

MANUALI DI CONSERVAZIONE PREVENTIVA – XV PARTE

di Alessia Ottone
www.artecontrolconsulting.it

IL RIGORE DELLA SCIENZA AL SERVIZIO DELL'ARTE: METODO SCIENTIFICO E PARAMETRI STATISTICI NELLE TECNOLOGIE DI DISINFESTAZIONE DEL LEGNO

Proseguiamo la pubblicazione della rubrica **Lignum Servare** a firma di Alessia Ottone laureata in Scienze e Tecnologia per la Conservazione e il Restauro dei Beni Culturali all'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" (erano state pubblicate fino al numero 41/2023 dodici parti a firma di Gianfranco Magri che prosegue con la sua rubrica *Artis Servare* ne IL LEGNO) trattando del metodo scientifico e dei parametri statistici nelle tecnologie di disinfestazione del patrimonio ligneo.

Il patrimonio ligneo costituisce un ecosistema complesso, strutturalmente affascinante quanto vulnerabile all'azione degradativa degli **insetti xilofagi**. La necessità di abbandonare i biocidi chimici ha orientato la ricerca verso soluzioni fisiche ed ecocompatibili. Tecnologie quali l'anossia controllata, la termo-induzione e l'irraggiamento a infrarosso rappresentano oggi lo stato dell'arte in questo settore. Il successo dei trattamenti dipende dal controllo accurato e in tempo reale di temperatura e umidità, date le proprietà anisotrope, disomogenee e igroscopiche del legno. Protocolli strettamente standardizzati rischiano la mancata eradicazione dei patogeni.

L'approccio analitico sposta l'asse dall'emergenza (azione tamponante – l'evento) al monitoraggio predittivo (azione a lungo termine – il processo). Per coniugare efficacia biocida e sicurezza del manufatto, è quindi imprescindibile applicare il metodo scientifico e l'analisi statistica dei dati.

GLI STRUMENTI CONCETTUALI DEL METODO SCIENTIFICO: DEFINIZIONI FONDAMENTALI

Per operare con rigore e garantire la **riproducibilità** dei protocolli, è prioritario definire con esattezza i parametri matematico-statistici che governano la **validazione** di una misura sperimentale,

Figura 1:
Accuratezza vs. Precisione.

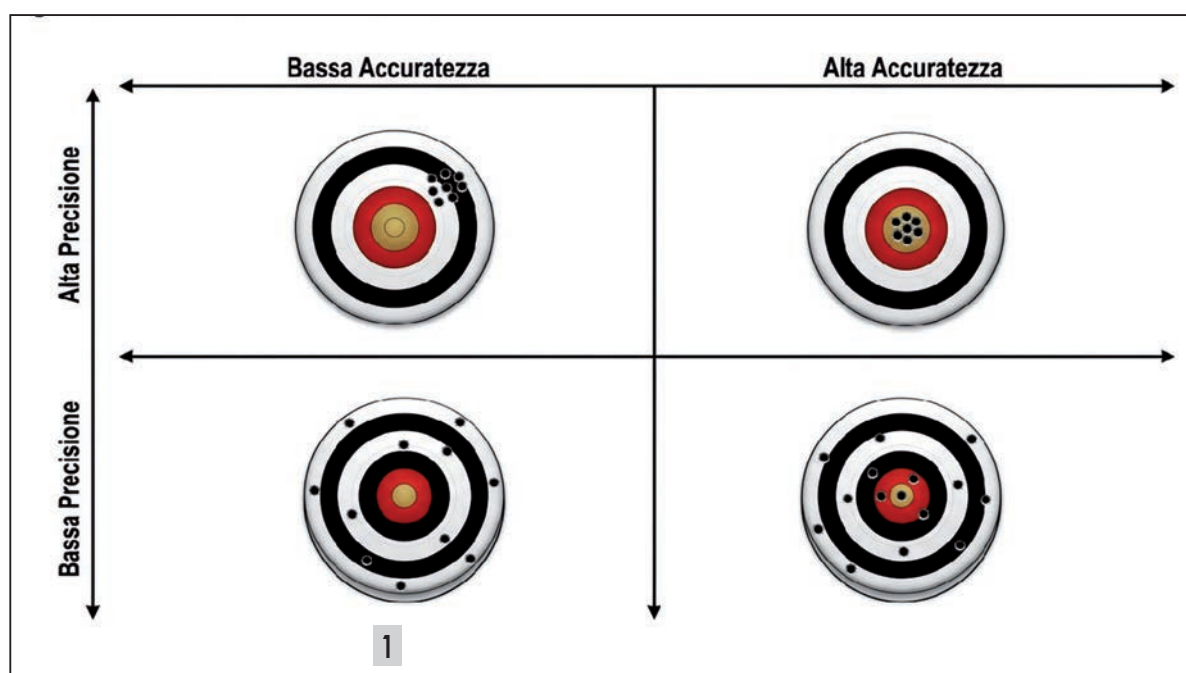
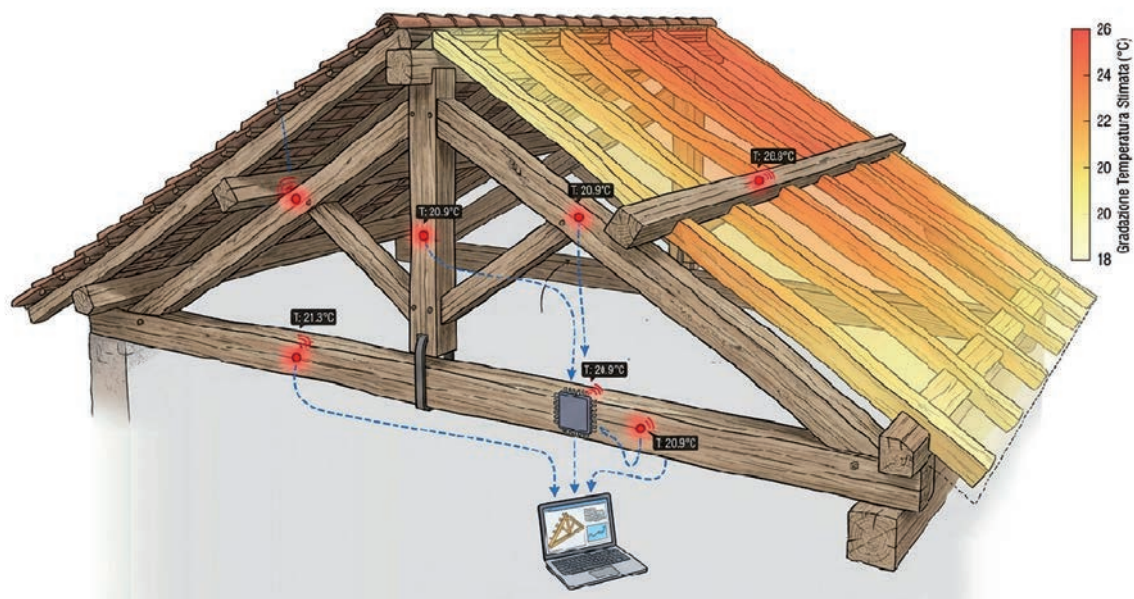


Figura 2: Schema grafico del concetto di stima su una struttura lignea.



2

superando le ambiguità del linguaggio comune.

Nel lessico scientifico, *accuratezza* e *precisione* esprimono proprietà metrologiche completamente distinte. L'**accuratezza** indica il grado di concordanza tra il valore misurato da uno strumento e il "valore vero" (o di riferimento) della grandezza fisica in esame, descrivendo l'assenza di errori sistematici (*bias*). La **precisione**, invece, descrive la riproducibilità e la ripetibilità di misurazioni indipendenti effettuate nelle medesime condizioni sperimentali, riflettendo l'entità degli errori casuali e la dispersione dei dati attorno alla loro media.

Un sistema di sensori, ad esempio, può essere estremamente preciso (restituendo letture stabili e con una *deviazione standard* minima), ma totalmente inaccurato se non calibrato correttamente. Nei trattamenti di disinfestazione, tale discrepanza può rivelarsi fatale: un'inaccuratezza in eccesso indurrebbe l'operatore a sospendere il trattamento credendo di aver raggiunto la soglia letale, lasciando in realtà inalterata la popolazione biologica interna (Figura 1).

LA STIMA

In statistica, la **stima** è il procedimento mediante il quale si utilizzano i dati osservati su un campione limitato per inferire il valore incognito di un parametro relativo all'intera popolazione. Quando si interviene su una struttura lignea monumentale, è impossibile inserire sensori di misurazione in ogni singolo punto. Infatti, posizionando le sonde in punti strategici e, tramite modelli fisici di propagazione, si formula una stima statistica delle condizioni termo-igrometriche presenti nelle sezioni non accessibili (Figura 2).

MEDIA E MEDIANA

La descrizione sintetica di un insieme di dati richiede l'uso di indici di tendenza centrale. La **media aritmetica** rappresenta il baricentro matematico della distribuzione dei dati:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Pur essendo l'indicatore più comune, la media presenta una forte vulnerabilità: risente drasticamente della presenza di *outlier*, ossia di singoli valori anomali causati da un malfunzionamento di un sensore o da una singolarità locale del legno (come un nodo o una fessura). Per mitigare questo limite, si impiega la **mediana**, definita come il valore che occupa la posizione centrale in una sequenza di dati ordinati in modo crescente. Dividendo esattamente a metà la distribuzione, la mediana si configura come una misura robusta.

Se una sola sonda sperimenta un piccolo fittizio di calore, la media schizzerà verso l'alto dando una falsa impressione di riscaldamento globale, mentre la mediana rimarrà stabile, offrendo una fotografia fedele del reale progresso del trattamento nella massa complessiva (Figura 3).

INTERVALLO DI PROBABILITÀ

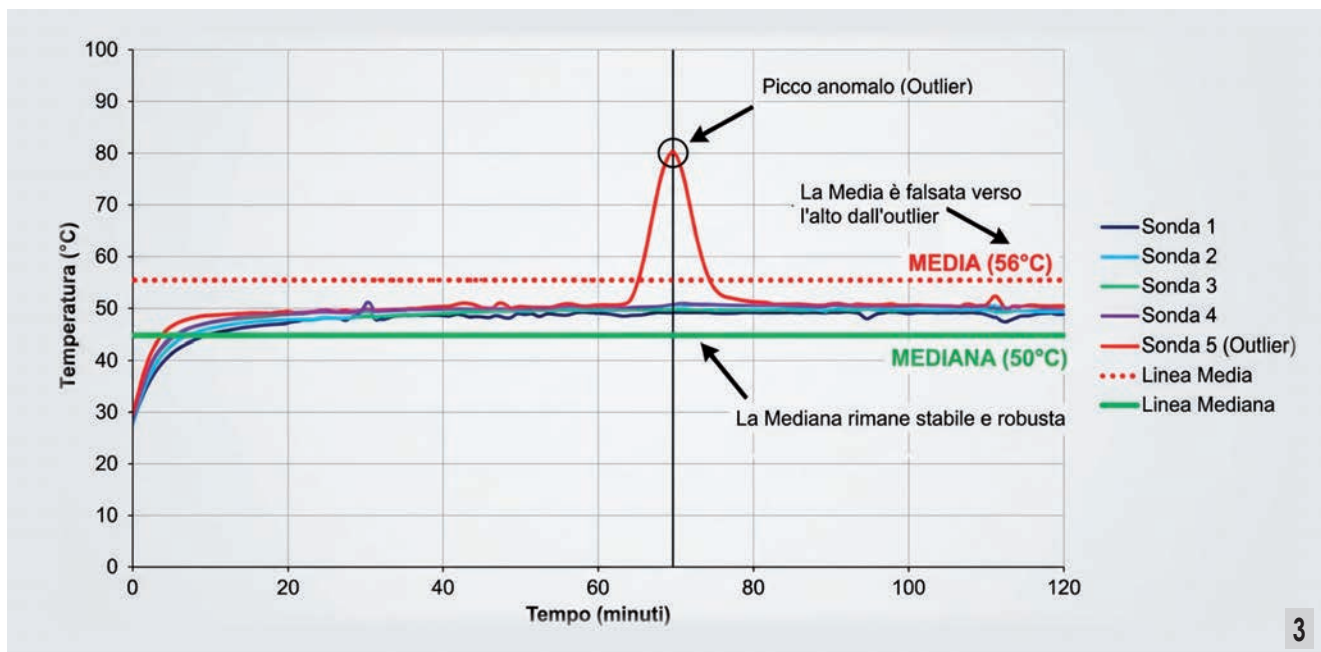
L'**intervallo di probabilità** (o di confidenza) definisce lo spazio numerico entro il quale si stima che risieda il valore reale del parametro d'interesse, associandovi un livello di certezza matematica ben



Fabio Spera

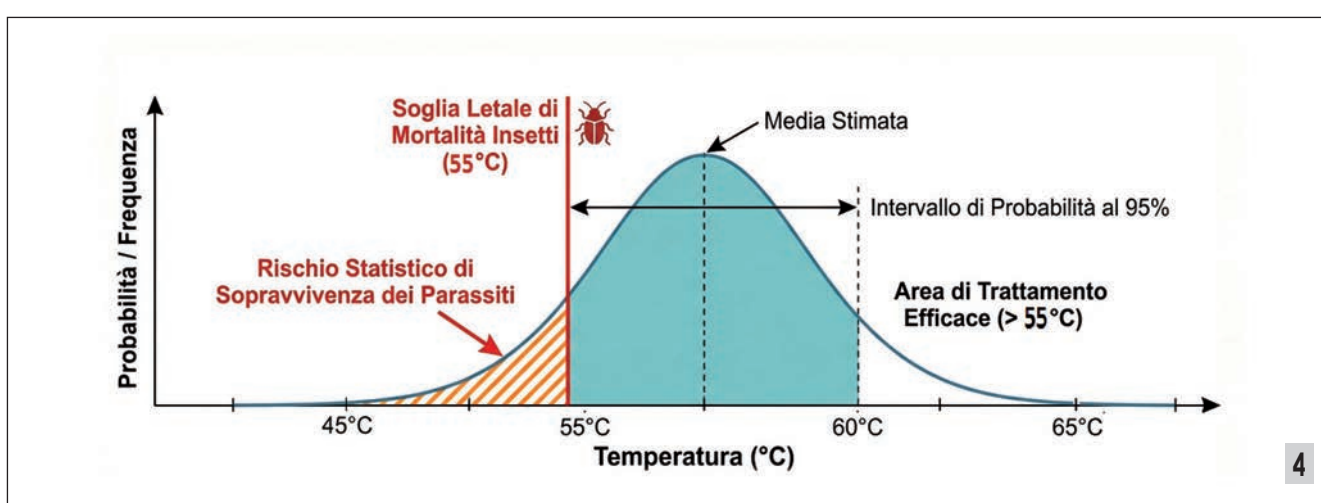
Fabio Spera è consulente nell'ambito della progettazione antincendio dal 1998, iscritto negli elenchi del Ministero dell'Interno, ha collaborato a progetti di adeguamento di centri commerciali, alberghi, case di cura e soprattutto all'adeguamento delle strutture sportive del CONI al Foro Italico di Roma e dei Musei Capitolini. La sua attività professionale per conto di strutture pubbliche e private non si è mai interrotta e prosegue ancora oggi, accompagnata negli ultimi anni da docenze per la formazione di quadri RPP, centri di avviamento al lavoro e interventi al Master internazionale di Il livello sul Restauro architettonico e cultura del patrimonio. Negli ultimi anni si è dedicato alla sperimentazione e ricerca nel settore della prefabbricazione leggera di sistemi costruttivi legno con legno, ottenendo a fine 2021 l'attestato di brevetto per invenzione industriale per un "Sistema costruttivo a pannelli intelaiati per la realizzazione di edifici e altre applicazioni in campo strutturale" (domanda n. 102017000011435 depositata il 15/02/2017).

Figura 3: Grafico cartesiano sull'effetto degli Outlier su Media e Mediana.



3

Figura 4: Curva di Gauss e Intervallo di Probabilità applicato alla soglia letale.



4

definito (solitamente fissato al 95% o al 99%). Affermare che la temperatura media interna di una trave è di 57,5°C non basta a garantire il successo biologico. Se l'intervallo di probabilità al 95% associato a questa stima è compreso tra 50°C e 64°C, significa che esiste una concreta probabilità statistica che alcune porzioni della struttura si trovino a una temperatura inferiore ai 55°C, soglia minima sotto la quale molte larve riescono a sopravvivere (Figura 4).

L'IMPORTANZA DELLA STATISTICA NELLE TECNOLOGIE DI DISINFESTAZIONE

La variabilità intrinseca dei parametri termo-igrometrici ambientali si scontra costantemente con la suscettibilità del binomio legno-insetto. La comprensione profonda delle proprietà intrinseche della materia è il punto di partenza: come ricordato da Gianfranco Magri in "La durabilità del legno" (**IL LEGNO n. 392 e 393**), la resistenza naturale del materiale e le sue risposte alterative ai fattori esterni governano ogni logica di protezione e recupero. L'analisi rigorosa dei dati statistici è il ponte che permette di bilanciare l'efficacia biologica con l'integrità meccanica del legno.

TRATTAMENTI IN ANOSSIA CONTROLLATA

L'anossia si basa sulla sostituzione dell'atmosfera con gas inerti (Azoto) all'interno di involucri sigillati per provocare la morte degli insetti. Gli studi dimostrano che l'efficacia biocida totale su tutti gli stadi vitali si ottiene unicamente per concentrazioni di ossigeno residuo (O₂) mantenute stabilmente al di sotto dello 0,1%.

In questo scenario, l'accuratezza dei sensori di ossigeno è cruciale: un errore sistematico dello strumento dello 0,2% potrebbe mostrare uno scenario fittiziamente sicuro laddove gli insetti continuano a sopravvivere (Figura 5).

TRATTAMENTI PER TERMO-INDUZIONE

I trattamenti termici mirano a innalzare la temperatura interna del legno fino al raggiungimento della soglia letale per la denaturazione proteica degli insetti (55°C - 60°C). Poiché il legno ha una conducibilità termica ridotta e fortemente anisotropa, la distribuzione del calore è disomogenea.

Affidarsi alla semplice *media* dei valori delle sonde è un grave errore metodologico. È obbligatorio determinare l'intervallo di probabilità associato

PREVENTIVE CONSERVATION MANUALS – PART XV

SCIENTIFIC RIGOR IN THE SERVICE OF ART: SCIENTIFIC METHOD AND STATISTICAL PARAMETERS IN WOOD DISINFESTATION TECHNOLOGIES

The *Lignum Servare* column, which deals with scientific support for the durability of wood and its conservation and protection from pathogens, written by Alessia Ottone, a graduate in Science and Technology for the Conservation and Restoration of Cultural Heritage at the University of Rome “La Sapienza,” continues to discuss scientific support.

Wooden heritage is a complex ecosystem, as structurally fascinating as it is vulnerable to the degrading action of **wood-boring insects**. The need to move away from **chemical biocides** has redirected research toward physical and **eco-compatible solutions**. Controlled anoxia, thermo-induction and infrared irradiation now represent the state of the art in this field. The success of these treatments depends on the accurate, **real-time control of temperature and humidity**, given the anisotropic, heterogeneous and hygroscopic properties of wood. Strictly standardized protocols may fail to eradicate pathogens. The analytical approach shifts the focus from emergency action (short-term intervention – the **event**) to predictive monitoring (long-term intervention – the **process**). To work rigorously and ensure the reproducibility of protocols, it is essential to **define precisely the mathematical and statistical parameters** that govern the validation of an experimental measurement, overcoming the ambiguities of everyday language.

THE CONCEPTUAL TOOLS OF THE SCIENTIFIC METHOD: FUNDAMENTAL DEFINITIONS

In scientific terminology, **accuracy** indicates the degree of agreement between the value measured by an instrument and the “true value” of the physical quantity under examination, describing the absence of systematic errors (*bias*). **Precision**, by contrast, describes the reproducibility and repeatability of independent measurements carried out under the same experimental conditions, reflecting the extent of random errors and the dispersion of data around their mean. In disinfestation treatments, this distinction can be critical: an **excessive inaccuracy** could lead the operator to stop the treatment believing the lethal threshold has been reached, while the internal biological population remains unaffected (Figure 1).

When dealing with a monumental wooden structure, it is impossible to insert measuring sensors into every single point. A **statistical estimate** of the thermo-hygrometric conditions in inaccessible sections must therefore be made (Figure 2).

What should not be used, however, is the **arithmetic mean**, which represents the mathematical center of gravity of the data distribution. Although it is the most common indicator, the mean is highly vulnerable to outliers – anomalous values caused by a sensor malfunction or by a local singularity in the wood, such as a knot or a crack. The **median** is therefore used instead, defined as the value occupying the central position in an ordered sequence of data. By dividing the distribution exactly in half, the median becomes a robust measure (Figure 3).

The **probability interval** (or confidence interval) defines the numerical range within which the true value of the parameter of interest is estimated to lie, with a clearly defined level of mathematical certainty, usually set at 95% or 99%. Saying that the average internal temperature of a beam is 57.5°C is not enough to guarantee biological success. If the 95% confidence interval associated with this estimate ranges from 50°C to 64°C, it means there is a real statistical probability that some portions of the structure are still below 55°C, the minimum threshold below which many larvae can survive (Figure 4).

THE IMPORTANCE OF STATISTICS IN DISINFESTATION TECHNOLOGIES

The **intrinsic variability** of environmental thermo-hygrometric parameters constantly clashes with the **susceptibility of the**

wood-insect relationship. A deep understanding of the intrinsic properties of the material is the starting point: as Gianfranco Magri noted in *The durability of wood* (IL LEGNO nos. 392 and 393), the natural resistance of the material and its responses to external factors govern every logic of protection and recovery. Rigorous analysis of statistical data is the bridge that makes it possible to balance biological effectiveness with the mechanical integrity of the wood.

Controlled anoxia treatments

Anoxia is based on replacing the atmosphere with inert gas (nitrogen) inside sealed enclosures in order to cause insect death. Studies show that complete biocidal effectiveness at all life stages is achieved only when the residual oxygen concentration (O₂) is kept stably below 0.1%. In this scenario, the accuracy of oxygen sensors is crucial: an instrument with a systematic error of 0.2% could display a falsely safe situation while insects continue to survive (Figure 5).

Thermo-induction treatments

Thermal treatments aim to raise the internal temperature of the wood until the lethal threshold for insect protein denaturation is reached (55°C–60°C). Since wood has low and strongly anisotropic thermal conductivity, heat distribution is uneven. Relying on the simple average of probe readings is a serious methodological error. It is necessary to determine the confidence interval associated with the thermal map: only when the lower bound of the interval exceeds 55–57.5°C at the thermally most disadvantaged point can the success of the disinfestation be declared. The use of the median also avoids misleading readings caused by local overheating of a probe, for example when it comes into contact with metal connecting elements such as nails or brackets.

Disinfestation with infrared technology

Infrared systems exploit electromagnetic radiation to rapidly heat the exposed surfaces of wooden objects; the heat then propagates inward by conduction (Figure 6). Here, calculating the median of surface gradients through IR thermography becomes essential, so that localized peaks — outliers caused by variations in wood emissivity or historic patinas — do not distort the overall reading. At the same time, high accuracy is needed to ensure that the critical thresholds of mechanical tolerance of the historic artifact are never exceeded.

Conclusions

The transition toward physical and ecological technologies is an essential milestone in the protection of wooden heritage. However, the intrinsic variability of the material and of environmental parameters requires the adoption of a rigorous approach. Statistical parameters are not mere academic exercises, but indispensable working tools, from the designer to the restorer.

This scientific rigor perfectly outlines the identity of “the good disinfestor” (IL LEGNO nos. 394 and 395): a professional who abandons approximate empiricism in order to become a conscious interpreter of numerical data, ensuring traceability and safety of the intervention. Only through the integration of these concepts into control systems is it possible to transform an intervention into a reliable protocol, capable of guaranteeing both biological success and the full preservation of wooden works.

Figura 5: Schema tecnico di un trattamento in Anossia Controllata.

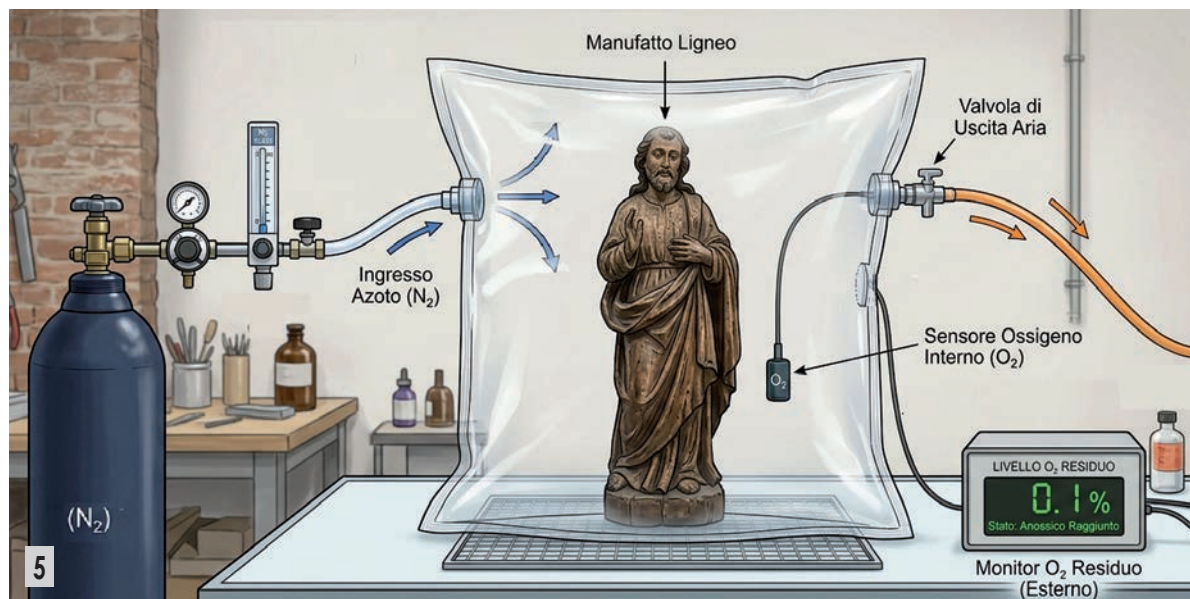
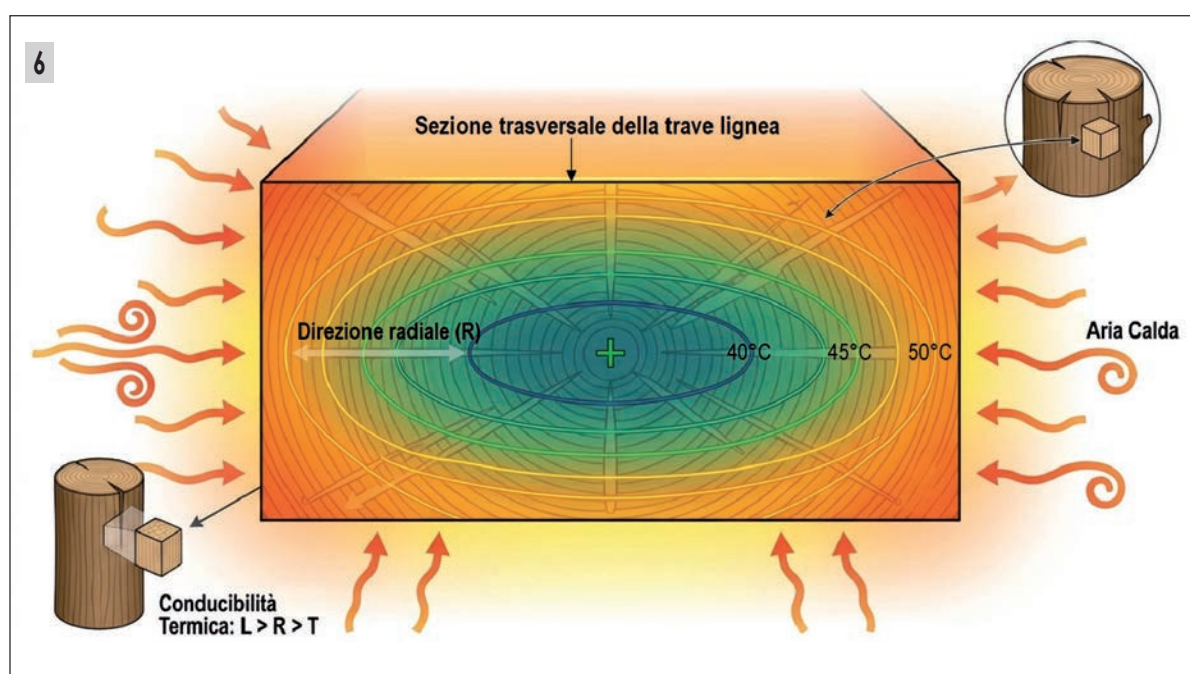


Figura 6: Mappa delle isoterme e anisotropia del legno nella Termo-Induzione.



alla mappa termica: solo quando l'estremo inferiore dell'intervallo supera i 55-57,5°C nel punto termicamente più svantaggiato, si può decretare il successo della disinfestazione. L'uso della *mediana* evita, inoltre, letture errate causate dal surriscaldamento locale di una sonda, ad esempio, a contatto con elementi metallici di connessione (chiodi o staffe).

DISINFESTAZIONE CON TECNOLOGIA A INFRAROSSO

I sistemi a infrarossi sfruttano la radiazione elettromagnetica per scaldare rapidamente le superfici esposte dei manufatti lignei; il calore si propaga successivamente verso l'interno per conduzione (Figura 6).

Diventa essenziale calcolare la *mediana* dei gradienti superficiali tramite termografia IR per evitare che picchi localizzati (*outlier* dovuti a variazioni di emissività del legno o patine storiche) falsino la lettura complessiva, garantendo al contempo un'elevata *accuratezza* per non superare mai le soglie

critiche di tolleranza meccanica del manufatto storico.

CONCLUSIONI

La transizione verso tecnologie fisiche ed ecologiche rappresenta un traguardo irrinunciabile per la tutela del patrimonio ligneo. Tuttavia, la variabilità intrinseca del materiale e dei parametri ambientali impone l'adozione di un approccio rigoroso. I parametri statistici non sono meri esercizi accademici, bensì strumenti di lavoro indispensabili dal progettista al restauratore. Questo rigore scientifico delinea perfettamente l'identikit de "Il buon disinfestatore" (*IL LEGNO n.394 e 395*): un professionista che abbandona l'empirismo approssimativo per farsi interprete consapevole del dato numerico, garantendo la tracciabilità e la sicurezza dell'intervento. Solo attraverso l'integrazione di questi concetti nei sistemi di controllo è possibile trasformare **un intervento in un protocollo affidabile**, capace di garantire contemporaneamente il successo biologico e l'assoluta incolumità delle opere lignee.