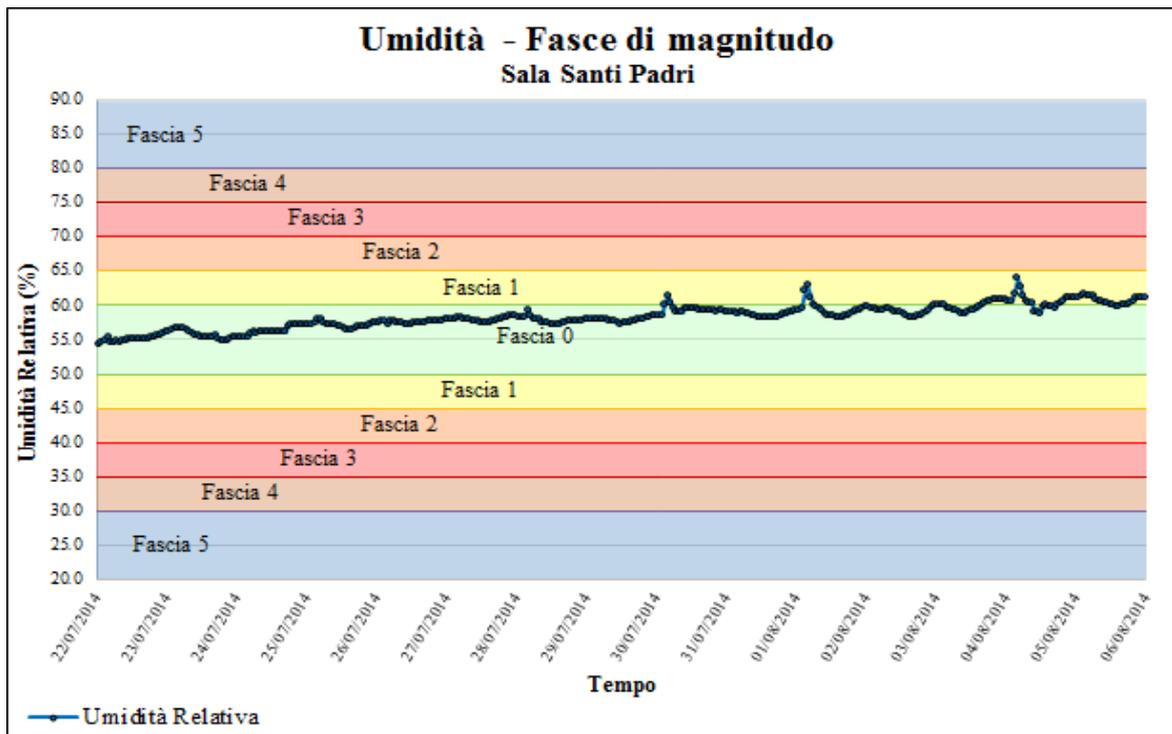


Grafico 4-44: andamento dei valori di umidità relativa medi orari registrati nella Sala dei Santi Padri e confrontati con le fasce di magnitudo.

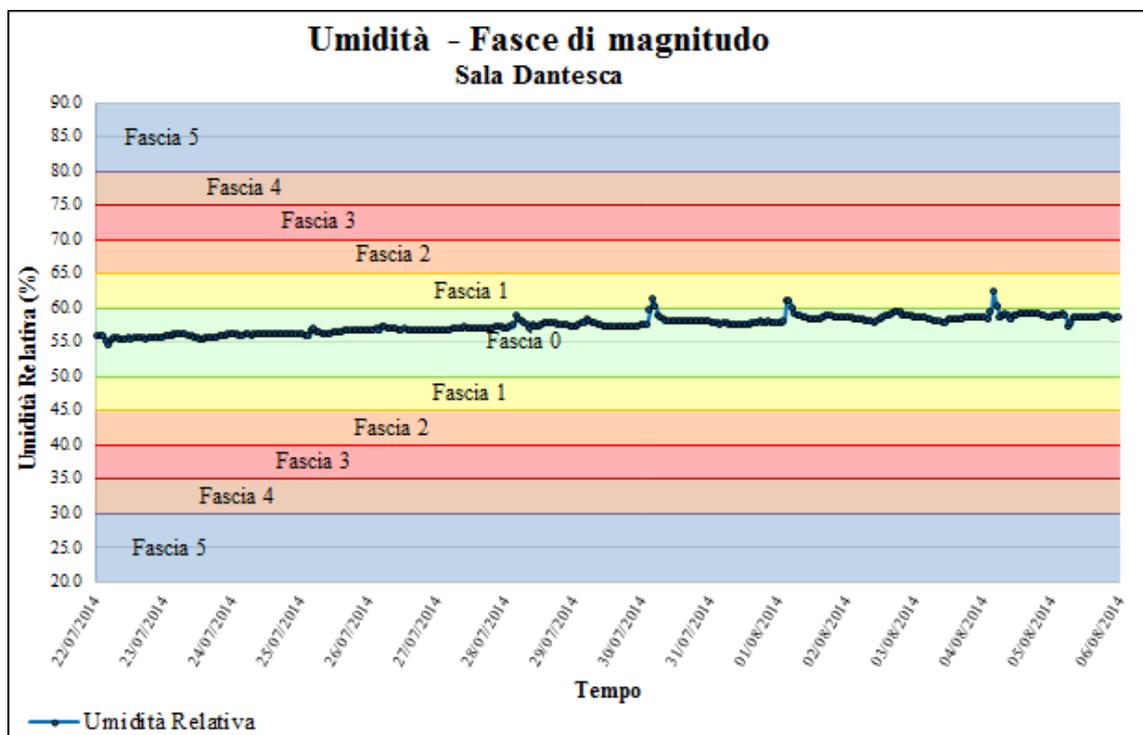


Grafico 4-45: andamento dei valori di umidità relativa medi orari registrati nella Sala Dantesca e confrontati con le fasce di magnitudo.

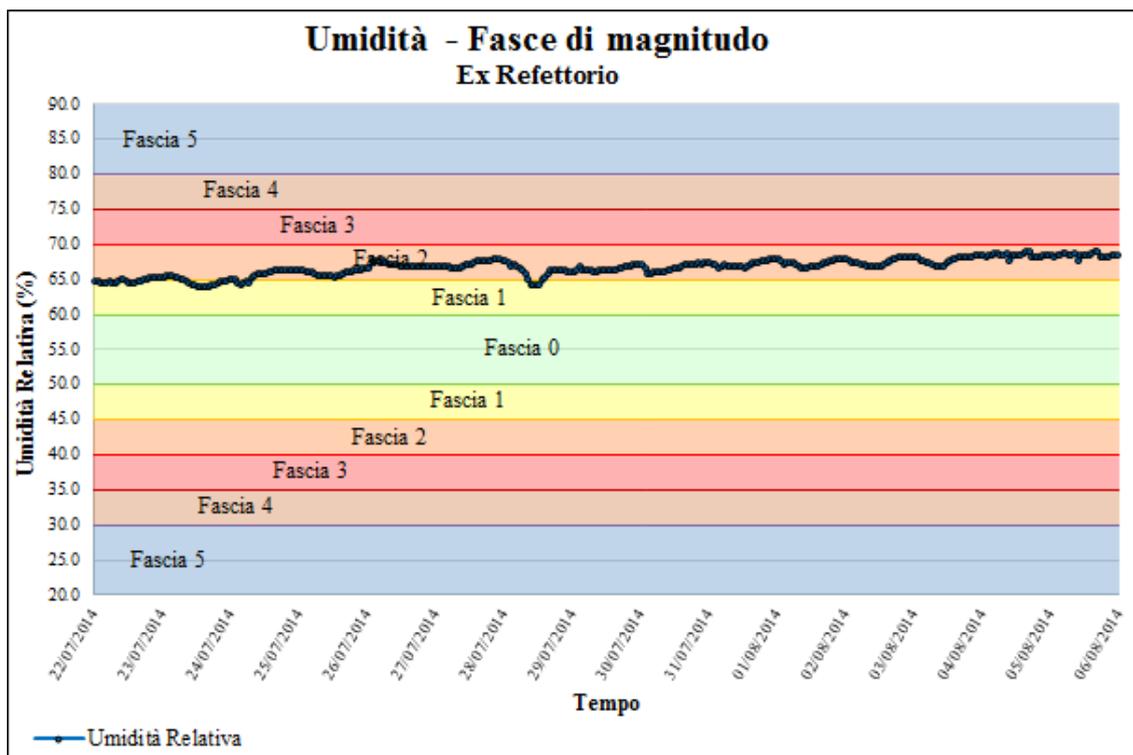


Grafico 4-46: andamento dei valori di umidità relativa medi orari registrati nell'Ex Refettorio Padri e confrontati con le fasce di magnitudo.

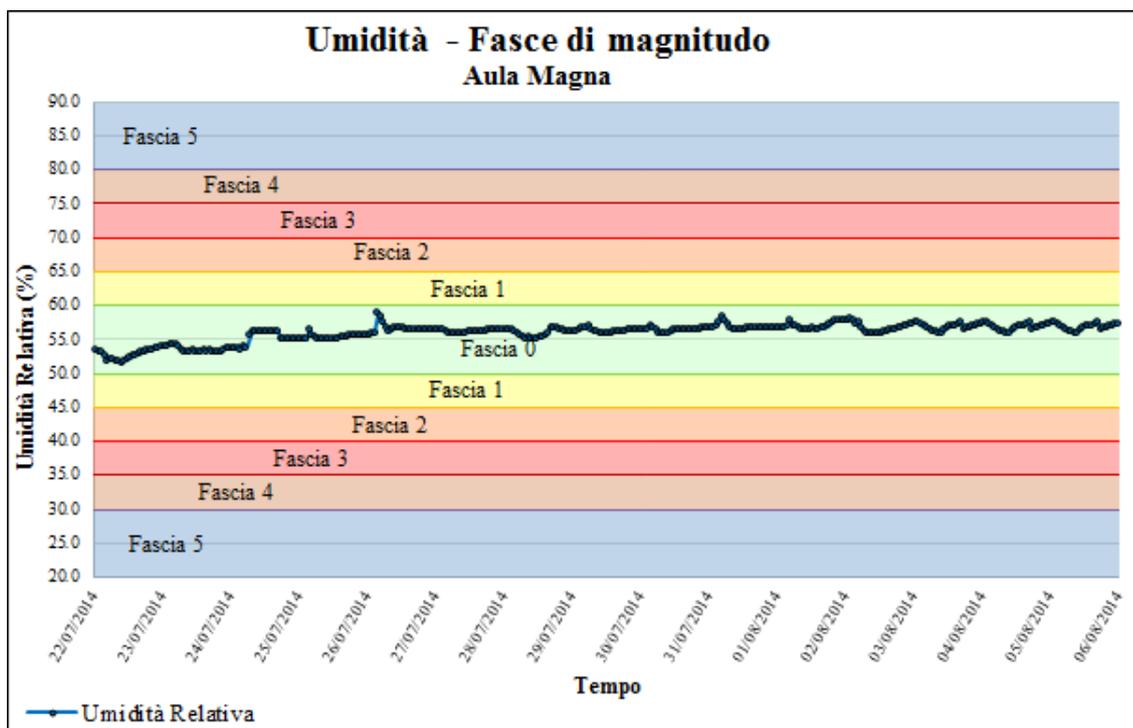


Grafico 4-47: andamento dei valori di umidità relativa medi orari registrati nell'Aula Magna e confrontati con le fasce di magnitudo.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, invece, non si segnalano situazioni particolarmente, se non per la sala dell'Ex Refettorio. Tuttavia, si ricorda che quest'ambiente non è adibito alla conservazione dei testi, ma è adibita, attualmente, ad aula di studio per gli utenti della

Biblioteca Classense. Cautelativamente, in questo studio, si è, tuttavia, deciso di applicare i limiti per gli ambienti di conservazione anche a questa sala. Da quanto si evince in questo e in successivi grafici, però, così come si presenta attualmente, la sala dell'ex Refettorio non risulterebbe un ambiente idoneo alla conservazione, almeno per lunghi periodi, dei libri pregiati.

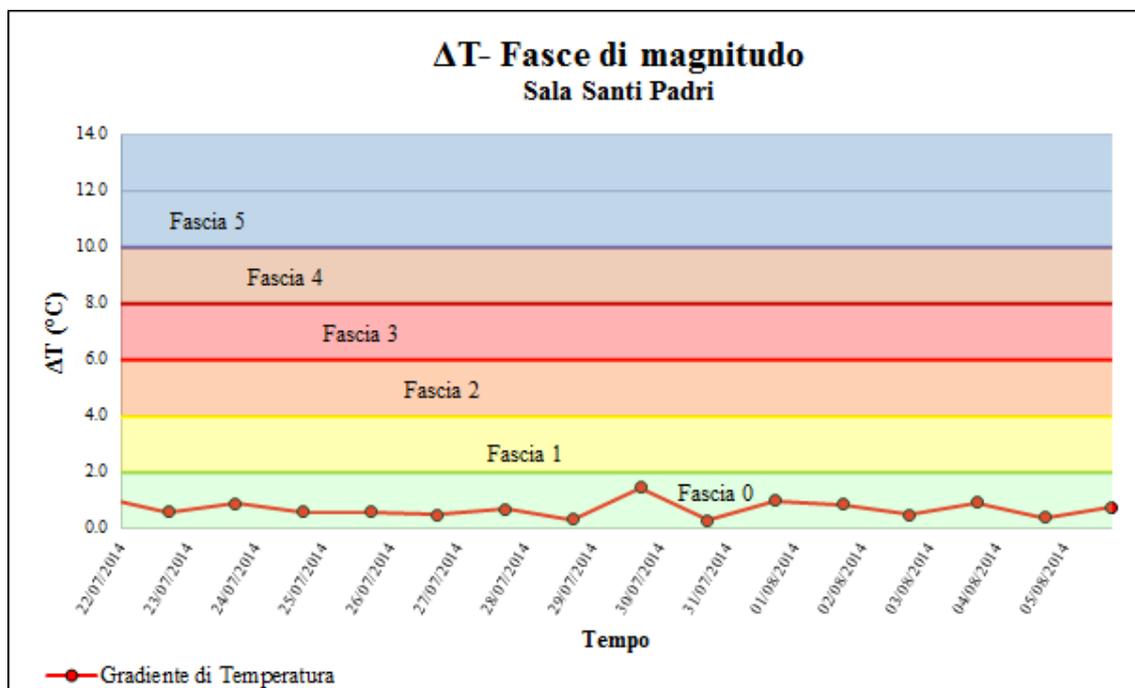


Grafico 4-48: andamento delle escursioni giornaliere di temperatura registrate nella Sala dei Santi Padri e confrontati con le fasce di magnitudo.

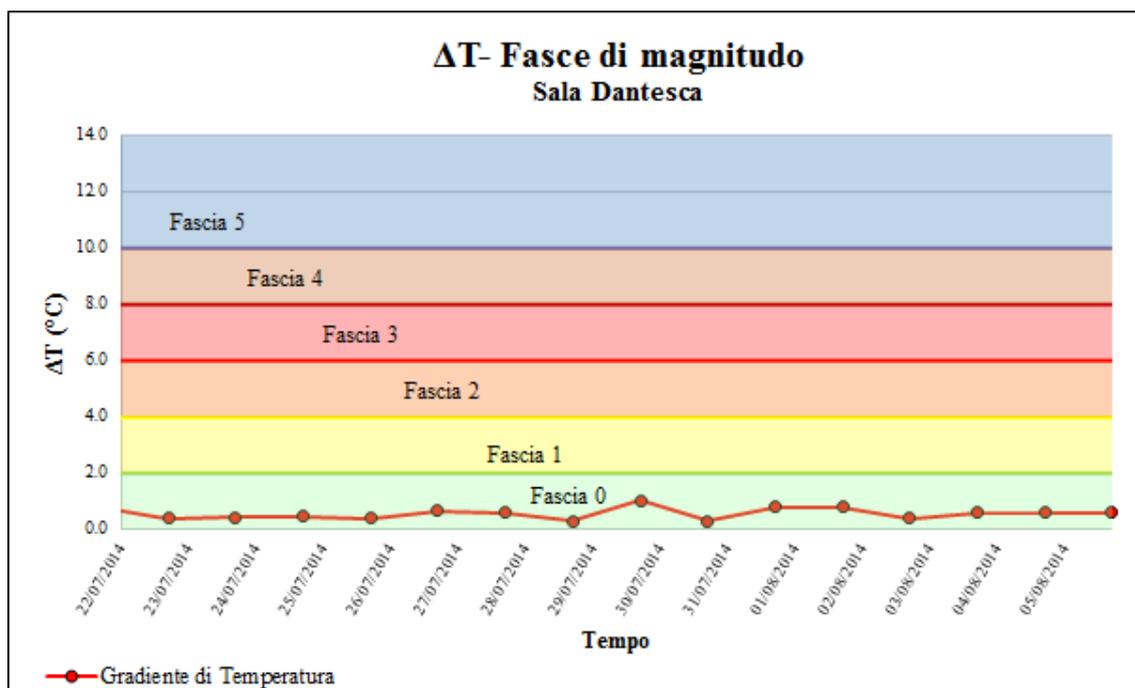


Grafico 4-49: andamento delle escursioni giornaliere di temperatura registrate nella Sala Dantesca e confrontati con le fasce di magnitudo.

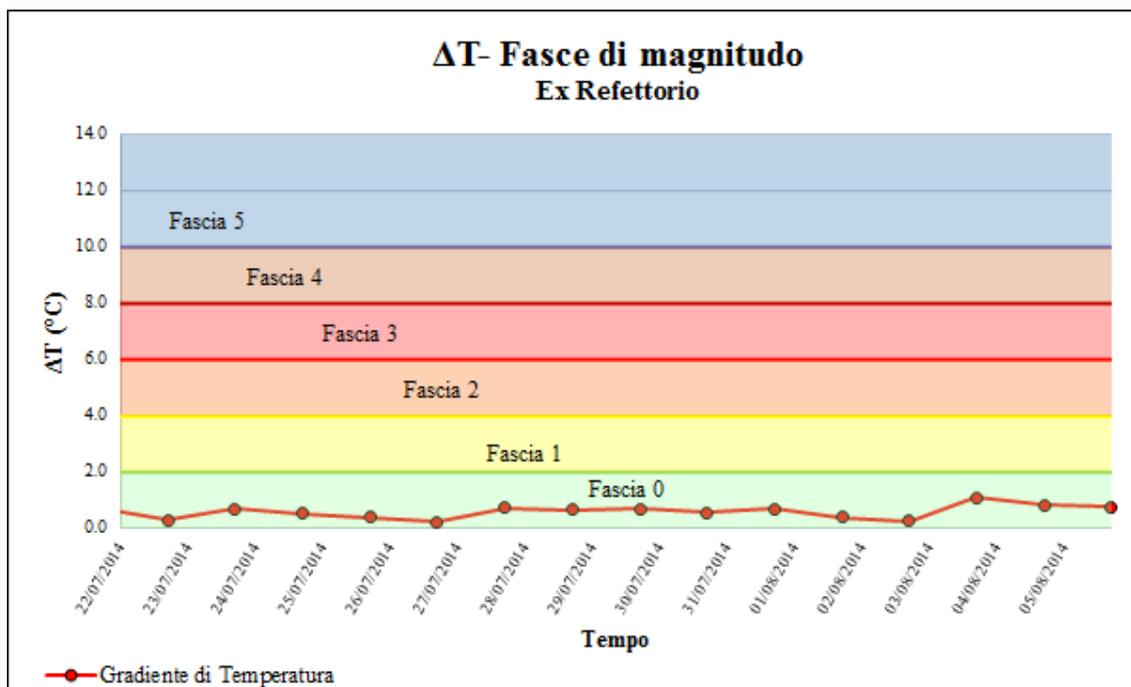


Grafico 4-50: andamento delle escursioni giornaliere di temperatura registrate nell'ex Refettorio e confrontati con le fasce di magnitudo.

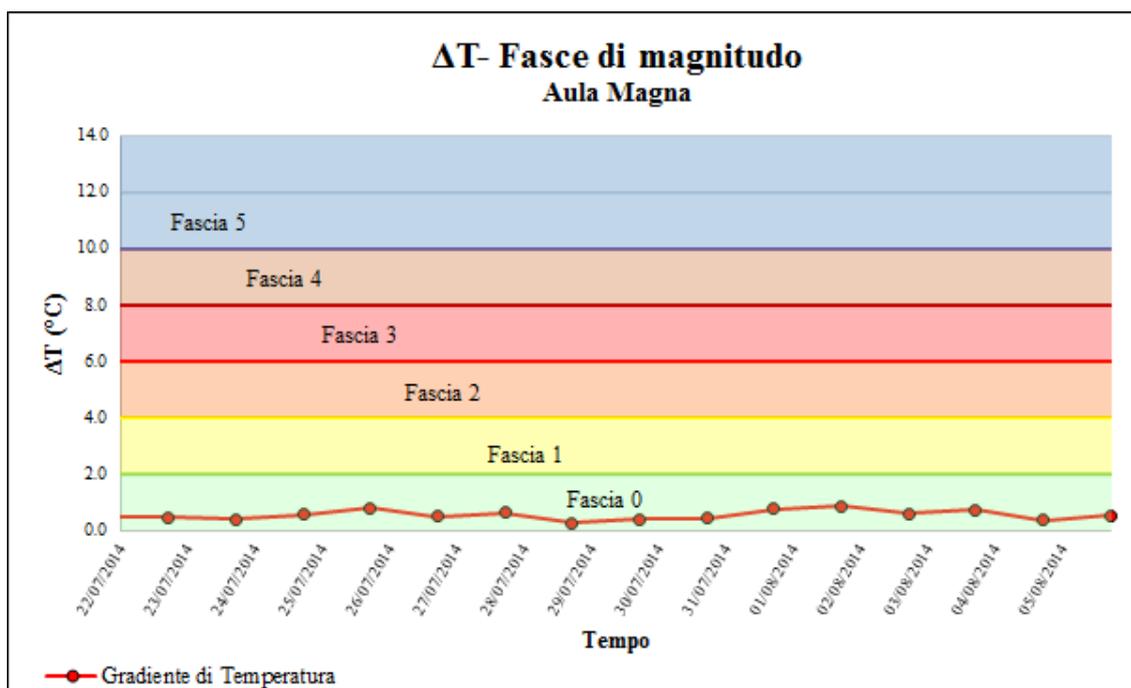


Grafico 4-51: andamento delle escursioni giornaliere di temperatura registrate nell'Aula Magna e confrontati con le fasce di magnitudo.

Dai grafici sulle escursioni termiche (dal Grafico 4-48 al Grafico 4-51) non si riscontrano situazioni di rischio; in tutti i casi, infatti, nell'arco delle 24 ore, il gradiente di temperatura ΔT non supera mai i 2°C, come consigliato dalla UNI10586. Questo dimostra che l'edificio garantisce, come già accennato in precedenza, un'inerzia termica tale da non seguire le escursioni giornaliere dell'ambiente esterno.

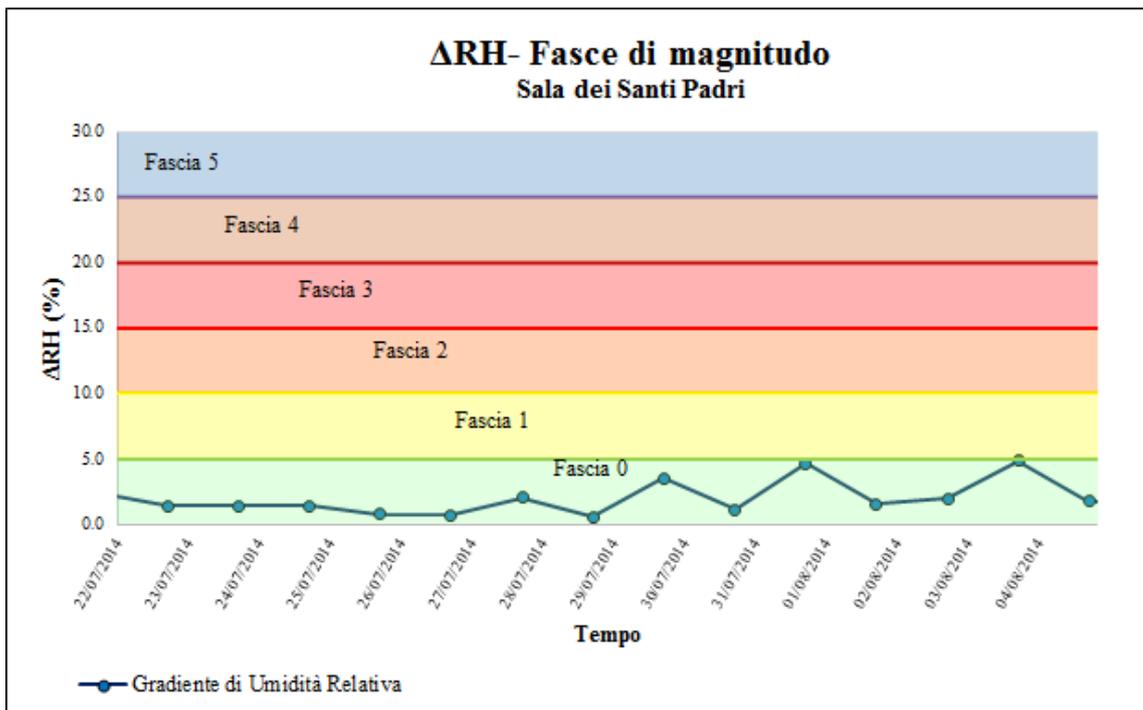


Grafico 4-52: andamento delle escursioni giornaliere di umidità relativa registrate nella Sala dei Santi Padri e confrontati con le fasce di magnitudo.

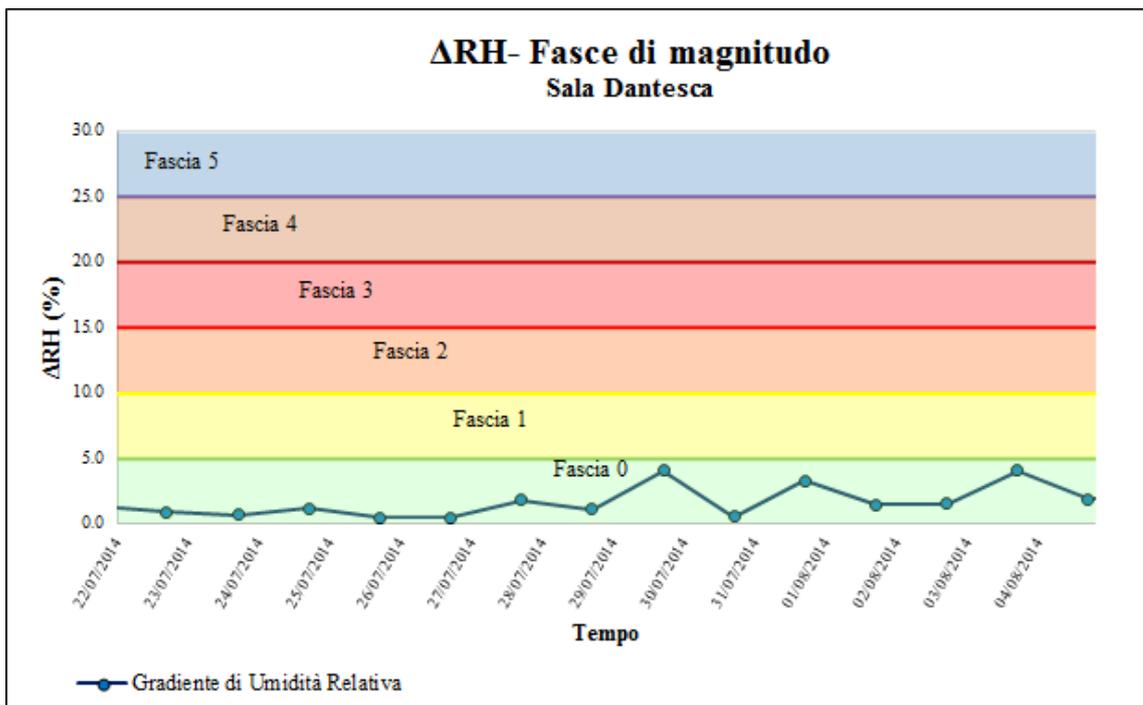


Grafico 4-53: andamento delle escursioni giornaliere di umidità relativa registrate nella Sala Dantesca e confrontati con le fasce di magnitudo.

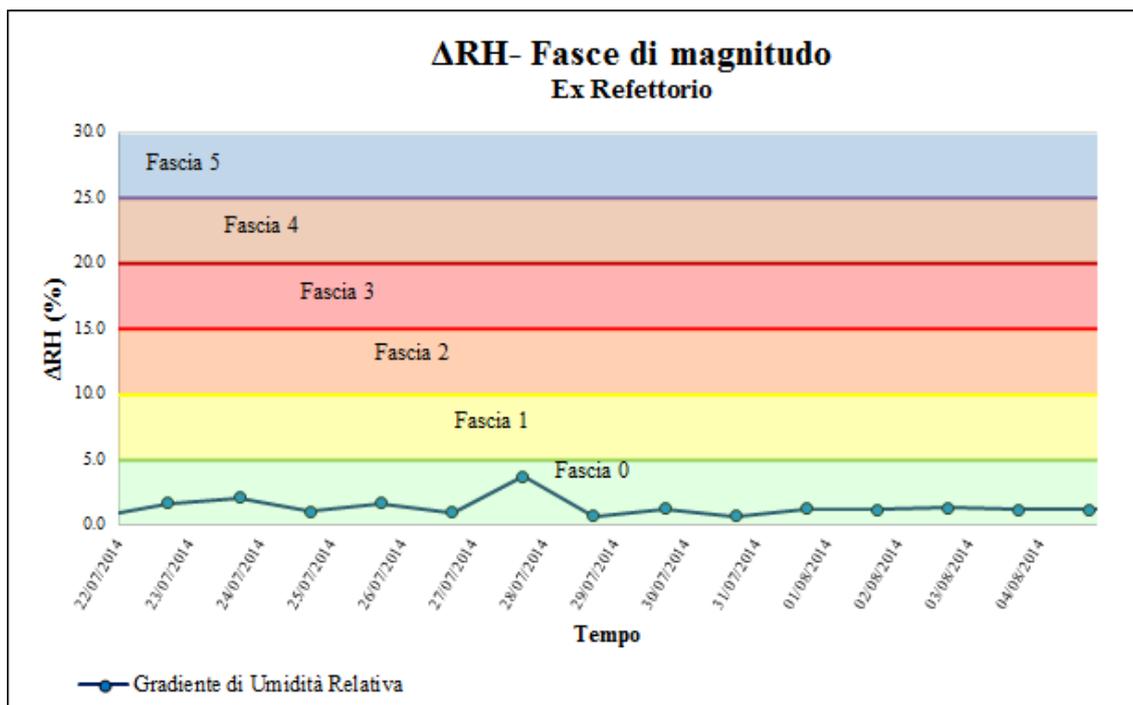


Grafico 4-54: andamento delle escursioni giornaliere di umidità relativa registrate nell'Ex Refettorio e confrontati con le fasce di magnitudo.

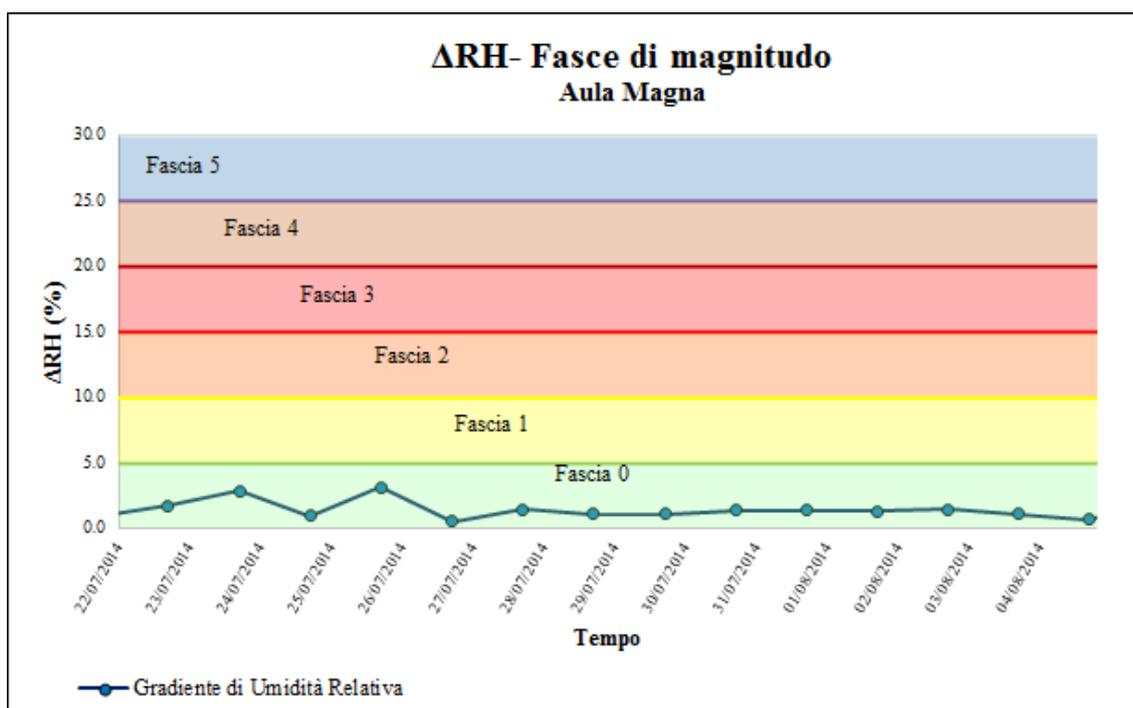


Grafico 4-55: andamento delle escursioni giornaliere di umidità relativa registrate nell'Aula Magna e confrontati con le fasce di magnitudo.

I dati mostrati nei grafici precedenti (dal Grafico 4-52 al Grafico 4-55) non evidenziano una situazione critica per le escursioni di umidità relativa, sebbene, in alcuni casi, l'umidità relativa sia, in valore assoluto, al di fuori della condizione di benessere (Ex Refettorio – Grafico 4-46).

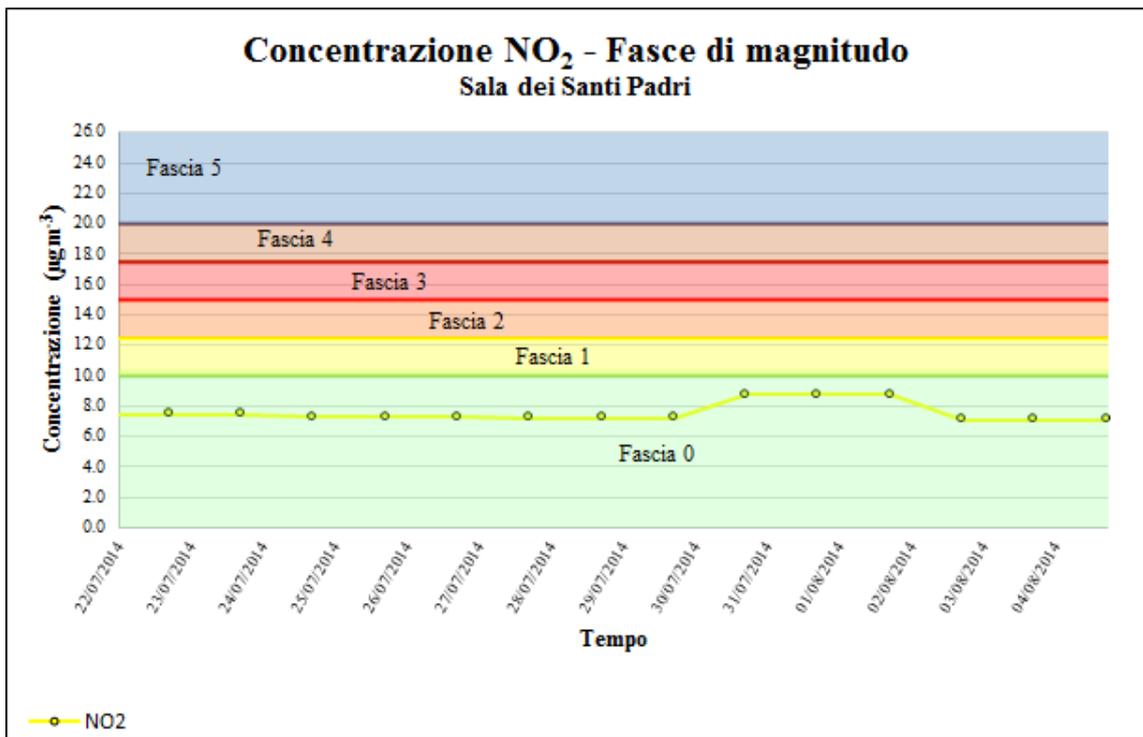


Grafico 4-56: andamento delle concentrazioni stimate di NO₂ nella Sala dei Santi Padri e confrontati con le fasce di magnitudo.

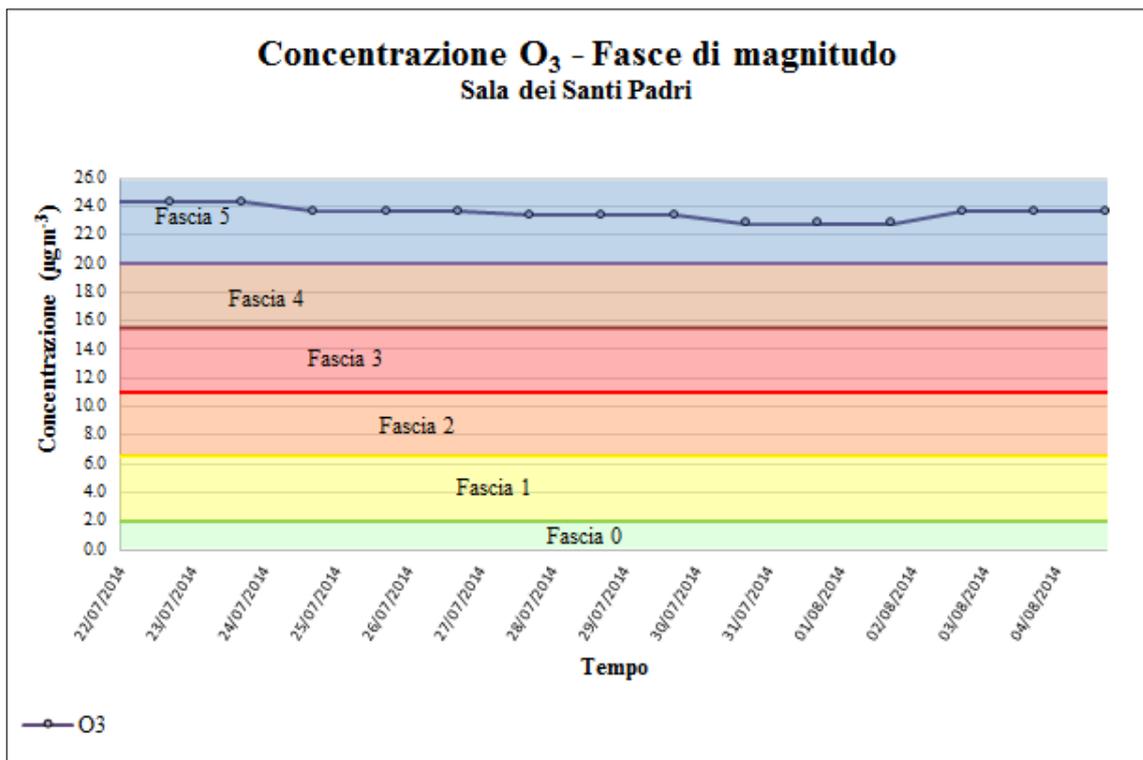


Grafico 4-57: andamento delle concentrazioni stimate di O₃ nella Sala dei Santi Padri e confrontati con le fasce di magnitudo.

Le concentrazioni stimate nella Sala dei Santi Padri mostrano livelli di accettabilità per quanto riguarda il biossido di azoto mentre, dalle misure effettuate, si evince una situazione

critica per i livelli di ozono, che si collocano sempre in fascia di magnitudo 5, producendo, quindi, un **IR3**.

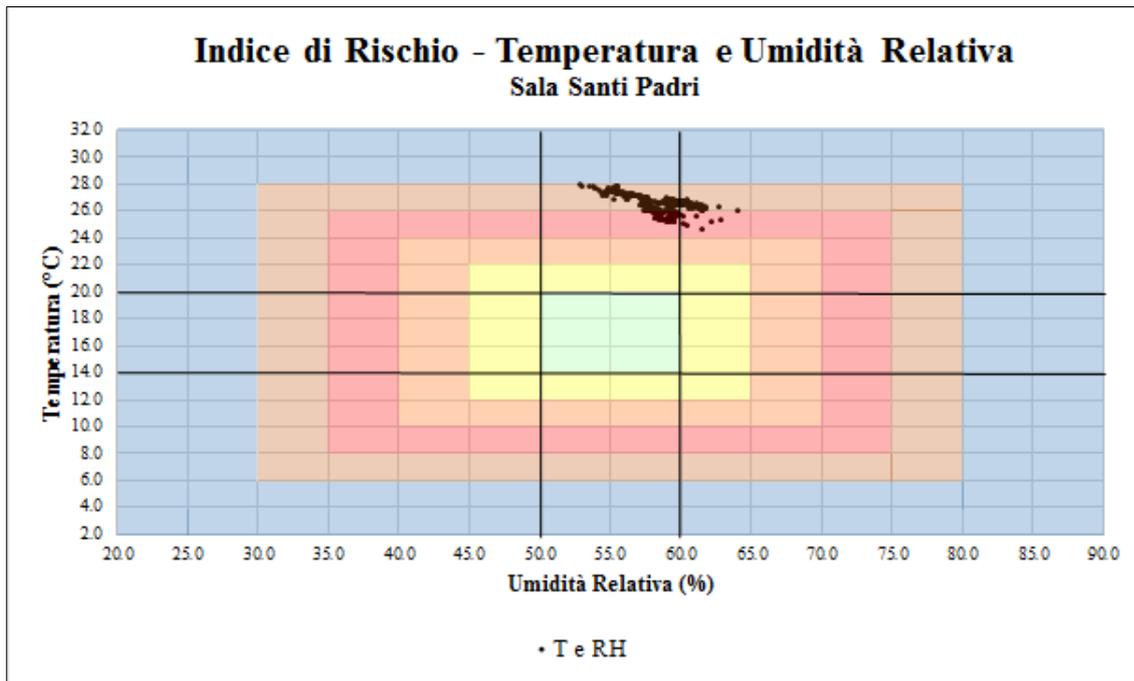


Grafico 4-58: misure di temperatura e umidità relativa registrate durante il periodo di monitoraggio e confrontate con le fasce di magnitudo per la Sala dei Santi Padri.

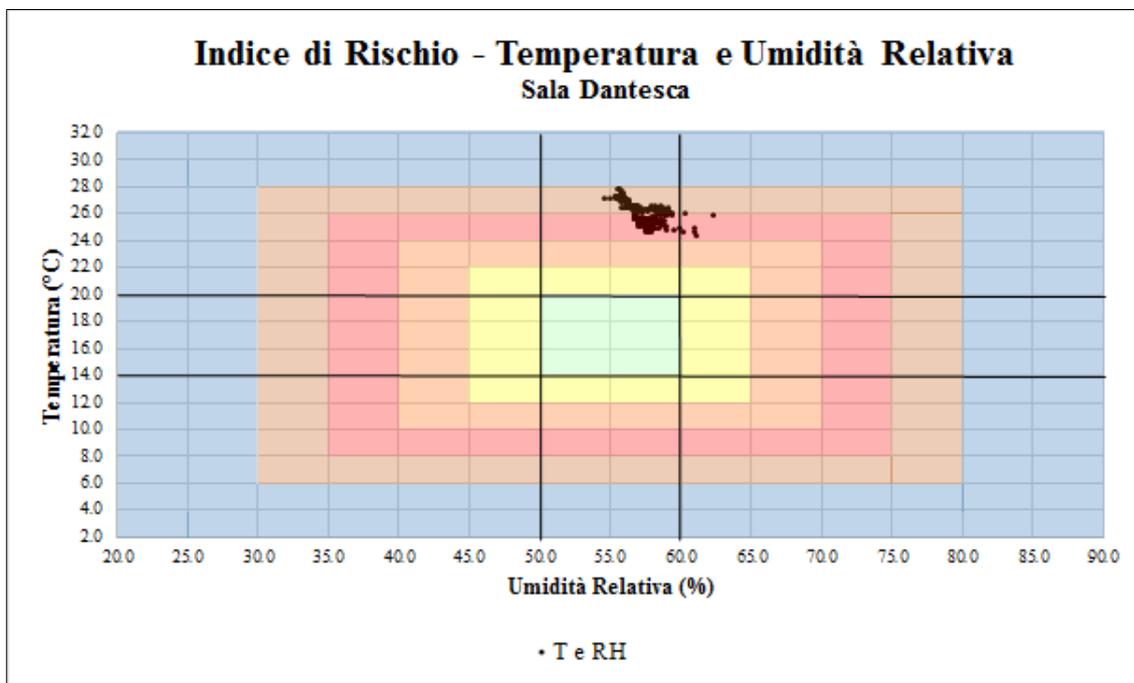


Grafico 4-59: misure di temperatura e umidità relativa registrate durante il periodo di monitoraggio e confrontate con le fasce di magnitudo per la Sala Dantesca.

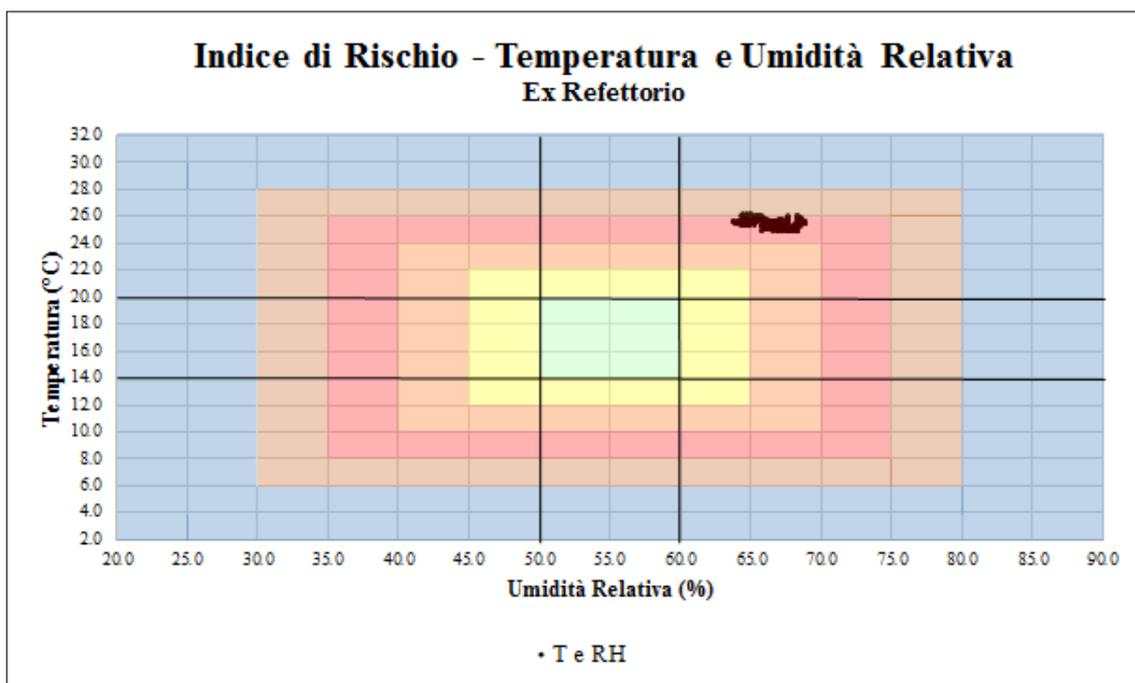


Grafico 4-60: misure di temperatura e umidità relativa registrate durante il periodo di monitoraggio e confrontate con le fasce di magnitudo per l'ex Refettorio.

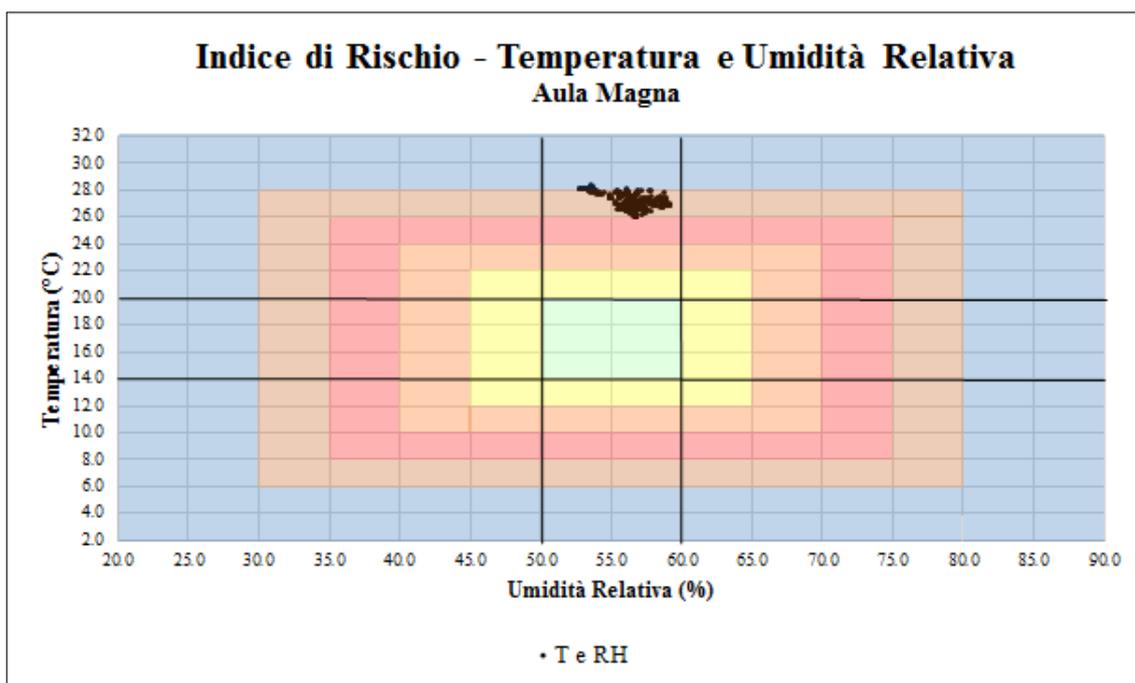


Grafico 4-61: misure di temperatura e umidità relativa registrate durante il periodo di monitoraggio e confrontate con le fasce di magnitudo per l'Aula Magna.

Le osservazioni e i commenti di questi grafici psicometrici sono ovviamente coerenti con la situazione descritta dai diagrammi, dove sono mostrati gli andamenti temporali.

Verosimilmente, infatti, nei Grafici 4-58, 4-59 e 4-61, relativi rispettivamente alla Sala dei Santi Padri, Sala Dantesca ed Aula Magna, gli scostamenti dalla situazione di benessere si registrano per la maggior parte delle osservazioni a causa della variabile temperatura che

risulta sempre superiore rispetto a quella consigliata dall'UNI. Nel caso dell'Ex Refettorio (Grafico 4-60), invece, si mostra che sia la temperatura, sia l'umidità, influiscono sulla lontananza dai parametri auspicabili per un ambiente idoneo alla conservazione.

Dall'analisi di tutti gli ambienti in esame, risultano i seguenti valori di IR_x :

Tabella 4-20: risultati degli indici di rischio ottenuti dalla metodologia di analisi di rischio proposta.

	Sala dei Santi Padri	Sala Dantesca	Ex Refettorio	Aula Magna
$(F_{\%d} \cdot M_d)_T$	20	16	18	24
IR_T	3 - Alto	3 - Alto	3 - Alto	3 - Alto
$(F_{\%d} \cdot M_d)_{RH}$	1	1	8	0
IR_{RH}	1 - Basso	1 - Basso	2 - Medio	Accett.
$(F_{\%d} \cdot M_d)_{\Delta T}$	0	0	0	0
$IR_{\Delta T}$	Accett.	Accett.	Accett.	Accett.
$(F_{\%d} \cdot M_d)_{\Delta RH}$	0	0	0	0
$IR_{\Delta RH}$	Accett.	Accett.	Accett.	Accett.
$(F_{\%d} \cdot M_d)_{NO_2}$	0	nd	nd	nd
IR_{NO_2}	Accett.			
$(F_{\%d} \cdot M_d)_{O_3}$	30	nd	nd	nd
IR_{O_3}	3 - Alto			

Esprimendo, in forma grafica, questi valori, per quanto riguarda temperatura e umidità, risulta che in tutte le sale la temperatura non si colloca nella fascia di valori ottimali. Come si evince dal Grafico 4-62, infatti, le osservazioni di IR_T si collocano tutti in zona blu (livello alto), mentre, per l'umidità, si segnala solo un livello scarso di indice di rischio eccetto un IR_{RH} per l'Ex Refettorio che si attesta al livello medio.

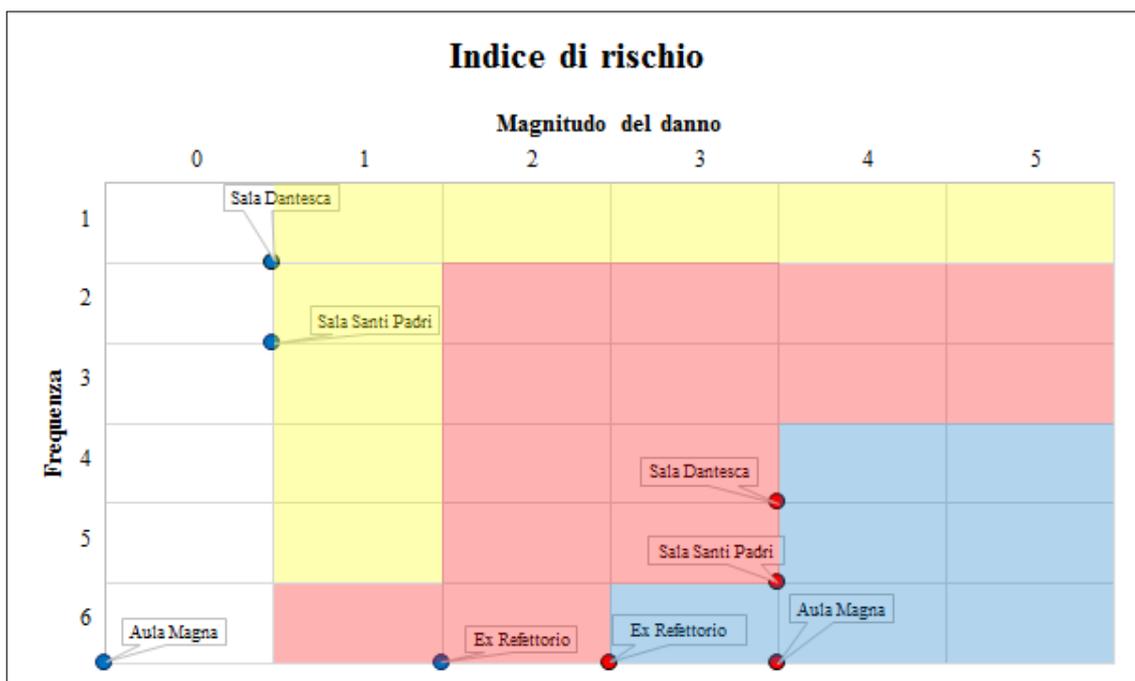


Grafico 4-62: rappresentazione degli indici di rischio relativi ad ogni classe di frequenza e fascia di magnitudo per tutti gli ambienti investigati, gli indicatori in rosso rappresentano l'indice di rischio per la temperatura, quelli in blu per l'umidità.

5. CONCLUSIONI

Questa ricerca è stata scandita da diversi passaggi di tipo logico-deduttivo: dalla descrizione dell'elemento (variabile temperatura, umidità etc.) all'approccio di descrivere il sistema nel suo complesso, tramite la proposta metodologia di valutazione del rischio. In estrema sintesi, la ricerca ci ha consentito di elaborare un'analisi microclimatica, attraverso la campagna di monitoraggio e di fornire uno strumento utile di elaborazione, valutazione della situazione in essere e presentazione degli stati chimico-fisici del sistema investigato, mediante la proposta metodologica di valutazione del rischio. Si tratta di un'analisi del rischio relativa, il cui fine principale (come tutte le analisi relative di rischio) è di mettere in evidenza se le condizioni ambientali che definiscono il microclima e la qualità dell'aria rientrano nei valori suggeriti da letteratura e/o dalle norme tecniche. Gli sviluppi futuri di questo studio possono ripercorrere diverse linee di ricerca; come, ad esempio: l'applicazione della metodologia ad altre strutture; la replica della campagna di monitoraggio in più sale della Biblioteca, per avere una visione globale dell'intera struttura, e in diversi periodi dell'anno, per descrivere un ipotetico anno tipo, lo studio di una funzione dose-risposta precisa per i manufatti esposti. In questa ricerca, la metodologia proposta è stata applicata al caso studio della Biblioteca Classense: dai risultati dell'applicazione dell'analisi del rischio si evidenzia una particolare criticità per la variabile temperatura nel periodo considerato. Dall'analisi condotta, quindi, si consiglia, ad esempio, di attuare, se possibile, provvedimenti intesi al miglioramento, soprattutto delle condizioni termiche, valutando la possibilità di installare impianti di ventilazione/condizionamento; decisione, questa, che dovrà essere, comunque, supportata da ulteriori indagini.

Non si riscontrano, tuttavia, particolari escursioni termiche, probabilmente grazie sia agli scudi o schermi applicati alle finestre e, in generale, all'elevata inerzia termica delle pareti della Biblioteca Classense. Per l'ambiente dell'Ex Refettorio sono stati applicati, cautelativamente, i criteri validi per gli ambienti di conservazione, pur non essendo, attualmente, tale sala, utilizzata specificatamente a tale scopo (bensì solo come sala di consultazione): dai risultati è emerso che si tratta di un ambiente che non risulterebbe idoneo ad un eventuale uso a scopo di conservazione per lunghi periodi, poiché caratterizzato da condizioni termogrometriche non adatte al fine conservativo, almeno per il periodo di tempo oggetto delle nostre indagini. Infine, per quanto concerne la qualità dell'aria, il livelli di NO₂ sono accettabili, per tutte le sale; mentre, l'O₃, mostra valori particolarmente elevati rispetto a quanto suggerito dalle norme tecniche di riferimento. Tuttavia, per quanto riguarda

l'ozono, essendo una valutazione basata su una stima di concentrazioni a partire da un singolo campione, si suggerisce di approfondire l'analisi.

Quanto descritto in questa ricerca ha messo in evidenza la possibilità/necessità di un'integrazione delle conoscenze in due settori disciplinari, attualmente considerati, da quasi tutti gli esperti di settore, distinti. L'ambito della conservazione delle opere d'arte, da sempre legata ad esperti umanisti o chimici per il restauro, ha vissuto, infatti, in questi ultimi anni, una rivoluzione e l'emergere di un vero e proprio nuovo paradigma, incentrato sul concetto della conservazione preventiva. Da diversi decenni ad oggi è sempre più evidente che, per un'ideale conservazione di tutti i beni, naturali e culturali, è necessaria una visione sistemica globale ed interdisciplinare. Ciò non significa che colui che cura gli aspetti microclimatici si improvvisi architetto o storico, o viceversa: è necessaria, per contro, una presa di coscienza di questi limiti attraverso collaborazioni multidisciplinari, che, attraverso l'uso delle risorse economiche/umane a disposizione, possa portare a decisioni ed azioni di intervento migliori. È in questo contesto che s'inserisce questa ricerca, anche nei suoi aspetti più innovativi: il problema legato agli ambienti di conservazione, infatti, non differisce molto, nella sostanza, da quello legato agli ambienti naturali; vi sono, invero, diversi aspetti che legano questi due settori: tra i quali primo fra tutti, si segnala il fatto che le conseguenze di scelte sbagliate, riconducibili a meri motivi economici o ad una superficiale conoscenza del sistema, minano, quotidianamente, il nostro patrimonio culturale ed ambientale e tutti i beni, molti dei quali unici o difficilmente rinnovabili, che ne fanno parte e che costituiscono, ora e per il futuro, una inestimabile fonte di ricchezza, non solo per l'Italia, ma per l'Umanità tutta.

APPENDICE

Umidità relativa (UR) o Relative Humidity (RH): esprime il grado di saturazione del vapore nell'aria e dipende sia dalla temperatura che dalla quantità di vapore presente nell'atmosfera. Poiché la saturazione dipende dalla temperatura dell'aria, l'UR indica quanto vapore è contenuto nella massa d'aria rispetto a quanto quella stessa massa d'aria, a quella temperatura, ne potrebbe contenere se resa satura. Quindi, è evidente che, se la temperatura viene mantenuta costante, all'aumentare del contenuto di vapore nell'aria si ha un aumento dell'UR. Viceversa, a contenuto di vapore costante, un aumento termico comporta una diminuzione dell'UR.

Solitamente espressa in percentuale, in condizioni costanti di temperatura e pressione, può essere definita come segue:

$$UR (\%) = \frac{UA}{US_{Sat}} * 100$$

Dove:

UA è l'Umidità Assoluta, ovvero la quantità di vapore contenuta in un metro cubo di aria [gm^{-3}].

US_{Sat} è l'Umidità di Saturazione, ossia la massima quantità di vapore acqueo che un metro cubo di aria può contenere [gm^{-3}].

Conduzione termica: cessione graduale di energia termica (calore) tra punti di un corpo a diversa temperatura o fra due corpi a contatto. Il calore fluisce per effetto di un gradiente di temperatura e l'energia è scambiata attraverso collisioni molecolari (occupazione di livelli più alti traslazionali, rotazionali e vibrazionali). L'equazione generale della conduzione termica è espressa dalla legge di Fourier, per cui il flusso di calore Q lungo l'asse x risulta:

$$q_{s,t} = -K_T \left(\frac{\delta T}{\delta x} \right)$$

Dove:

$q_{s,t}$ rappresenta il calore per unità di tempo e superficie [$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

K_T è la conduttività termica [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

Tabella Appendice-1: conduttività termica per alcuni materiali. Da (Resnick et al., 2003).

Materiale	K_T a 20 °C [W m⁻¹ K⁻¹]
Abete	0.14
Acciaio inossidabile	14
Alluminio	235
Argento	428
Aria (in quiete)	0.026
Carta e cartone	0.14 - 0.23

Convezione termica: questo tipo di trasmissione del calore è caratterizzata da un trasporto di materia, oltre che di energia, causata da gradienti di pressione e forza di gravità. E' tipica dei fluidi (esempio durante il fenomeno di trasporto di masse d'aria in atmosfera tra zone a diversa temperatura).

E' possibile distinguere tre tipologie di convezione: naturale, causata da differenze di densità dovute a differenze di temperature; forzata, dove i moti convettivi sono dovuti a cause esterne (come ventilatori, pompe) o, in generale, differenze di pressione generate fuori dal dominio di studio; mista, combinazione delle precedenti, ossia causata da differenze di densità dovute a differenze di temperatura e cause esterne.

Irraggiamento termico: questo fenomeno di trasporto di energia non necessita di mezzo per propagarsi perché avviene attraverso l'emissione di onde elettromagnetiche e dipende dalla temperatura del corpo irraggiante. La superficie di un corpo emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. L'emissione termica è quindi caratteristica di ogni corpo a temperatura superiore allo zero assoluto (-273,15 °C) ed è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura, oltre che a coefficienti direttamente correlati al corpo stesso e alla sua natura (legge di Stefan-Boltzmann).

Resistenza: grandezza fisica scalare caratteristica di ogni materiale che equivale, nel caso di corrente continua e in assenza di f.e.m., a:

$$R = \frac{\Delta\phi}{i}$$

Dove:

R è la resistenza [Ω]

$\Delta\phi$ è la differenza di potenziale [coulombm⁻¹ \equiv Volt]

i è l'intensità di corrente [coulomb s⁻¹]

Questa caratteristica dipende dalla tipologia di materiale, dalle dimensioni e dalla temperatura.

E' possibile così definire la resistività ρ , ovvero la resistenza R di un campione di quel materiale di lunghezza l e sezione (costante) S unitarie:

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

Tabella Appendice-2: resistività caratteristiche di alcuni materiali a condizioni di temperatura di 20°C.

Materiali	Resistività [Ωm]
Argento	$1.62 \cdot 10^{-8}$
Rame	$1.69 \cdot 10^{-8}$
Oro	$2.35 \cdot 10^{-8}$
Platino	$10.6 \cdot 10^{-8}$
Vetro	$10^{10} \div 10^{14}$

Dieletrico: caratteristica essenziale di un mezzo dielettrico è di essere elettricamente isolante. Se questo viene sottoposto all'azione di un campo elettrico si manifestano cariche elettriche, localizzate sulla superficie del mezzo o distribuite nel suo volume (polarizzazione).

Permittività: grandezza fisica scalare che descrive il comportamento di un dielettrico in presenza di un campo elettrico, quantifica la tendenza del materiale a contrastare l'intensità del campo elettrico. Normalmente è indicata con il simbolo ε , il suo valore viene solitamente scritto come:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

Dove:

ε_r è la permittività elettrica relativa.

ε_0 è la costante dielettrica del vuoto, in cui non vi è alcun fenomeno di polarizzazione ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$) [Fm⁻¹].

Diffusione: si tratta di un processo di trasporto di un fluido (soluti) dovuto a fenomeni di turbolenza di un altro fluido (solvente) nel quale il soluto è disciolto (diffusione turbolenta) o ad un gradiente di potenziale chimico, ovvero, di concentrazione (diffusione molecolare). In quest'ultimo caso, di interesse prevalente per la presente tesi, la *driving force* (F) del

processo di trasporto deriva da un gradiente di concentrazione e l'energia potenziale (U) associata è il potenziale chimico (μ). E' da notare che se il potenziale aumenta in una direzione, la forza è applicata in direzione opposta.

Dato che $F = -\frac{d\mu}{dx}$ e $\mu = \mu^0 + RT \ln C$ dove μ^0 è il potenziale chimico standard [kJ/mol].

Avremo:

$$F = -RT \frac{d \ln C}{dx}$$

Inoltre essendo $F - fv = 0$ dove f è il coefficiente di attrito delle molecole del soluto nel solvente e v è la velocità del processo di trasporto (ovvero la velocità netta lungo la direzione preferenziale, generalmente minore della velocità assoluta).

Per una molecola, tale per cui $\frac{R}{N_A} = k_B$, si avrà che:

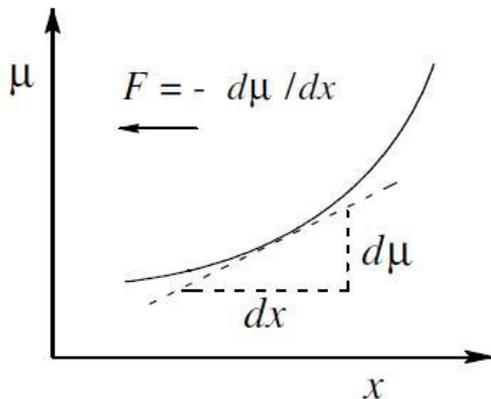
$$v = -\frac{k_B \cdot T}{fC} \cdot \left(\frac{dC}{dx}\right)$$

Questa equazione per un flusso diffusivo ($J = Cv$) diventa:

$$J = -\frac{k_B T}{f} \cdot \left(\frac{dC}{dx}\right)$$

$$J = -D \left(\frac{dC}{dx}\right) \quad 1^a \text{ legge di Fick}$$

Raggruppando $\frac{k_B T}{f}$ con il termine D abbiamo definito il coefficiente di diffusione molecolare



(o diffusività molecolare) che dimensionalmente corrisponde a $L^2 t^{-1}$. Il valore delle diffusività molecolare dipende dalla natura dei componenti e dalle proprietà chimico-fisiche del sistema. La diffusività molecolare dipende, in prima approssimazione, in maniera esplicita e diretta dalla temperatura, tramite il fattore $k_B T$; un'approssimazione successiva deve, in realtà,

tener conto del fatto che anche il coefficiente di attrito dipende da T , $f(T)$. In particolare dalla teoria cinetica dei gas si ricava che $D_k \propto \frac{T^{1.5}}{p M_k^{0.5} d_M^2}$ dove p è la pressione, M_k è il peso molecolare della specie k , e d_M è il diametro molecolare. In fase gassosa, gli ordini di grandezza del coefficiente di diffusione sono di 10^{-1} – 10 $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$, i valori maggiori propri della diffusione turbolenta.

Corpo nero: oggetto che ha una superficie perfettamente assorbente ed emittente a tutte le lunghezze d'onda della radiazione incidente. In realtà è un'astrazione, che è possibile descrivere praticamente come segue: si consideri un corpo contenente una cavità isoterma (con pareti opache alle radiazioni elettromagnetiche) sul quale vi è un foro di piccole dimensioni rispetto al diametro della cavità; il foro si comporta come un corpo nero, assorbendo completamente ogni radiazione che incida su di esso dall'esterno attraverso le riflessioni multiple che la radiazione subisce all'interno della cavità.

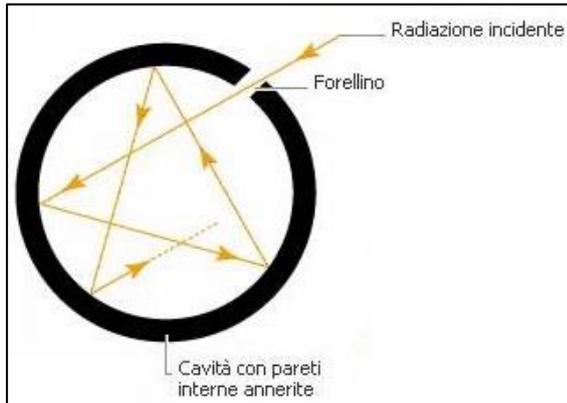


Figura Appendice-1: riproduzione schematica di un corpo nero

assorbendo completamente ogni radiazione che incida su di esso dall'esterno attraverso le riflessioni multiple che la radiazione subisce all'interno della cavità.

Gli oggetti reali non seguono la legge del corpo nero, tuttavia possono essere ragionevolmente approssimati ad esso.

Il corpo nero svolge un ruolo particolare nello studio della radiazione termica poiché la sua emittenza energetica lambda (flusso

di energia riferito all'unità di area della superficie emittente e all'unità di intervallo di lunghezza d'onda) non dipende dalla sostanza di cui è fatto né da alcuna altra caratteristica del corpo, ma soltanto dalla temperatura.

La potenza radiante emessa da un corpo nero per unità di superficie viene determinata attraverso la formula di Stefan-Boltzmann:

$$E = \sigma T^4 \quad (Wm^{-2})$$

Dove:

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ è la costante di Stefan-Boltzmann.

T è la temperatura assoluta della superficie (K).

Pertanto, la quantità totale di energia irradiata da un corpo nero, somma della radiazione emessa su tutte le lunghezze d'onda, è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta. La formula di Planck, invece, valuta la potenza radiante emessa dal corpo nero alla temperatura assoluta T per unità di superficie e per unità di lunghezza d'onda nell'intorno λ :

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \cdot 10^{-6} \quad (Wm^{-2}\mu m^{-1})$$

Dove:

E_λ è l'emittanza energetica spettrale del corpo nero alla lunghezza d'onda λ .

$h = 6.6 \cdot 10^{-34} (Js)$ è la costante di Planck.

$c = 3 \cdot 10^8 (ms^{-1})$ è la velocità della luce.

$k = 1.4 \cdot 10^{-23} (JK^{-1})$ è la costante di Boltzmann.

T è la temperatura assoluta del corpo nero.

La formula di Planck può essere rappresentata anche graficamente come una famiglia di curve (figura 6.2), per cui l'emittanza spettrale è zero per $\lambda = 0$, successivamente aumenta rapidamente fino a raggiungere il massimo in corrispondenza di λ_{max} e, dopo averla raggiunta, si avvicina nuovamente a zero per lunghezze d'onda elevate.

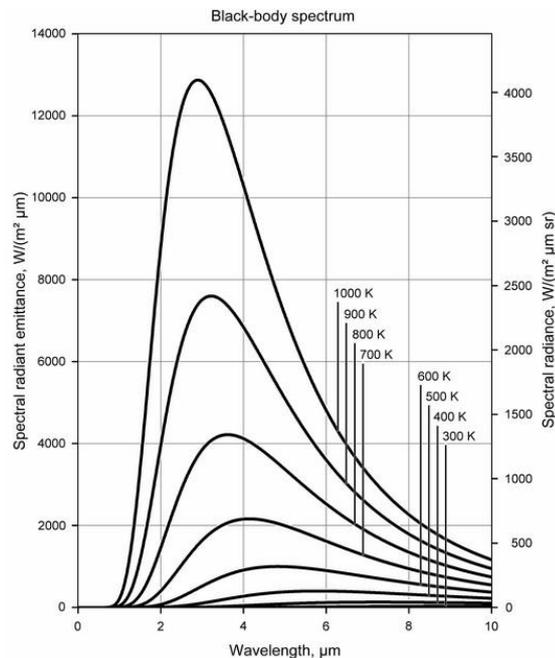


Figura Appendice-2: emittanza energetica spettrale di un corpo nero rappresentata per diverse temperature assolute.

In particolare, la lunghezza d'onda alla quale si verifica il massimo della curva per una determinata temperatura è data dalla legge di spostamento di Wien per cui:

$$T\lambda_{max} = b$$

Dove:

$$b = 2897.8 (\mu mK).$$

T è la temperatura assoluta (K).

λ_{max} è la lunghezza d'onda per la quale è massima la radiazione emessa dal corpo nero.

Tale legge spiega come, all'aumentare della temperatura, il massimo di emissione si sposti verso lunghezze d'onda più piccole e quindi con energie maggiori.

Emissività: Definiamo innanzitutto il potere emissivo di un corpo $e(\lambda, T)$ come la quantità di energia emessa per unità di tempo e di superficie, alla temperatura T e nell'intervallo di lunghezza d'onda $\lambda + \Delta\lambda$.

Per la legge di Kirchhoff, in un sistema in equilibrio termodinamico, il rapporto tra potere emissivo, $e(\lambda, T)$, e il coefficiente di assorbimento α è funzione soltanto della lunghezza d'onda e della temperatura, ma non della natura chimico-fisica della sostanza.

$$\frac{e(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = E(\lambda, T)$$

Nel caso di un corpo nero, per cui $\alpha = 1$, il rapporto fra il potere emissivo e il coefficiente di assorbimento coincide con il potere emissivo del corpo stesso.

Si definisce emissività $\varepsilon(\lambda, T)$ di un corpo reale il rapporto tra potere emissivo del corpo stesso e quello del corpo nero alla stessa temperatura.

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{e(\lambda, T)}{E(\lambda, T)} = \alpha(\lambda, T)$$

Per questo motivo il fattore di emissione, ε , di un corpo è uguale a quello di assorbimento α : in condizioni di equilibrio termico quindi, l'energia assorbita ed emessa da un corpo si eguagliano.

Effetto Joule: fenomeno per cui il passaggio di corrente elettrica attraverso un conduttore è accompagnato dallo sviluppo di calore. In generale, la potenza (P) dissipata da un resistore percorso da corrente con intensità (I) a cui estremi è applicata una differenza di potenziale (ΔV) equivale a $P = \Delta VI$. Dalla prima legge di Ohm $\Delta V = RI$, la potenza si può, quindi, scrivere come:

$$P = RI^2$$

La quantità di energia elettrica che viene trasferita al resistore nell'intervallo di tempo Δt è così pari a $P = RI^2\Delta t$. Se tutta questa energia viene trasferita in calore, si ricava la quantità di calore Q prodotto da un conduttore di resistenza R attraversato da una corrente I , nell'intervallo di tempo Δt :

$$Q = RI^2\Delta t$$

Il calore prodotto per effetto Joule è, quindi, direttamente proporzionale alla resistenza del conduttore ed al quadrato dell'intensità della corrente che lo attraversa.

Curva di calibrazione: descrive la relazione tra il segnale analitico (S) in funzione della quantità (q) o concentrazione (C) di analita e viene ottenuta misurando standard a quantità nota di analita.

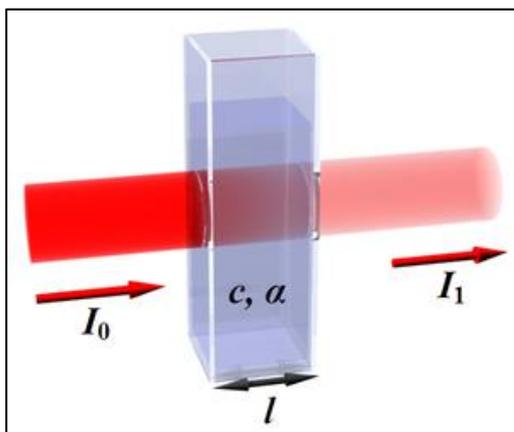


Figura Appendice-3: modello rappresentativo della legge di Lambert e Beer.

In questo lavoro di ricerca, il segnale misurato corrisponde all'assorbanza di una soluzione letta tramite spettrofotometro a 540 nm e l'analita è l' NO_2^- . In particolare, per poter elaborare la curva di calibrazione presso i laboratori del C.I.R.S.A., ci siamo attenuti al protocollo fornito dalla ditta produttrice. Alla base di questa e molte altre applicazioni della spettrofotometria, in chimica

analitica, vi è la relazione empirica nota come legge di Lambert e Beer. Tale legge correla la

quantità di luce assorbita da una sostanza con la sua concentrazione, con la sua natura chimica e con lo spessore del mezzo attraversato. Ipotizziamo che una luce ad una determinata lunghezza d'onda λ colpisca una soluzione contenuta all'interno di una cuvetta (di quarzo o di vetro, ad esempio). Quando una radiazione luminosa incide su un mezzo trasparente con intensità I_0 , in parte riflette, in parte si rifrange nel mezzo. L'intensità della rifrazione diminuisce col propagarsi della radiazione, per cui all'uscita si osserva un'intensità I inferiore. Il rapporto I/I_0 è definito trasmittanza (T) complessiva del mezzo; il logaritmo in base 10 del reciproco è detto assorbanza.

$$A = \log_{10} \frac{1}{T} = \log_{10} \frac{I_0}{I}$$

La legge di Lambert e Beer stabilisce una proporzionalità diretta tra assorbanza (A), concentrazione della specie adsorbente (C) e cammino della luce attraverso la soluzione (l), tenendo conto che il coefficiente di estinzione molare (ϵ_λ) è dato da:

$$A = \epsilon_\lambda C l$$

Il valore di ϵ_λ viene assunto costante per una certa sostanza ad una data lunghezza d'onda. La legge mostra una relazione lineare che, invero, si verifica solo in intervalli ristretti di concentrazione.

Per questa ricerca, tramite spettrofotometro a doppio raggio Jasco V-650 è stata misurata l'assorbanza di soluzioni a titolo noto: questi punti sperimentali sono rappresentati su un grafico cartesiano ponendo in ascissa la concentrazione e in ordinata l'assorbanza. La retta che meglio approssima la dispersione dei punti corrisponde alla retta di calibrazione. A questo punto, sono state lette le assorbanze delle soluzioni ottenute dai campionatori di NO_2 , opportunamente preparate. Dalla relazione della retta di calibrazione, viene determinata la concentrazione ignota della soluzione, conoscendone l'assorbanza. Di seguito si riporta la

retta di calibrazione ottenuta e i due punti ottenuti dai valori di assorbanza dei campioni analizzati.

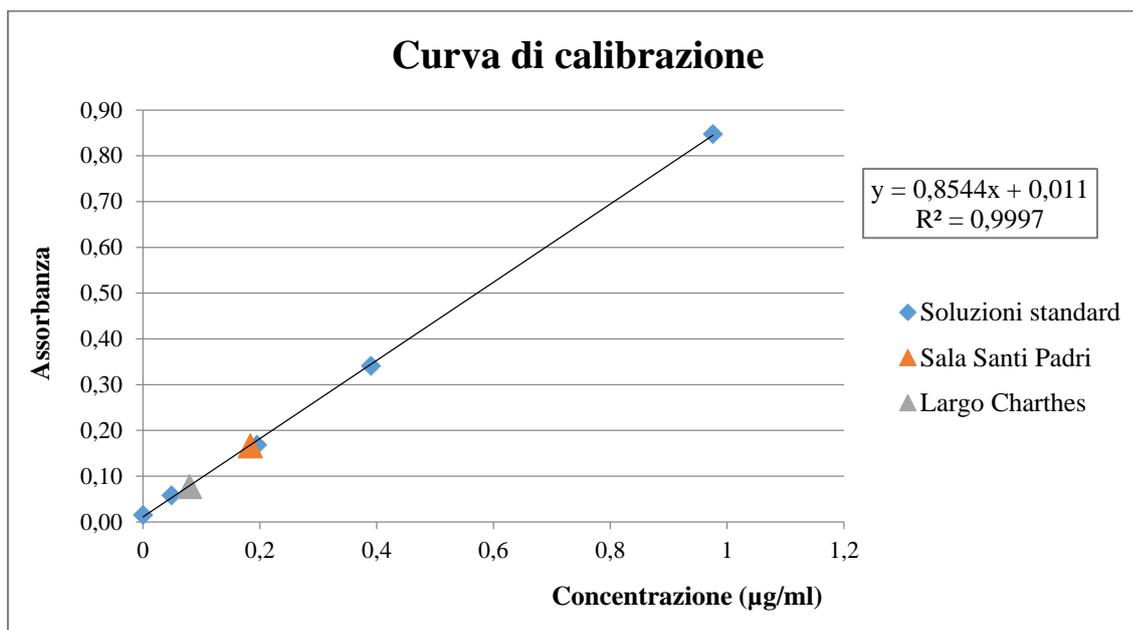


Grafico Appendice-1: curva di calibrazione ottenuta dall'analisi delle soluzioni standard.

Stabilità atmosferica: l'atmosfera possiede caratteristiche variabili nel tempo e nello spazio. Nella prima porzione dell'atmosfera (troposfera), domina il meccanismo della convezione. Gli scambi di calore tra la superficie terrestre e lo strato limite atmosferico, in cui si generano moti convettivi, portano ad una diminuzione della temperatura all'aumentare della quota. Tramite i moti convettivi, che si formano per cessione di calore dalla superficie terrestre (riscaldatasi per assorbimento della radiazione) al *Planetary Boundary Layer*, il calore viene spostato verso l'alto. I fenomeni di seguito descritti avvengono nel PBL, ovvero quella porzione dell'atmosfera nella quale si risente dell'influenza della superficie terrestre: in prossimità del suolo, per le condizioni al contorno imposte dalla presenza della stessa superficie terrestre, gli effetti della viscosità determinano una variazione del profilo di velocità del vento rispetto ad una condizione teorica di flusso non viscoso. Si noti, comunque, che lo spessore del PBL è variabile nello spazio e nel tempo. In questa porzione si verificano moti convettivi per cui, ad esempio, un volume generico di gas, spostandosi verso l'alto (a minore pressione) si espande e quindi si raffredda: trattandosi di uno spostamento rapido rispetto ai tempi caratteristici di trasmissione del calore nell'atmosfera, da un punto di vista termodinamico, questa trasformazione può essere considerata adiabatica. Ipotizzando uno spostamento verso l'alto di un volume generico di aria, questo può venire a trovarsi in diverse condizioni, a seconda del gradiente verticale di temperatura:

- Strato limite subadiabatico: il volume si trova ad una temperatura minore di quella dell'aria circostante (poiché il gradiente adiabatico caratteristico del volume è maggiore di quello dell'aria circostante); quindi, raggiungendo immediatamente l'equilibrio con la pressione, avrà una densità maggiore, che tenderà a spostarlo verso il basso, ritornando nella sua posizione originaria;
- Strato limite adiabatico: il volume di aria in esame e l'aria circostante sono alla stessa temperatura (i due rispettivi gradienti termici corrispondono); pertanto, il volume si troverà in equilibrio e rimarrà nella sua nuova posizione;
- Strato limite superadiabatico: il volume di aria è ad una temperatura maggiore rispetto a quella dell'aria circostante (il gradiente adiabatico del volume è inferiore a quello del fluido circostante); perciò il volume avrà una densità minore che lo sposterà ulteriormente verso l'alto;

Definendo a questo punto tre possibili condizioni di stabilità:

- Un sistema si definisce *stabile* se, allontanato da una forzante dal suo stato originario, tende a tornare nella condizione iniziale;
- Un sistema è detto *instabile* se, allontanato da una perturbazione dal suo stato originario, tende ad allontanarsi ulteriormente dalla condizione iniziale;
- Un sistema è in condizioni di *stabilità neutra* se, allontanato dal suo stato originario, tende a rimanere nella sua nuova condizione.

La stabilità atmosferica è un indicatore della turbolenza atmosferica, per la quale si verifica rimescolamento e diffusione degli inquinanti nel PBL. La struttura del campo di moto di un fluido nel PBL è caratterizzato da una notevole variabilità nello spazio e nel tempo. In generale, è definito da una componente di trasporto e di dispersione turbolenta, che tengono conto, rispettivamente, delle caratteristiche medie e le oscillazioni attorno al valore medio. In sintesi, il trasporto domina soprattutto i moti lungo l'asse x e sono determinati dalla conoscenze del campo di vento; la dispersione, invece, ha un'incidenza maggiore sui processi verticali del fluido causati da riscaldamento della superficie terrestre (turbolenza convettiva) e dalla rugosità della superficie stessa (turbolenza meccanica).

Per stimare la stabilità atmosferica spesso viene utilizzata la classificazione di Pasquill-Gifford, che esprime la classe di stabilità in funzione della velocità del vento, della radiazione solare totale e della copertura nuvolosa o del gradiente verticale di temperatura. In particolare, questa classificazione prevede sette classi di stabilità:

Tabella Appendice-3: classi di stabilità atmosferica secondo la classificazione di Pasquill-Gifford.

Classe di stabilità	Descrizione
A	Molto instabile
B	Instabile
C	Leggermente instabile
D	Neutra
E	Leggermente stabile
F	Stabile
G	Molto stabile

Tabella Appendice-4: condizioni per le classi di stabilità atmosferica.

Intensità del vento (m/s)	Radiazione solare			Copertura nuvolosa	
	Forte	Media	Debole	≥ 50 %	< 50%
Calma	-	-	-	-	G
< 2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	B	E	F
3-5	B	B-C	C	E	F
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Lo spessore dello strato di confine planetario ha una dimensione variabile e segue un ciclo giornalieri di irraggiamento solare, oltre che stagionale. Appare evidente come le condizioni di stabilità atmosferica influenzino fortemente la dispersione degli inquinanti in atmosfera, motivo per cui è importante conoscere il loro andamento.

NOAEL e LOAEL per i beni culturali: si tratta dei concetti noti in diversi ambiti scientifici, come la tossicologia, per cui sono identificati due livelli, il No e il *Lowest Observed Adverse Effect Levels* (NOAEL e LOAEL) delle forzanti ambientali che circondano i bersagli in esame. Il degrado di un manufatto è una funzione complessa, che dipende dalla natura degli oggetti, dai livelli di specifici inquinanti gassosi, particolato,

temperatura, umidità, illuminamento etc. Esso deve quindi essere contestualizzato in termini di concentrazione e dose. Ne consegue che la concentrazione moltiplicata per un periodo temporale definisce la dose, per cui $LOAEL \times tempo = LOAED$. Sulla base di questa considerazione, il LOEL può essere definito come il livello più elevato di inquinante per cui non risulta alcun effetto avverso osservabile in un specifico set-up sperimentale (metodi analitico, tempo di esposizione, temperatura, umidità costanti etc.). A tal proposito, Tétreault definisce l'effetto avverso come il primo cambiamento visivamente percepibile, inteso in termini di caratteristiche chimiche o fisiche indesiderabili del materiale in esame. Il NOAEL è il livello immediatamente al di sotto della concentrazione alla quale viene riscontrato un effetto avverso (ossia il LOAEL). Il periodo di esposizione critico è il tempo richiesto per osservare l'effetto avverso. Per determinare il NOAEL e il LOAED, il complesso processo di degrado è semplificato per l'inquinante più abbondante (o dannoso) che mostra il maggior effetto sul tasso di deterioramenti e gli altri parametri, come la temperatura e l'umidità relativa, sono tenuti costanti. Pertanto, questi concetti possono essere utilizzati nel caso in cui le condizioni ambientali siano ben definite e stabili. I livelli di NOAEL e LOAED dovrebbero essere determinati per ciascuna combinazione di parametri ambientali (temperatura, umidità relativa, illuminamento e natura dell'oggetto). La tabella seguente (Tabella 6-5) mostra la concentrazione massima ammissibile per ogni inquinante chiave presente nell'aria per cui non dovrebbero essere evidenti effetti avversi per la maggior parte dei materiali per il periodo di esposizione indicato.

Tabella Appendice-5: obiettivi di qualità dell'aria per musei, librerie e gallerie e archivi per NO₂, SO₂ e O₃. Questi target sono basati sul LOAED, assumendo che l'umidità relativa media sia mantenuta tra il 50 e il 60% e la temperatura tra il 20 e i 30 °C. Da (Tétreault, 2003), modificata.

Inquinanti chiave	Livello massimo di concentrazione in funzione dell'obiettivo di conservazione indicato ($\mu\text{g m}^{-3}$)		
	1 anno	10 anni	100 anni
NO ₂	10	1	0.1
O ₃	10	1	0.1
SO ₂	10	1	0.1

Queste concentrazioni sono stati raggruppati in tre gradi o obiettivi di conservazione: 1, 10 e 100 anni. Il target suggerito a 100 anni corrisponde al più alto grado di conservazione e indica che la maggior parte degli oggetti non dovrebbero mostrare effetti negativi per 100 anni, se questi sono esposti al livello massimo consentito per ciascuna colonna (Tétreault, 2003), sebbene, invero, possa sembrare poco realistico raggiungere le concentrazioni indicate con l'obiettivo di concentrazione di 100 anni (Menart et al., 2011).

BIBLIOGRAFIA

- AAM (American Association of Museum), (1977). Protection of collection during energy emergencies. *Energy Workshop Planning Commitee*. 29 settembre 1977.
- Aghemo, C., Filippi, M., Prato, E. (1996). Condizioni ambientali per la conservazione dei beni culturali di interesse storico e artistico: ricerca bibliografica comparata. Comitato Giorgio Rota, pg.167.
- Aglietto, I. (1999). L'analisi di rischio di siti contaminati come strumento decisionale per gli interventi di bonifica. *L'ambiente*, 3, 27-30.
- Alfano, G., D'Ambrosio, F., Riccio, G. (2003). La misura della CO₂ per valutare l'IAQ. Sistemi e impianti per il controllo della qualità dell'aria e dell'umidità. AICARR. Napoli.
- Alfano, G., D'Ambrosio, F., Liotti, F., Peduto, M., Perrotta, A., Riccio, G. (2005). La qualità dell'aria interna e i cancerogeni. In L. Palmieri, *Manuale di medicina legale*.
- Andretta, M. (2013). Some considerations on the definition of risk based on concepts of systems theory and probability. *Risk Analysis*, 1-12.
- Andretta, M., Compiani, M., Serra, R., Zanarini, G. (1986). Introduction to the physics of complex system: the mesoscopic approach to fluctuations, non linearity and self organization. Pergamon Press, pg. 222.
- ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente), (2002). Analisi di rischio ecologico per il risanamento dei siti contaminati: quadro internazionale e sviluppo di linee guida in ambito nazionale. A cura di: Quercia, F., Marcanini, A., Critto, A., Carlon, C., pg.112.
- APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici), (2008). Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati, 1-156.
- ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente), (2013). Rapporto sulla qualità dell'aria della Provincia di Ravenna. Servizio Sistemi Ambientali, Sezione Provinciale di Ravenna. Ed. giugno 2014, pg. 92.
- ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente) (2009). Relazione sulla qualità dell'aria - Campagna di monitoraggio 2008 con campionatori passivi per la determinazione di benzene e biossido di azoto in ambito urbano. Servizio Sistemi Ambientali, Sezione Provinciale di Forlì-Cesena, pg. 18.
- AS/NZS ISO 31000 (2009). Risk Management - Principles and guidelines, 1-27
- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), (1971). Guide and data book applications.

- Bachmann. (1975). La conservation durant les expositions temporaires. Centre International pour la Conservation - ICCROM. Roma.
- Beaumont, L. B. (1983). La planification des musees. Musees National du Canada. Ed. par B.Lord.
- Benoist, L. (1960). *Musée et Muséologie*. Presses Universitaires de France. Paris, pg. 127.
- Bernardi, A. (1995). Aspetti metodologici per il controllo del microclima nei musei: individuazione delle cause di alterazione e soluzioni possibili. In G. Lippi, Ambiente, Città e Museo. Nardini editore, 99-119
- Bernardi, A. (2004). Conservare opere d'arte - Il microclima negli ambienti museali. Il Prato, pg. 140.
- Blades, N. (1996). Nitrogen dioxide and sulphur dioxide measurements at the British Library and National Library of Wales, 1995-1996. In Deterioration and Conservation of Vegetable Tanned Leather. Environmental Leather Project. Research Report 6. The Royal Danish Academy of Fine Arts, 23-31.
- Blades, N., Cassar, M., Oreszczyn, T., & Croxford, B. (2000). Preventive conservation strategies for sustainable urban pollution control in museum. Tradition and Innovation, advances in conservation, contributions to the IIC Melbourne Congress. International Institute for Conservation, 24-28.
- Brawne, M. (1983). Spazi interni del museo. Ed. di Comunità. Milano:
- Brimblecombe, P. (1975). Industrial air pollution in the thirteen-century Britain. *Weather*, 30, 388-396.
- Brimblecombe, P. (1996). *Air, composition and chemistry*. Cambridge University Press.
- Brimblecombe, P., Blades, N., Camuffo, D., Sturaro, G., Valentino, A., Gysels, K., Van Grieken, R., Busse, H.J., Kim, O., Ulrych, U., Wieser, M. (1999). The indoor environment of a modern museum building, the Sainsbury Centre for Visual Arts, Norwich. *Indoor Air*, 3, 146-164.
- Brown, R. (2000). Monitoring the ambient environment with diffusive samplers: theory and practical consideration. *Journal of Environmental Monitoring*, 2, 1-9.
- BSI (British Standard Institution) (1977). Draft British standard recommendation for the storage and exhibition of documents.
- Cacace, C., Caneva, G., Gallo, F., Georgiadis, T., Valenti, P. (2003). Measurement of environmental physical parameters. In P. Mandrioli, G. Caneva, C. Sabbioni, Cultural Heritage and Aerobiology. Kluwer Academic Publishers, 47-79
- Camuffo, D. (1981). Indoor Dynamic Climatology: Investigation on the interaction between walls and indoor environment. *Atmospheric Environment*, 17, 1803-1809.

- Camuffo, D. (1998). *Microclimate for cultural heritage*. Elsevier, pg. 415.
- Camuffo, D., Bernardi, A. (1986). *Dinamica del microclima e scambi termoisometrici tra pareti e atmosfera interna nella Cappella Sistina*. *Bollettino Monumenti Musei e Gallerie Pontificie*, IV, 211-257.
- Camuffo, D., Bernardi, A. (1995). *The Microclimate of the Sistine Chapel*. Joint edition *Bollettino Geofisico and European Cultural Heritage Newsletter on Research*, 9, 7-32.
- Camuffo, D., Brimblecombe, P., Van Grieken, R., Busse, H., Sturaro, G., Valentino, A., Bernardi, A., Blades, N., Shooter, D., De Bock, L., Gysels, K., Wieser, M., Kim, O. (1999). *Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy*. *The Science of the Total Environment*, 236, 135-152.
- Camuffo, D., Van Grieken, R., Busse, H.J., Sturaro, G., Valentino, A., Bernardi, A., Blades, N., Shooter, D., Gysels, K., Deutsch, F., Wieser, M., Kim, O., Ulrych, U. (2001). *Environmental monitoring in four European museums*. *Atmospheric Environment*, 35, 127-140.
- Cape, J.N. (2009) *Review of the use of passive diffusion tubes for measuring concentrations of nitrogen dioxide in air*. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 39, 289-310.
- Cass, G., Druzik, J., Grosjean, D., Nazaroff, W., Whitmore, P., Wittman, C. (1988). *Protection of Works of Art from Photochemical Smog*. *The Getty Conservation Institute Scientific Program*, 183-227.
- Cass, G., Druzik, J., Grosjean, D., Nazaroff, W., Whitmore, P., Wittman, C. (1989). *Protection of Works of Art from Atmospheric Ozone*. *Research in Conservation*, 5, pg.94.
- Cassar, M., Blades, N., & Oreszczyn, T. (1999). *Air pollution levels in air-conditioned and naturally ventilated museum: a pilot study*. In *ICOM Committee for Conservation, 12th Triennial Meeting*. James & James, 31-37.
- CCI (Canadian Conservation Institute), (1994). *Framework for Preservation of Museum Collections*.
- CEE (Commissione Comunità Europea), (2012). *Regolamento UE n.1025/2012 del Parlamento Europeo e del Consiglio*, 25 ottobre 2012.
- Chapman, P. (1990). *The sediment quality triad approach to determining pollution-induced degradation*. *Science of The Total Environment*, 97-98, 815-825.
- Conferenza Stato-Regioni. (2001). *Linee guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati*. *Accordo tra il Ministero della Salute, le Regioni e le Province autonome*. G.U. n.276 del 27/11/2001.

- Confessore, G. (2010). Analisi del rischio. Enciclopedia Italiana Treccani. Tratto il giorno settembre 2014 da [http://www.treccani.it/enciclopedia/analisi-del-rischio_\(XXI_Secolo\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/analisi-del-rischio_(XXI_Secolo)/)
- Constain, C., (1994). Framework for the Preservation of Museum Collection. In CCI Newletters, 14, 1-4.
- Cook, I. (1973). Conservation technology for library and archive. Proceeding of National Seminar on the Conservation of Cultural Material, pg. 280.
- Corgnati, S. P., Fabi, V., Filippi, M. (2009). A methodology for microclimatic quality evaluation in museums: Application to a temporary exhibit. Building and Environment, 44, 1253-1260.
- Cox, R.M., (2003). The use of passive sampling to monitor forest exposure to O₃, NO₂ and SO₂: a review and some case of studies. Environmental Pollution, 126, 301-311.
- D'Agostino, V. (2005). La qualità dell'aria negli ambienti museali. Tesi di dottorato. DETEC - Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Dassu, G. (1988). Appunti per il corso di perfezionamento in archeologia e restauro architettonico. Lo studio per l'ambiente, pg.12.
- Davies, T., Ramer, B., Kaspyzok, G., A.C., D. (1984). Indoor/Outdoor ozone concentrations at a contemporary art gallery. Journal of the air pollution control association, 31, 135-137.
- de Guichen, G. (1984). Climate in Museum: measurement. ICCROM, pg. 68.
- de Guichen, G., de Tapol, B. (1998). Climate control in museum. ICCROM, pg. 57.
- De Santis, F., Di Palo, V., Allegrini, I. (1992). Determination of some atmospheric pollutants inside a museum: relationship with the concentration outside. The Science of the Total Environment, 127, 221-223.
- De Santis, F., Allegrini, I., Fazio, M.C., Pasella, D. (1996) Characterization of indoor air quality in the Church of San Luigi dei Francesi, Rome, Italy. International of Environmental Analytical Chemistry, 64, 71-81.
- De Santis, Bellagotti, Vichi, Allegroni. (2005). Campionamento diffusivo e qualità dell'aria nella diagnostica dei monumenti. Workshop Monitoraggio e conservazione programmata. Nardini.
- Delta Ohm Srl. (2014). Manuale d'istruzione HD9221.
- Domini, D. (1991). La Biblioteca Classense. In G. Roversi, V. Montari, Le grandi biblioteche dell'Emilia-Romagna e del Montefeltro - I tesori di carta. Grafis, p. 207-225.

- Domini, D., Giuliani, C., Poggiali, D. (2011). Nuova Classense: il luogo dei legami tra antico e moderno. Riorganizzazione degli spazi architettonici e dei servizi della Biblioteca Classense di Ravenna. Istituzione Biblioteca Classense, pg. 47.
- Druzic, J., Adams, M., Tiller, C., Cass, G. (1990). The measurement and model predictions of indoor ozone concentration in museum. *Atmospheric environment*, 24, 1813-1823.
- Eastlake, C., Faraday, M., Russell, W. (1853). Report of the Commission Appointed to inquire into the state of the pictures in the National Gallery. Report from Select Committee on the Nation Gallery, 15, 75-77.
- EPA (Environmental Protection Agency), (1984). Risk Assessment and Management: Framework for Decision Making.
- EPA (Environmental Protection Agency), (1992). Framework for Ecological Risk Assessment.
- EPA (Environmental Protection Agency), (1998). Guidelines for Ecological Risk Assessment, 1-124.
- ERCO, (1985). Ludenscheid W. Germany.
- Fabbri, P. (1981). L'Escoriale de Camaldolesi. In D. Domini, *Cultura e vita civile a Ravenna: secoli XVI - XX*. Università di Bologna, 27-94.
- Felli, A., Benvegù, F. (1993). Analisi di rischio per la definizione della lista di priorità di interventi nella bonifica di siti contaminati. Siti contaminati: procedure di controllo e bonifica. Bologna, p. 171-177.
- Flieder, F., Duchenein, M. (1985). Livres et documents d'archives: sauvegarde et conservation. UNESCO, pg. 29.
- Fracastoro, G. (1997). Qualità dell'aria. In G. Alfano, M. Filippi, E. Sacchi, *Impianti di climatizzazione per l'edilizia*, Masson, 46-65.
- G.S.I.S.R (Gruppo Scientifico Italiano Studi e Ricerche), (2011). Risk Assessment: metodi di valutazione per l'ambiente e per l'uomo.
- Gambalunga, A. (1989). Microclima: più informazioni, più sicurezza. *Beni Culturali*, pg. 46.
- Gerboles, M., Buzica, D., Amantini, L., Friedrich, L. (2006). Laboratory and field comparison of measurements obtained using the available diffusive samplers for ozone and nitrogen dioxide in ambient air. *Journal of Environmental Monitoring*, 8, 112-119.
- Ginell, W. S. (1994). The nature of changes caused by physical factors. In *Durability and Change: the science, responsibility, and cost of sustaining cultural heritage*, 81-94.
- Giuliani, C. (2001). La Biblioteca Classense. I fondi speciali. L'Ottocento. In *Classense* Longo Editore, 56-80.

- Gorecki, T., Namiesnik, J. (2002). Passive sampling. *Trends in Analytical Chemistry*, 21, 276-291.
- Grinzato, E., Bison, P.G., Marinetti, S., (2002). Monitoring of ancient buildings by thermal method. *Journal of Cultural Heritage*, 3, 21-29.
- Hackney, S. (1984). The distribution of gaseous air pollution within museums. *Studies in conservation*, 29, 105-116.
- Haines, Y. (2009, december). On the complex definition of risk: a systems based approach. *Risk Analysis*, 29, 1647-1654.
- Haugarten, M., Kirchner, M., Werner, H. Evaluation of Passive Methods for Measuring Ozone in the European Alps. *Analyst*, 121, 1269-1272.
- Houghton, D. D. (1985). *Handbook of Applied Meteorology*. Wiley.
- ICC/CCI (Institut canadien de conservation/Canadian Conservation Institute), (1986). Notes, .pg.6.
- ICCROM (International centre for the study of preservation and restoration of cultural property), (1983). *Prevention dans les musees - Climat, feu, vol, eclaireage. Cours sur la prevention dans les musees*, 8-23 settembre 1983.
- Kerr, G., Thi, L. (2000). IAQ commissioning of a Canadian archival storage facility. *Healthy Buildings 2000 - 6th International Conference. Finnish Society of Indoor Air Quality and Climate*, 303-304.
- Kontozava, V., Spolnik, Z., Worobiec, A., Godoi, R., VanGrieken, R., Deutsh, F., Bencs, L. (2005). Assessment of air pollutant levels in some European museum and churches. *Cultural Heritage Conservation and Environmental Impact Assessment by Non Destructive Testing and Micro-Analysis*, 245-263.
- Laszlo, A., Krippner, S. (1998). *Systems Theories: Their Origins, Foundations, and Development. Systems Theories and A Priori Aspects of Perception*, 3, 47-74.
- Lorusso, S. (2001). *L'ambiente di conservazione dei beni culturali*. Pitagora editrice, pg. 192.
- Lorusso, S., Matteucci, C., Natali, A. (2014). *Risk Management nel settore dei beni culturali*. Mimesis, pg. 251.
- Loupa, G., Charpantidou, E., Kioutsioukis, I., Rapsomanikis, S. (2006). Indoor microclimate, ozone and nitrogen oxides in two medieval churches in Cyprus. *Atmospheric Environment*, 40, 7457-7466.
- Lowrance, W.W. (1976). *Of acceptable risk: science and the determination of safety*. William Kaufmann, pg. 180.
- Luxen, J. (1998). ICOMOS Preface. In *Risk Preparedness: a management manual for world cultural heritage*, a cura di H. Stovel. ICCROM.

- Mantovani, O., (2002). Degradazione del materiale cartaceo. In *Chimica e Biologia applicate alla Conservazione degli Archivi*. Pubblicazioni degli Archivi di Stato, MiBACT, 297-320.
- Maunder, W. (1994). *Dictionary of Global Change*. UCL Press.
- Menart, E., De Bruin, G., Strlic, M. (2011). Dose-response function for historic paper. *Polymer Degradation and Stability*, 96, 2029-2039.
- MiBACT (Ministero per i Beni e le Attività Culturali e il Turismo), (2001). D.M. 10 maggio 2001 - Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei (D.Lgs. 112/1998 art.150, comma 6).
- Michalski, S. (1993). Relative Humidity: a discussion of Correct/Incorrect Values. ICOM Committee for Conservation, 2, 624-629.
- Morlotti, E. (2013). Indagine microclimatica nel caso studio della camera blindata della Biblioteca Classense. Tesi di laurea. AlmaMater Studiorum - Facoltà di Conservazione dei beni culturali.
- Namiesnik, J., Gorecki, T., Kozlowski, E., Torres, L., Mathieu, J., (1984). Passive Dosimeters - an approach to atmospheric pollutants analysis. *Science of the Total Environment*, 38, 225-258.
- Nazaroff, W., Cass, G. (1986). Mathematical modeling of chemically reactive pollutants in indoor air. *Environmental Science and Technology*, 20, 924-934.
- Padfield, T. (1994). Role of Standard and Guidelines. In *Durability and Change*, a cura di W. E. Krumbein, P. Brimblecombe, D. E. Cosgrove, S. Stainforth. Wiley, 191-199.
- Passam ag. (2013). *Diffusion tube for Nitrogen dioxide & Diffusive sampler for Ozone*.
- Palmes, E.D., Guinnison, A.F., (1973). Personal Monitoring for gases contaminants. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 34, 78-81.
- Palmes, E.D., Guinnison, A.F., Di Mattio, J., Tanezyk, C., (1976). Personal sampler for nitrogen dioxide. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 37, 570-577.
- Papakostantinou, K.A., Kiranoudis, C.T., Markatos, N.C., (2000). Computational investigation of ventilation effectiveness in a paper producing industry. *Drying Technology*, 9, 2051-2064.
- Passam ag, (2013a). Diffusion tube for nitrogen dioxide.
- Passam ag, (2013b). Diffusion sampler for ozone.
- Pavlogeorgatos, G. (2003). Environmental parameters in museums. *Building and Environment*, 38, 1457-1462.
- PCE group, (2010). Istruzioni del registratore di temperatura e umidità PCE-HT71:

- Resnick, Halliday, Krane. (2003). *Fisica 1. Traduzione a cura di Cicala. Casa Editrice Ambrosiana, 537-557.*
- Righi, S., Farina, F., Marinello, S., Andretta, M., Luciali, P., Pollini, E. (2013). Development and evaluation of emission disaggregation models for the spatial distribution of non-industrial combustion atmospheric pollutants. *Atmospheric Environment*, 79, 85-92.
- Ristic, S., Polic-Radovanovic, S., Jegdic, R., Radojkovic, B., (2012). Moisture Mapping of Aeronautical Museum Deposit and Galleries by IR Thermography. *Scientific Technical Review*, 62, 84-90.
- Rubbi, L. (2010). Il polo industriale di Ravenna ieri e oggi. *Ecoscienza*, 3, 122-123.
- Ryhl-Svendsen, M., Padfield, T., Smith, V., De Santis, F. (2003). The indoor climate in historic buildings without mechanical ventilation system. 7th International Conference (7-11 december 2003), *Healthy Buildings*, 278-283.
- Ryhl-Svendsen, M. (2006). Indoor air pollution in museum: a review of prediction models and control strategies. *Conservation*, 7, 27-41.
- Salmon, L., Cass, G., Bruckman, K., Haber, J. (2000). Ozone exposure inside museum in the historical central district of Krakow, Poland. *Atmospheric Environment*, 34, 3823-3832.
- Saunders, K.J., Brown, R.H., Charlton, J. (1981). The development of an improved diffusive sampler. *American Hygiene Association Journal*, 42, 865-869.
- Saunders, D. (1993). The environment and lighting in the Sainsbury wing of the National Gallery. 10th Triennial Meeting, ICOM - Committee for Conservation, 630-635.
- Schelwald, R. (2001). Proceeding of the CLARINET Workshop on Ecological Risk Assessment for contaminated sites.
- Seethapathy, S., Gorecki, T., Xiaojing, L. (2008). Passive sampling in environmental analysis. *Journal of Chromatography A*, 1184, 234-253.
- Seinfeld, J. H. (1986). *Atmospheric Chemistry and Physics of air pollution*. Wiley.
- Shaver, C., Cass, G., Druzik, J. (1983). Ozone and the deterioration of works of art. *Environmental Science and Technology*, 17, 748-752.
- SRA (Society of Risk Analysis), (1987). Annual meeting to address national, individual risks. *Risk Newsletter*, 7, 1-12.
- Suter, G. (1993). *Ecological Risk Assessment*. Lewis Publishers.
- Tanasi, M. T. (2002). La pergamena: caratteristiche fisiche e tecnologiche. In *Chimica e biologia applicate alla conservazione degli archivi*. Pubblicazione degli Archivi di Stato, MiBACT, 557-575.

- Testo, (2008). Guida tascabile sulla termografia - teoria, applicazione pratica, trucchi & suggerimenti.
- Testo, (2008). Testo 882 - Termocamera.
- Tétreault, J. (2003). Airborne Pollutants in Museums, Galleries, and Archives: Risk Assessment, Control Strategies, and Preservation Management. Canadian Conservation Institute, pg.168.
- Thompson, J.M.A., (1992). Manual of Curatorship - A guide to museum practice. Butterworth, pg. 238.
- Thomson, G. (1986). The Museum Environment. Butterworths, pg. 293.
- Titman, D. (2001). Applications of thermography in non-destructive testing of structures. NDT&E International, 34, 149-154.
- TSI, (2010). Operation and service manual - Velocicalc Plus Air Velocity Meter Models.
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), (1984). Restorer's museologist's scientist's common responsibility in the protection of museum object. International restorer seminary.
- UNI 10586, (1997). Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti.
- UNI 10829, (1999). Condizioni ambientali di conservazione: misurazione ed analisi.
- UNI 10824, (2000). Prove non distruttive - Termografia all'infrarosso - Termini e definizioni.
- Varnes, D. (1984). Landslides Hazard Zonation: a review of principles and practice. UNESCO, IAEG Commission on Landslides.
- Vasini, A., Seccia, L., Bagassi, S., Lucchi, F. (2012). Utilizzo della tecnica della super-risoluzione per migliorare la qualità di una termocamera all'infrarosso. Tesi di laurea. AlmaMater Studiorum - Facoltà di Ingegneria aerospaziale.
- Vuerich, E., Malaspina, F., Barazutti, M., Georgiadis, T., Nardino, M. (2008). Indoor measurements of microclimate variables and ozone in the church of San Vincenzo (Monastery of Bassano Romano - Italy): A pilot study. Microchemical Journal, 88, 218-223.
- Weschler, C., Shields, H., Naik, D. (1989). Indoor ozone exposure. Journal of the Air Pollution Control Association, 39, 1562-1568.
- Weschler, C., Shields, H., Naik, D. (1994). Indoor chemistry involving O₃, NO, and NO₂ as evidenced by 14 months of measurements at a site in Southern California. Environmental Science and Technology, 28, 12, 2120-2132.

- Weschler, C., Shields, H. (1997). Potential reactions among indoor pollutants. *Atmospheric Environment*, 31, 3487-3495.
- Weschler, C. (2000). Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. *Indoor air*, 10, 269-288.
- Zappalà, A. (1990). La climatizzazione nelle indagini di laboratorio e nella conservazione dei materiali cartacei. *Camere climatiche ed ambientali nella ricerca applicata*. Maggio, p. 17.

