

I FATTORI MICROCLIMATICI, CHIMICO-FISICI E BIOLOGICI: GESTIONE E MODELLAZIONE

Marco Bartolini ¹, Carlo Cacace ¹, Fabio Talarico ¹, Marta Acierno²

¹ *Mibact Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro* is-cr.segreteria@beniculturali.it

² *Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura, Sapienza*, marta.acierno@uniroma1.it

Key words: indagine microclimatica, indagine chimica, indagine biologica, restauro, gestione, modellizzazione.

1. Introduzione

Nello studio realizzato si è inteso formalizzare, attraverso un modello di ontologie, alcune categorie che descrivessero il processo che mette in relazione comune gli aspetti delle indagini conoscitive specialistiche nel campo della diagnostica sui beni culturali e le conclusioni dei singoli risultati sperimentali. Attività questa di sicuro interesse ma di particolare complessità legata ai diversi metodi e modi di interpretazione dei risultati, inoltre il tentativo di schematizzazione dei processi può sicuramente aiutare a comprendere i vari percorsi conoscitivi e realizzare linguaggi di aggregazione univoci.

2. Metodologia

Una dei primi passaggi necessari è stato quello di tarare il processo di conoscenza in funzione delle tipologie di ambienti su cui ci si è trovati ad operare e che presentano caratteristiche termodinamiche differenti: basti pensare alla differenza tra ambienti aperti, confinati, semiconfinati, chiusi e ipogei e altri. In questo studio abbiamo affrontato le strutture sotterranee di S. Saba. Gli ambienti ipogei sono soggetti a diversi fenomeni di degrado, legati in particolar modo alla collocazione sotterranea del vano; quest'ultima determina condizioni ambientali critiche per la conservazione. I processi termodinamici sono legati all'inerzia della muratura, alla sua struttura, agli spessori, alla presenza di acqua all'interno, all'esistenza o meno di ventilazione naturale negli ambienti e, infine, all'orientamento del corpo architettonico.

L'elevata umidità che caratterizza gli ambienti ipogei determina condizioni favorevoli allo sviluppo di organismi e microrganismi biodeteriogeni: la crescita della flora microbica sui materiali lapidei può produrre danni, in particolar modo, mediante il rilascio di metaboliti, che possono solubilizzare il materiale o determinare alterazioni cromatiche. In questo tipo di ambienti sono frequenti sia le alterazioni prodotte da microrganismi autotrofi, in presenza di luce naturale o artificiale, sia da microrganismi eterotrofi, quali i funghi e i batteri che possono vivere anche in assenza di luce. Fra quest'ultimi, in particolare, gli attinomiceti sono in grado di crescere sfruttando le sostanze organiche presenti anche in minime quantità sulle superfici murarie. Tra i fattori che possono attivare la crescita biologica, oltre all'umidità elevata, vanno considerati gli stress termici (variazioni anche di lieve entità della temperatura interna), i livelli di contaminazione biologica delle superfici e la presenza di sostanza organica sulla muratura. La sostanza organica può derivare dall'applicazione di prodotti negli interventi di restauro e manutenzione o anche dal semplice deposito di particolato aerodisperso, il quale contiene residui organici; ricordiamo che il particolato atmosferico è una delle strade per la propagazione dei microrganismi biodeteriogeni. Ulteriore caratteristica significativa per la conservazione è lo stato chimico delle superfici: la presenza di sali in superficie o in profondità può alterare pesantemente la conservazione delle malte e dell'eventuale pellicola pittorica.

3. Processo diagnostico

L'attivazione di un corretto processo diagnostico consente di acquisire le informazioni indispensabili alla conoscenza dello stato di conservazione della fabbrica e delle condizioni ambientali circostanti (Figura 1).

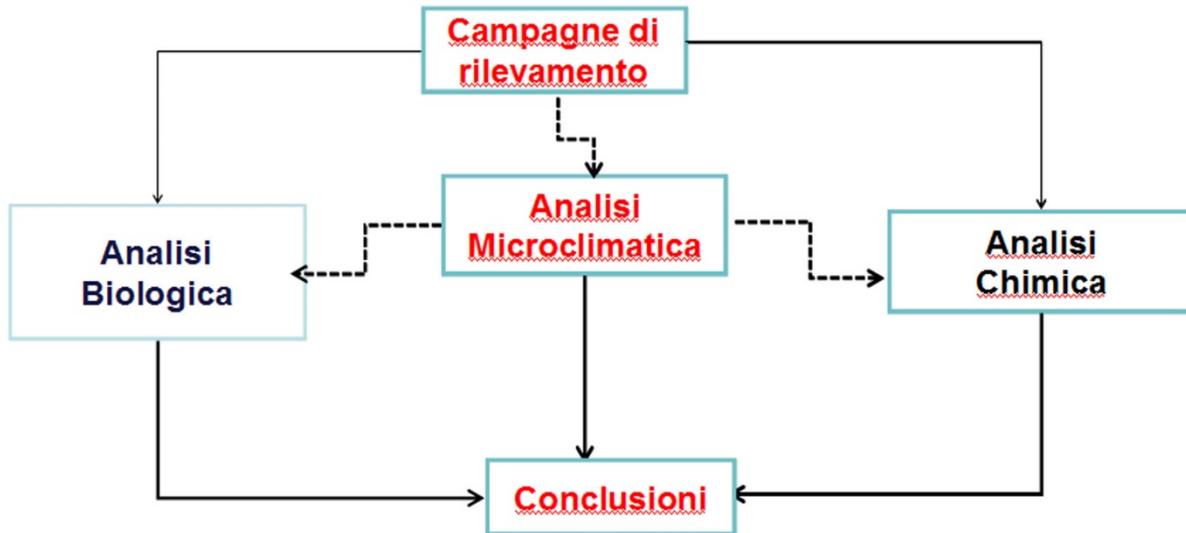


Figura 1 Schematizzazione del processo diagnostico.

Innanzitutto, l'indagine microclimatica procede nel rilevamento di parametri fisici quali temperatura e umidità relativa, illuminamento, velocità dell'aria e trasmissione del calore in vari punti dell'ambiente (Figure 2, 3, 4 e 4a); queste grandezze sono direttamente misurabili.

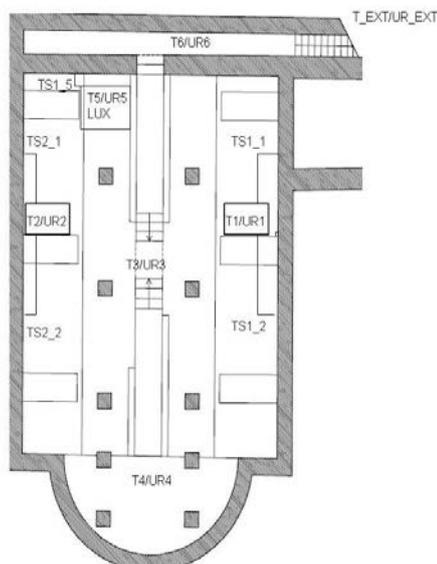


Figura 2. Posizionamento dei sensori microclimatici



Figura 3. Rilevatore di T/UR

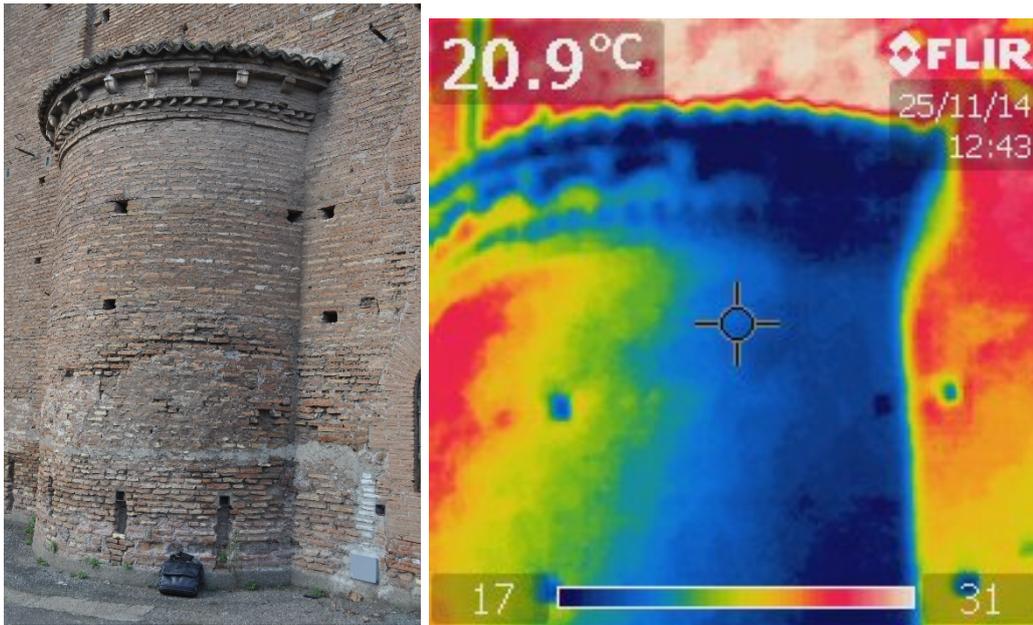


Figura 4. Veduta del fronte absidale della chiesa medievale di S. Saba e suo rilevamento termografico

Dalle misure di temperatura e umidità relativa, attraverso algoritmi noti, si giunge alla definizione della temperatura di rugiada, necessaria per comprendere se sulle superfici si raggiunga il punto di condensazione del vapore (Figura 5) e dell'umidità specifica, ovvero della reale quantità di acqua presente nell'aria (Figura 6).

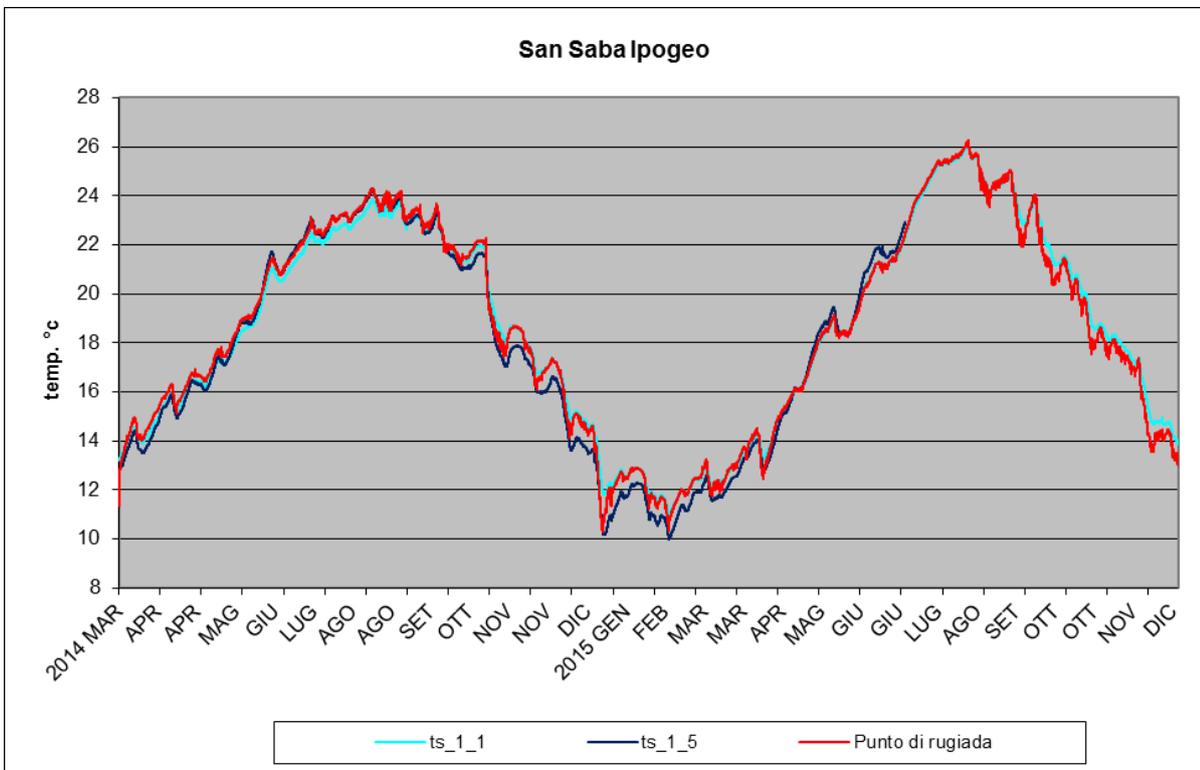


Figura 5. Confronto tra la temperatura superficiale della muratura e il punto di rugiada (curva rossa).

Quando le curve delle temperature della muratura sono uguali o minori di quella di rugiada si verifica sulla superficie muraria la condensazione.

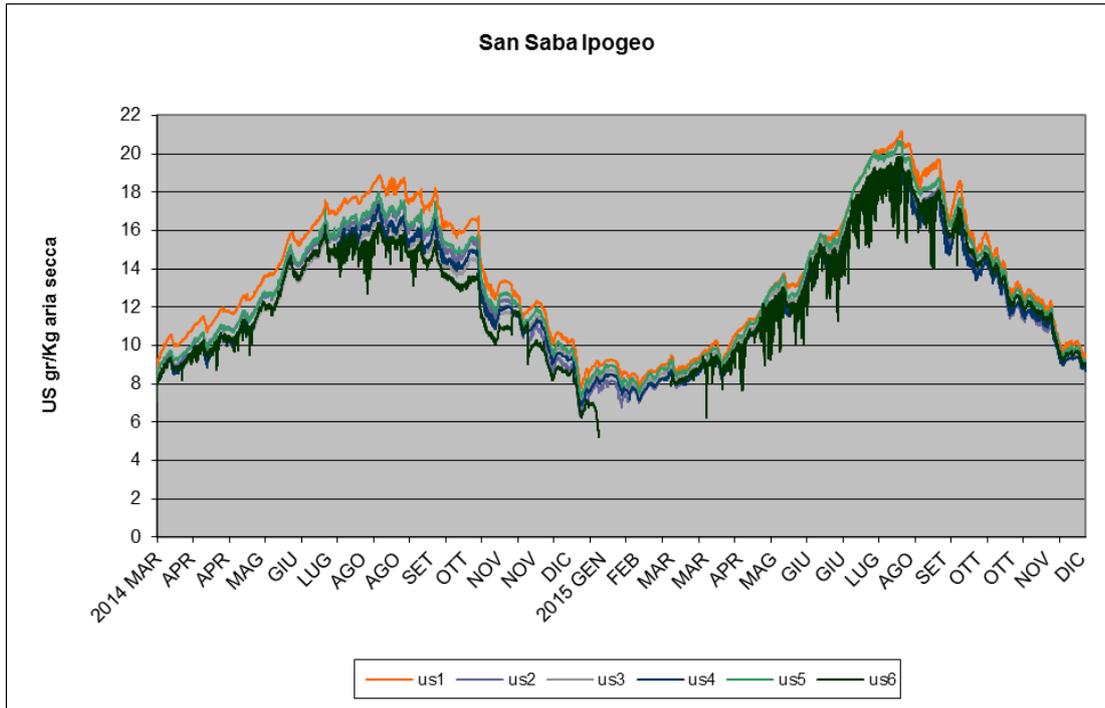


Figura 6. Confronto della distribuzione del vapore libero nell'Oratorio di S. Saba

Il piano diagnostico delle indagini biologiche si è quindi articolato nelle seguenti fasi:

- osservazione visiva e con strumenti d'ingrandimento portatili (video microscopio Dino-lite e con ingrandimenti da 50 a 200x) delle superfici con mappatura delle alterazioni di sospetta origine biologica;
- prelievo di campioni in corrispondenza delle alterazioni sospette;
- osservazione al microscopio ottico dei campioni, analisi microbiologiche colturali quali-quantitative su terreni nutritivi specifici per stabilire la tipologia dei microrganismi presenti sulle superfici;
- analisi aerobiologiche mediante la disposizione di piastre di sedimentazione per la definizione della carica di microrganismi eterotrofi presente nel particolato aerodispersi;
- analisi dell'adenosina-trifosfato (ATP) per la valutazione della carica microbica vitale totale sulle superfici lapidee. L'indagine prevede una fase di campionamento *in situ* nella quale è stato eseguito un rilevamento delle alterazioni presenti sulle superfici murarie in relazione alle quali sono stati effettuati prelievi finalizzati alla verifica della loro origine biologica (esempi nelle Figure 7 e 8).

Per lo studio dei livelli di contaminazione biologica dell'aria e delle superfici sono state eseguite due campagne di rilevamento in due periodi diversi dell'anno.

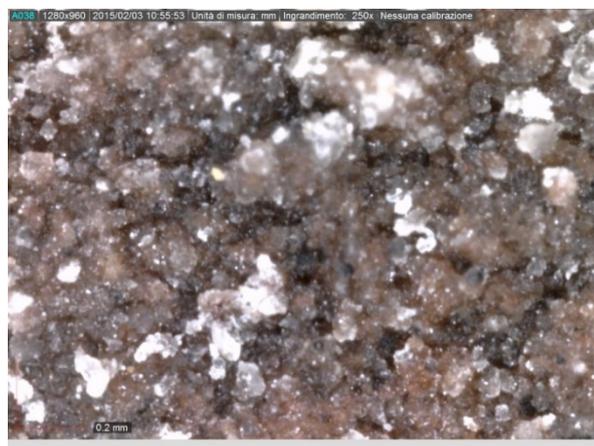
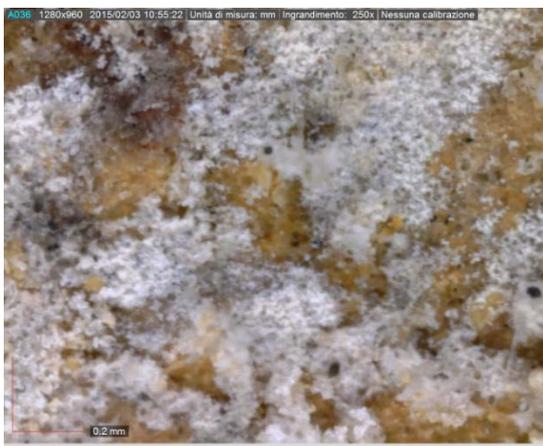


Figura 7 Rappresentazione delle alterazioni

Figura 8 Rappresentazione delle alterazioni

Il piano diagnostico-chimico ha previsto analisi *in situ*, per il riconoscimento e la caratterizzazione delle efflorescenze saline e per verificare l'evolversi della presenza di sali solubili mediante colorimetria, e in laboratorio, con l'ausilio della diffrattometria (XRD) e della spettrofotometria infrarossa con trasformata di Fourier (FTIR) (esempio Figura 9).

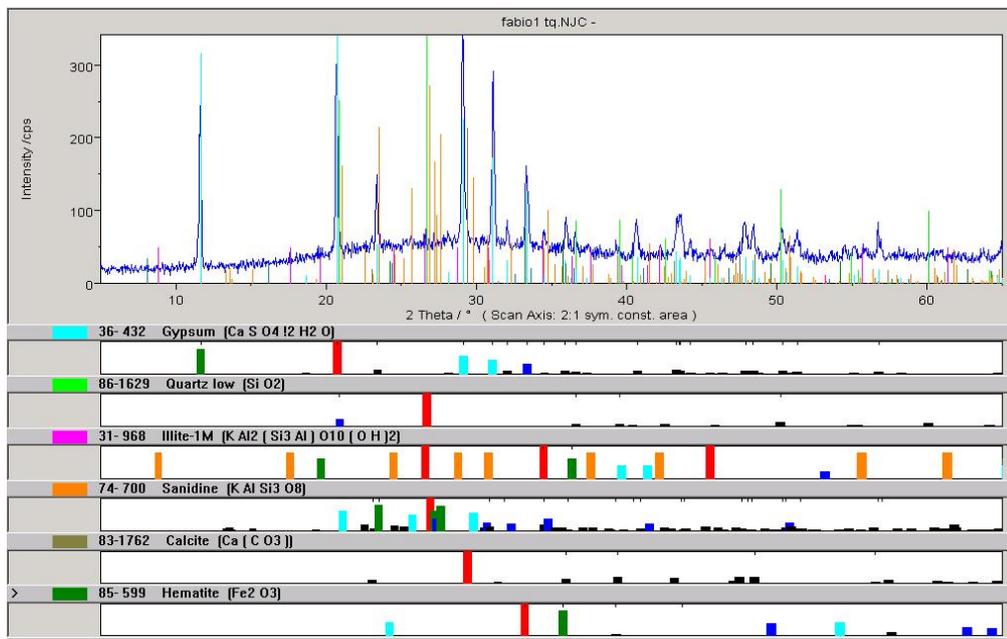


Figura 9. Spettrofotometria infrarossa con trasformata di Fourier (FTIR)

4. I risultati delle indagini e la previsione dei flussi: conclusioni

È noto che, frequentemente, gli ambienti ipogei con condizioni ecologiche favorevoli alla crescita dei biodeteriogeni, ma caratterizzati da stabilità termo-igrometrica, non presentano alterazioni biologiche. Tale fenomeno è probabilmente da attribuire al fatto che l'attivazione delle spore fungine è favorita da stress termici e chimici e che, in assenza di questi, tali contaminanti microbici si mantengono in uno stato di quiescenza. Inoltre, i microrganismi foto-autotrofi, quali alghe e ciano batteri, responsabili della formazione di biofilm e patine, richiedono per la loro crescita la presenza di luce naturale o artificiale, anche di bassa intensità (soprattutto i ciano-batteri), senza la quale non possono vivere. La spiegazione del fatto che nell'ipogeo di S. Saba non vi siano alterazioni biologiche macroscopicamente visibili potrebbe, pertanto, essere dovuta alla buona stabilità termo-igrometrica e all'assenza d'illuminazione naturale e artificiale dell'ambiente. Il sito, infatti, non è visitato e la luce artificiale è accesa molto raramente. Analizzando i dati microclimatici si può osservare che, rispetto alle variazioni giornaliere di temperatura e umidità rilevate all'esterno, i parametri in interno sono molto stabili. A livello stagionale nel sito si verifica una modifica del microclima ma tale cambiamento avviene gradualmente senza brusche variazioni. Le indagini aerobiologiche hanno mostrato che le fonti principali di biocontaminanti sono il particolato aerodisperso all'esterno trasportato all'interno e i depositi di terra nell'ambiente. Le specie biologiche riscontrate nell'Oratorio sono infatti le stesse dell'esterno e la presenza di streptomiceti è correlata alla disponibilità di terreno. La frequentazione dell'ipogeo, nelle condizioni da noi sperimentate, produce un aumento degli inquinanti batterici: oltre a un lieve incremento dei funghi, il sollevamento della terra prodotto dal calpestio favorisce la dispersione degli streptomiceti. Il passaggio di contaminati appare comunque esiguo, probabilmente per la scarsa frequentazione del sito e per

l'articolazione degli accessi. In merito alla stabilità microclimatica, per consentire la fruibilità del sito al pubblico, occorre in primo luogo predisporre un impianto d'illuminazione idoneo, che non scaldi in modo eccessivo le superfici delle murature e l'ambiente. Utilizzando il vano che precede l'accesso diretto all'ipogeo è inoltre possibile predisporre una sosta per l'acclimatamento dei gruppi di visitatori prima di accedere all'interno dell'ipogeo. Grazie ai risultati dell'indagine microclimatica - protratta per più di un anno - è quindi possibile stabilire il numero di visitatori e i tempi di permanenza ottimali per l'accesso all'ipogeo in funzione dei periodi stagionali (Figura 10). Per 20 minuti di visita intervallati da 30 minuti di pausa, per esempio, si va dai 4 visitatori minimi dei mesi invernali ai 7 massimi di agosto.

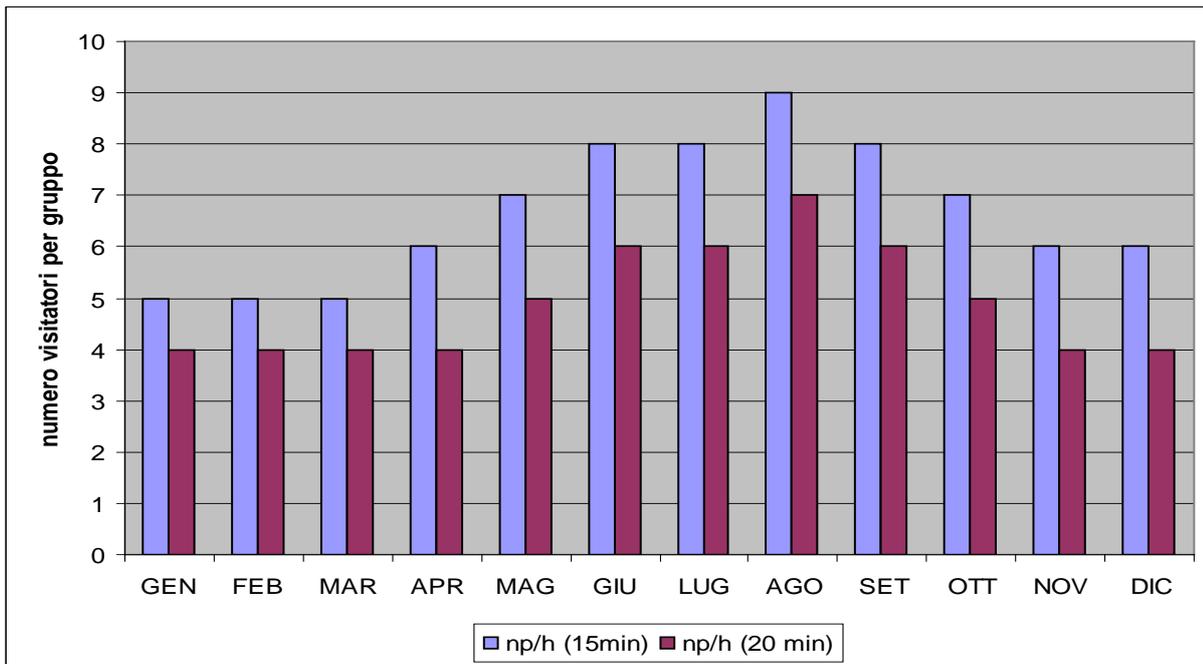


Figura 10. Istogramma del numero di visitatori in funzione dei tempi di permanenza (pari a 15 o 20 minuti).

Nello schema concettuale seguente (Figura 11) è possibile sintetizzare il processo che, partendo dall'analisi diagnostica, attraverso l'interpretazione dei dati, giunge alle proposte conservative, mantenendo la situazione di alta stabilità riscontrata nell'ipogeo di S. Saba e considerando i fattori che possono alterare questo equilibrio.

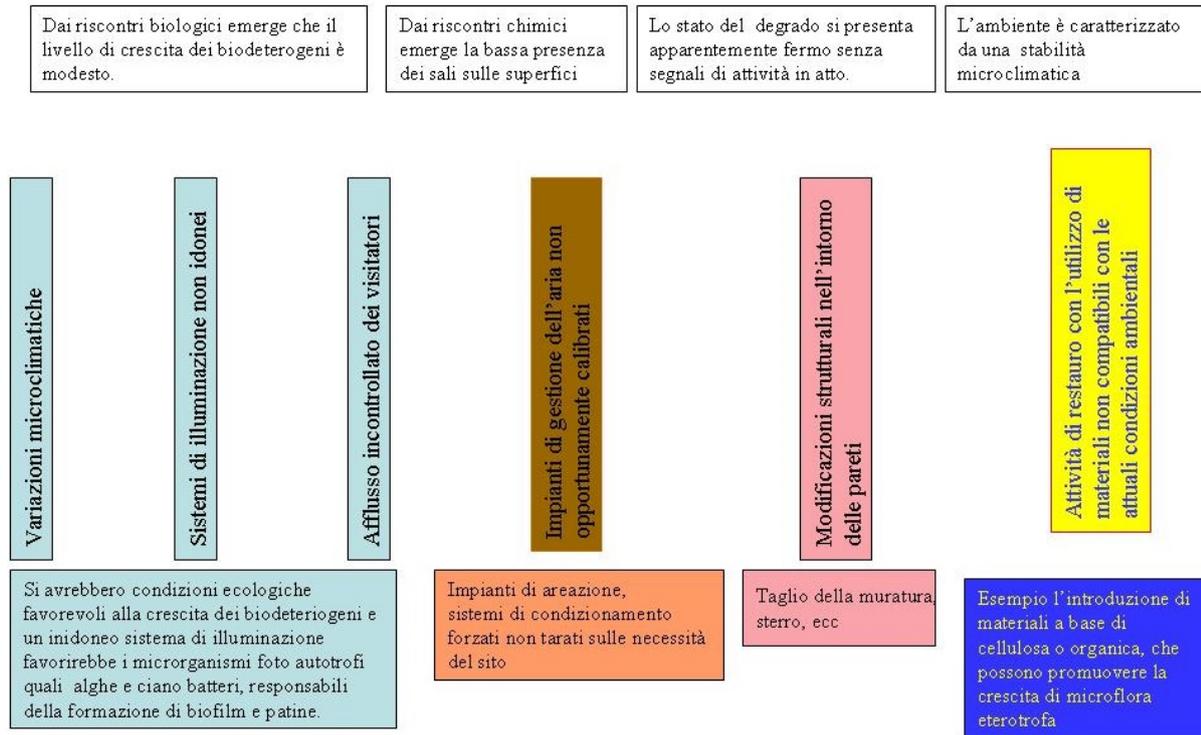


Figura 11. Schema concettuale delle problematiche affrontate nella diagnostica e valutazione delle possibili alterazioni alle condizioni di equilibrio riscontrate

5. La modellizzazione

5.1 L'indagine microclimatica

L'indagine microclimatica, svolta dai funzionari dell'ISCR, è stata modellata all'interno dell'Ontologia per il restauro nell'ambito del dominio dedicato al processo di indagine per il costruito storico.

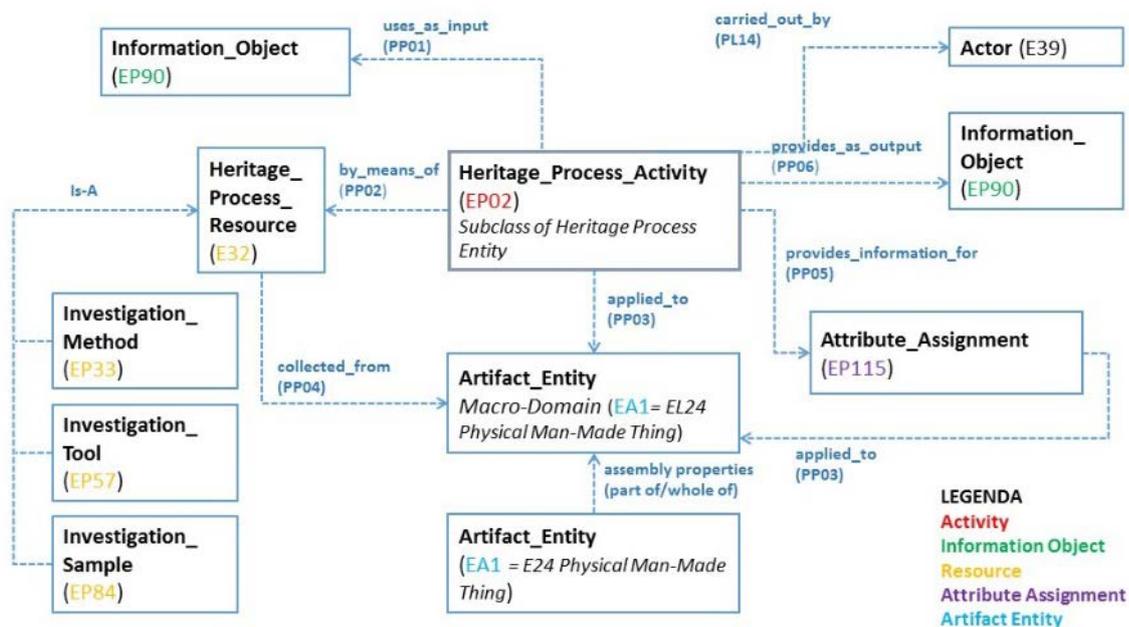


Figura 12. Schema di rappresentazione di un indagine tipo

La descrizione ha seguito la struttura formalizzata per modellare le altre indagini (vedi Acierno *supra*): accanto alla definizione dell'attività stessa vengono espresse le proprietà che ne caratterizzano i contenuti, sia in termini di descrizione dell'indagine sia per quanto riguarda i risultati forniti. La descrizione dell'indagine si esprime attraverso l'identificazione degli attori, delle risorse - articolate in strumenti e metodi - e dei riferimenti concettuali esterni (*reference information object*), ossia quelle informazioni di *input*, provenienti da altre analisi o ad altri contesti, necessarie allo sviluppo dell'indagine. La descrizione dei risultati si articola principalmente su due tipi di informazione, il primo relativo ai dati oggettivi dedotti analiticamente (*information object*), il secondo legato invece ai risultati elaborati in modo critico a seguito di un'attività di interpretazione (figura 12). Nell'ambito della modellizzazione entrambe le classi sono state mutate dal CIDOC (Fiorani *supra*, Acierno *supra*).

Nel caso specifico dell'indagine microclimatica (figura 13), la classe '*information objects*', tra gli *input* di progetto, comprende:

- i dati rilevati: Temperatura (T), Temperatura a contatto (Tc), Spostamenti (S), Umidità relativa (Ur), Velocità dell'aria (Va), CO2 e radon (gli ultimi due sono stati aggiunti solo per completezza di informazione);
- le informazioni di carattere storico e l'elaborato grafico di rilievo;
- i dati microclimatici esterni;
- le informazioni di altri specialisti (biologo);
- la normativa di riferimento.

Nell'ambito delle risorse, i metodi impiegati sono l'analisi statistica e l'algoritmo di calcolo, mentre tra gli strumenti vi sono i sensori e i *data logger*, il primo recepisce il dato e il secondo lo registra.

Data la complessità dell'indagine si è reso necessario l'inserimento di più sottoclassi all'interno dell'attività principale 'indagine microclimatica'. L'indagine infatti muove da uno studio preliminare il quale, sulla base delle informazioni di tipo storico, esaminati i dati microclimatici esterni e tenuto conto di altre eventuali informazioni fornite dagli altri specialisti, stabilisce il posizionamento dei punti di rilevamento. Pertanto entrambe le attività - 'studio preliminare' e 'posizionamento dei punti di rilevamento' - rientrano nell'ambito di una sottoclasse interna alla classe dell'attività principale, definita 'attività preliminari'. Quest'ultima è a sua volta interna alla superclasse 'attività di indagine del costruito storico' (*'heritage process activity'*). La sequenza di attività preliminari si completa con la 'campagna di rilevamento', anch'essa rappresentata dalla stessa sottoclasse. La 'campagna di rilevamento' si basa sui dati forniti dal posizionamento delle postazioni di rilevamento, impiega sensori e *data logger* per il rilevamento e la registrazione dei dati e fornisce gli elementi per l'elaborazione dei dati ai fini dell'interpretazione conclusiva. I dati elaborati (es. giorno tipo medio), infatti, costituiscono l'*input* per l'interpretazione dei risultati (*'attribute assignment'*). Tale interpretazione può essere applicata sia ad una superficie, aggiornando alcune delle proprietà *ad hoc* inserite nell'entità concettuale 'muro' (es. 'fenomeno riscontrato' o 'possibile fattore di rischio') sia all'unità ambientale (che corrisponde alla componente spaziale definita nel dominio dell'artefatto).

Le proprietà impiegate nella definizione dell'indagine microclimatica sono quelle formalizzate nell'ambito del dominio 'Processo di indagine per il patrimonio storico'. Esse, identificate con un acronimo seguito da un suffisso numerico, sono le seguenti (tra virgolette basse le proprietà, tra parentesi le classi messe in relazione):

- PP01 «usa come input» (Heritage Process Activity > Reference Concept)
- PP02 «per mezzo di» (Heritage process activity > Heritage process resource)
- PP03 «applicato a» (Heritage process activity > Artefact_entity or Lifecycle entity)
- PP04 «fornisce informazioni per» (Heritage Process Activity > Heritage Process Activity) (serve a connettere più attività del processo di indagine permettendo così di rappresentarne la coerenza)
- PP06 «fornisce come output» (Analysis Process Activity > Reference Concept)
- PP09 (dato) «generato da» (Reference Information Object > Tool)
- PP10 «usa come output» (Reference Concept > Heritage Process Activity)
- PP11 «posizionato su» (Tool > Artefact_entity)

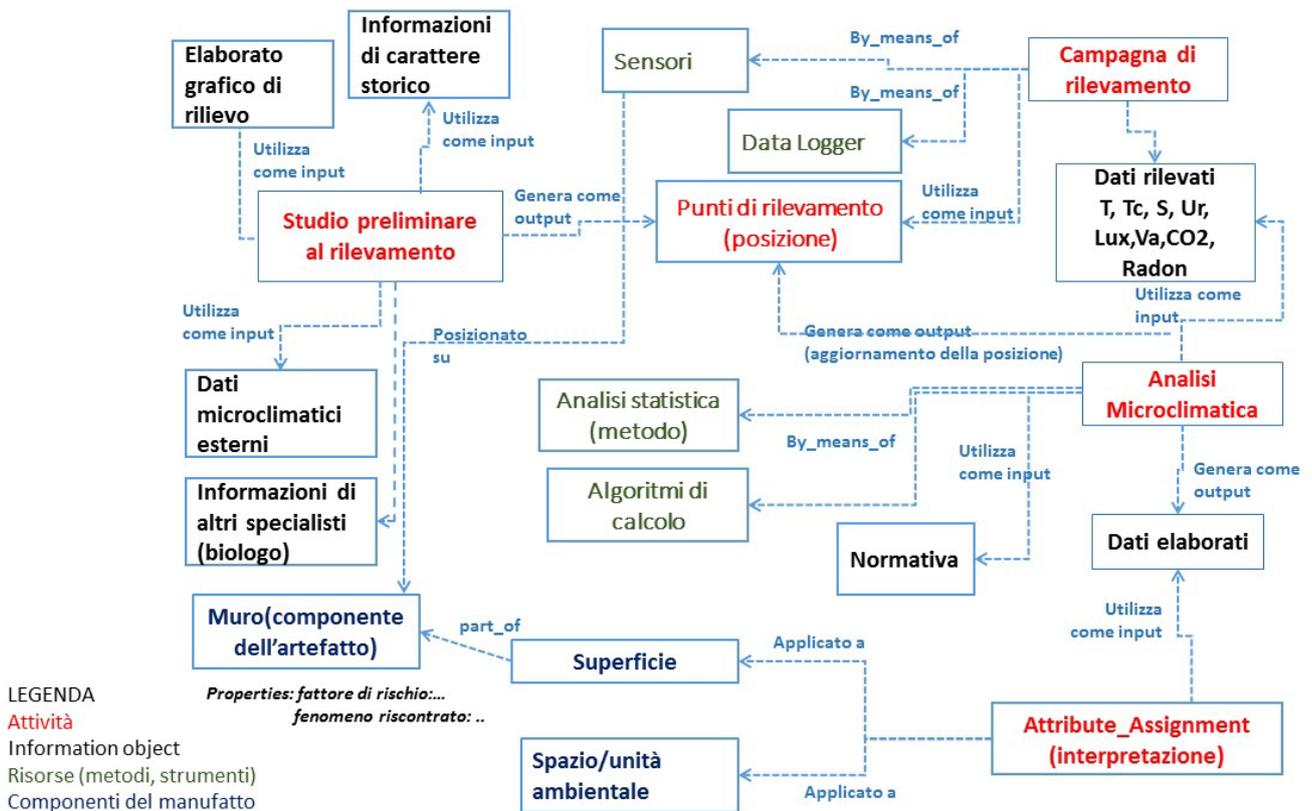


Figura 13. Schema di rappresentazione dell'indagine microclimatica (elaborazione grafica di Stefano Cursi)

5.2 Le attività di gestione: il controllo dei flussi

La modellizzazione di un'attività di gestione, nell'ambito dell'Ontologia proposta, si sviluppa all'interno del dominio 'Lifecycle 2' relativo alle azioni correnti e future svolte sull'edificio. In particolare, all'interno della super classe 'attività di gestione', si è potuta descrivere l'attività 'controllo dei flussi'. In quanto attività corrente, la maggior parte della formalizzazione è stata sviluppata sulla base di quanto già definito per la rappresentazione delle attività del processo di indagine. Le classi impiegate sono, pertanto, riferite alle attività, alle risorse necessarie (in termini di metodi, strumenti, attori e informazioni eventualmente provenienti da altre indagini) e ai risultati forniti. Inoltre la rappresentazione completa (figura 14) ha richiesto l'impiego di tutti i domini definiti nell'Ontologia: 'artefatto', 'attori', 'processo di indagine' e, come detto, 'ciclo di vita' (Fiorani *Supra*).

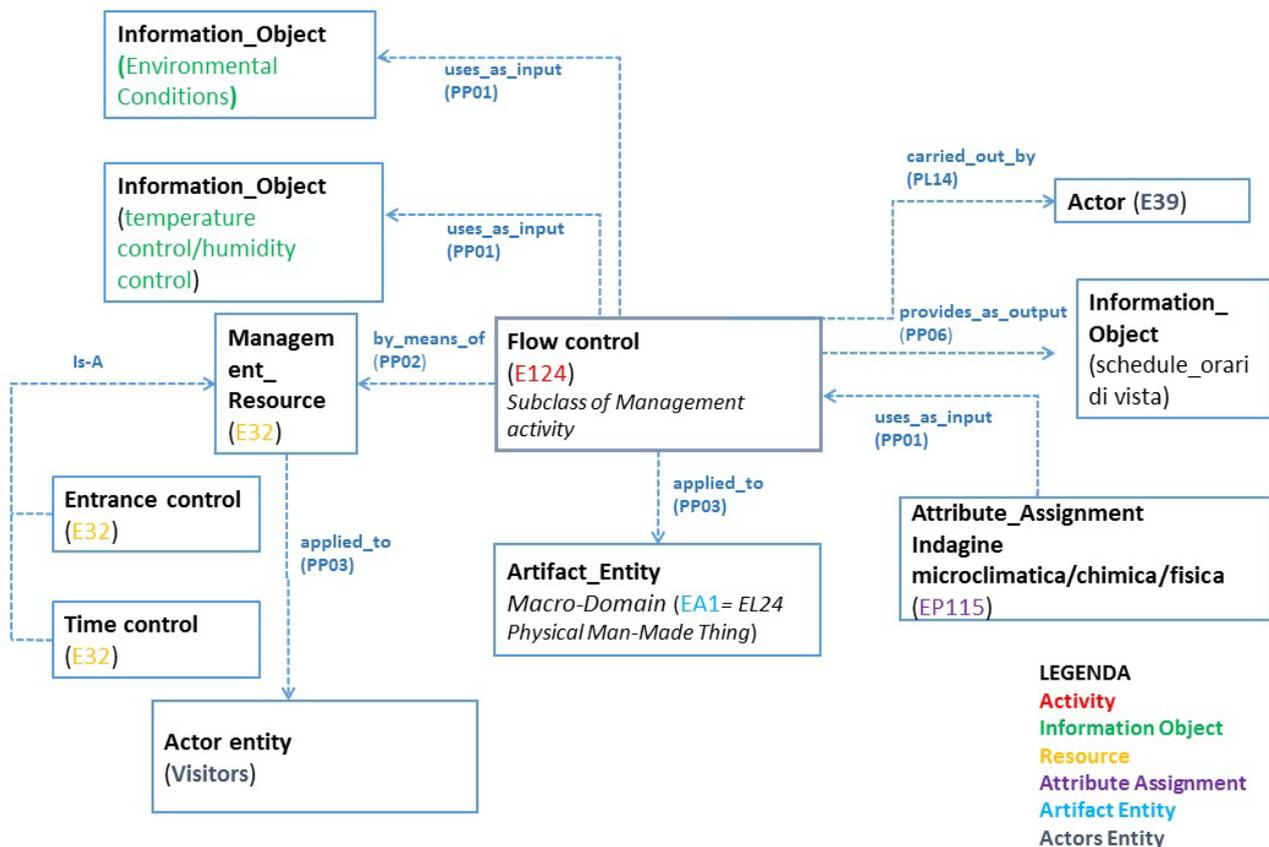


Figura 14. Schema di rappresentazione dell'attività di gestione 'Controllo dei flussi'

La complessità della modellazione di tale attività non risiede tanto nelle definizioni delle risorse, di per sé esigue in quanto riferite essenzialmente al controllo del numero di persone in entrata e del tempo di visita, quanto piuttosto nella rappresentazione dei diversi dati di *input*. Come si è visto, tali dati provengono dai risultati dell'indagine microclimatica, tuttavia sono fortemente legati alle condizioni dell'edificio e facilmente influenzabili da diversi fattori (figura 11). Il controllo dei flussi di visita è dunque strettamente connesso alla verifica della stabilità delle condizioni al contorno e deve essere continuamente aggiornato qualora si registrassero modifiche ambientali.

La formalizzazione dell'attività ha dunque definito il 'controllo dei flussi' come sottoclasse di 'Attività di gestione'. I diversi dati di *input* sono stati articolati secondo la classificazione 'information object' e 'attribute assignment'. Nella prima sono stati rappresentati i dati di temperatura, umidità relativa, illuminamento, velocità dell'aria e trasmissione del calore, nonché le condizioni ambientali, la seconda invece comprende le interpretazioni finali delle analisi microclimatica, fisica e chimica. Il dato di *output*, ossia il documento che definisce la scansione dei tempi e del numero di persone in entrata, rientra nella classe 'information object'. Quest'ultimo, come si è detto, sarà costantemente aggiornata in base al controllo della stabilità delle condizioni e tale aspetto potrà essere gestito attraverso la capacità inferenziale dell'Ontologia. Impostando infatti le regole di *reasoning*, in grado di mettere in evidenza eventuali variazioni inammissibili, sarà possibile di volta in volta segnalare l'esigenza di ricalibrare le stime.

6. Conclusioni

Il contributo proposto intende illustrare una parte di una ricerca più ampia condotta nell'ambito della modellazione del processo di studio e restauro dell'Oratorio di S. Saba a Roma. In particolare, tale segmento del lavoro ha consentito, da un lato, di verificare la validità delle strutture di conoscenza definite nei domini

già modellati, ad esempio rispetto alla formalizzazione delle indagini; dall'altro ha messo in luce l'efficacia della modellazione tramite ontologie, in un contesto fortemente interdisciplinare e complesso. In aggiunta, emerge la potenzialità di tale modello quale strumento di conservazione preventiva. Infatti, soprattutto in contesti non necessariamente affidati ad esperti di restauro, la cattiva gestione può costituire un notevole rischio per la fabbrica e un'applicazione informatica in grado di affiancare l'attività corrente degli operatori può rivelarsi un efficace supporto per le strategie di tutela.

Bibliografia

- Acierno, Marta, Stefano Cursi, Davide Simeone, Donatella Fiorani. in press. Architectural Heritage Knowledge Modelling: An Ontology-Based Framework for Conservation Process, *Journal of Architectural Heritage*, in press.
- Crofts Nick, Doerr, Martin, Gill, Tony, Stead Stephen, Stiff, Matthew. 2010. Definition of the CIDOC Conceptual Reference Model, ICOM/CIDOC Documentation Standards Group e CIDOC CRM Special Interest Group, January 2010 http://www.cidoc-crm.org/docs/cidoc_crm_version_5.0.2.pdf [9/1/2017].