

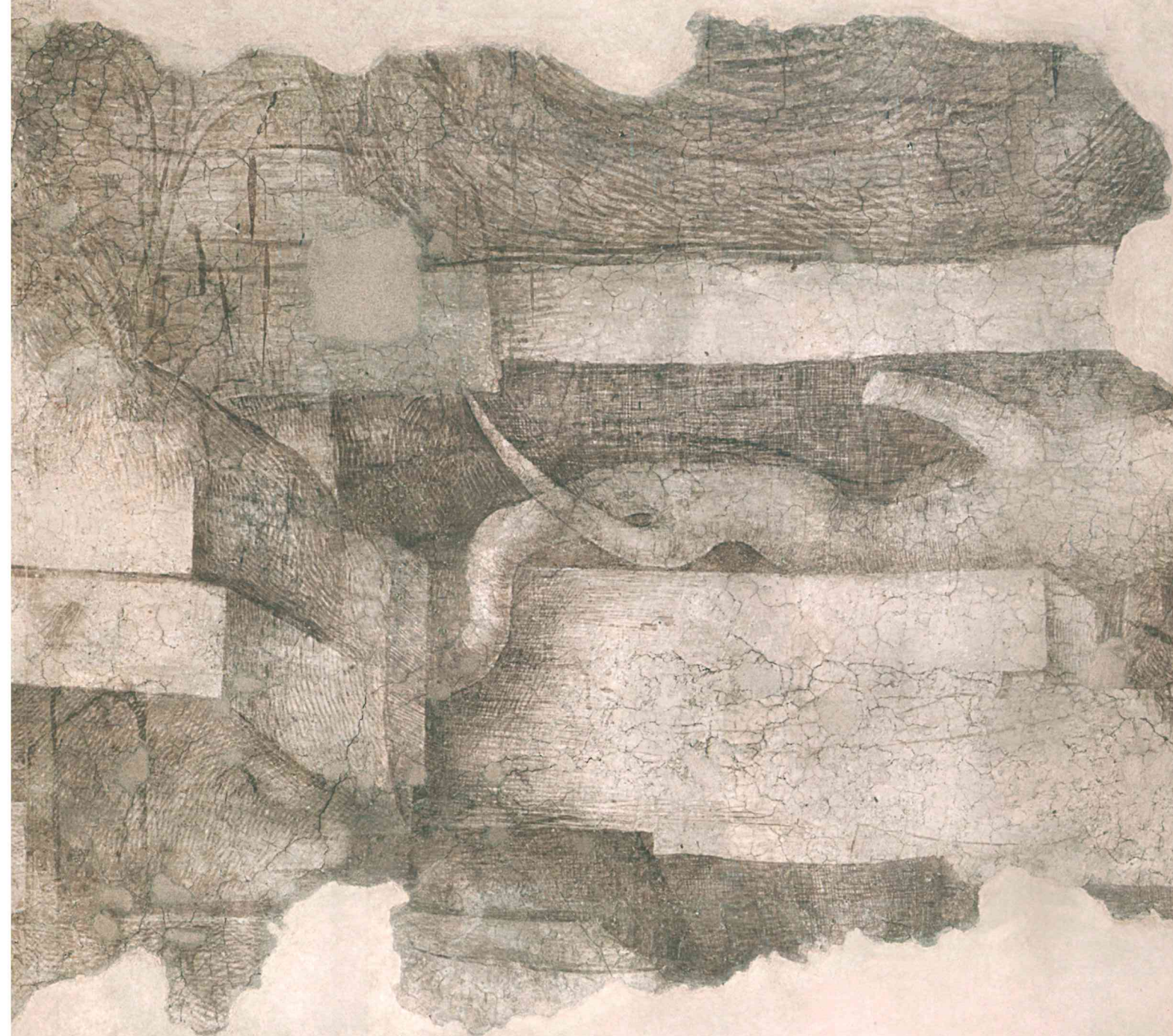
La sala delle Asse del Castello Sforzesco

# LEONARDO DA VINCI

The Sala delle Asse of the Sforza Castle

La diagnostica e il restauro del *Monocromo*

Diagnostic Testing and Restoration of the *Monochrome*



# Sommario

## Contents

18 Introduzione

19 Introduction

*Michela Palazzo e Claudio Salsi*

### I.

#### RASSEGNA STORICA

#### A HISTORICAL SURVEY

26 *La camera grande da le Asse coè da la tore,*  
da Galeazzo Maria Sforza a Luca Beltrami

27 *La camera grande da le Asse coè da la tore,*  
from Galeazzo Maria Sforza to Luca Beltrami

*Francesca Tasso*

56 Leonardo e il non-finito  
della sala delle Asse

57 Leonardo and the Non-Finito  
of the Sala delle Asse

*Cecilia Frosinini*

66 Cenni sulla tecnica di esecuzione del *Monocromo*

67 Notes on the Making of the *Monochrome*

*Michela Palazzo*

76 Il *Monocromo* di Leonardo da Vinci nella sala  
delle Asse. Vicende conservative e interpretazione

77 Leonardo da Vinci's *Monochrome*  
in the Sala delle Asse. Conservation, History  
and Interpretation

*Michela Palazzo*

### II.

#### LA DIAGNOSTICA PER IL RESTAURO DEL MONOCROMO

#### DIAGNOSTIC TESTING FOR RESTORATION OF THE MONOCHROME

112 Indagini conoscitive tramite georadar  
e monitoraggio delle strutture murarie  
e del sistema di volte di copertura  
della sala delle Asse

113 Georadar Investigations and Monitoring  
of the Wall Structures and Vault System  
of the Sala delle Asse

*Diego Arosio, Paola Condoleo, Marco Cucchi,  
Stefano Munda, Claudia Tiraboschi, Luigi Zanzi*

120 Il rilievo diagnostico:  
la sala delle Asse e il suo contesto

121 The Diagnostic Survey:  
The Sala delle Asse and its Context

*Susanna Bortolotto, Elisabetta Ciocchini, Andrea Garzulino,  
Raffaella Simonelli, Fabio Zangheri*

130 Le indagini termoisometriche preliminari  
e il monitoraggio ambientale della sala delle Asse

131 The Preliminary Thermo-Hygrometric Research  
and Environmental Monitoring of the Sala delle Asse

*Elisabetta Rosina*

144 L'alta definizione per la sala delle Asse

145 High Resolution for the Sala delle Asse

*Annarita Merigo, Vincenzo Mirarchi*

152 Integrazione dei dati laser scanner e rilievo  
fotografico multispettrale panoramico:  
dal rilievo alla produzione di ortografie a falsi  
colori nell'ottica di sviluppi in fotogrammetria

## CRICA SURVEY

rande da le Asse coè da la tore,  
o Maria Sforza a Luca Beltrami

rande da le Asse coè da la tore,  
zzo Maria Sforza to Luca Beltrami

o

il non-finito  
elle Asse

nd the Non-Finito  
delle Asse

i

tecnica di esecuzione del *Monocromo*

ie Making of the *Monochrome*

o

o di Leonardo da Vinci nella sala  
Vicende conservative e interpretazione

a Vinci's *Monochrome*  
delle Asse. Conservation, History  
etation

o

## II.

### LA DIAGNOSTICA PER IL RESTAURO DEL MONOCROMO

#### DIAGNOSTIC TESTING FOR RESTORATION OF THE MONOCHROME

112 Indagini conoscitive tramite georadar  
e monitoraggio delle strutture murarie  
e del sistema di volte di copertura  
della sala delle Asse

113 Georadar Investigations and Monitoring  
of the Wall Structures and Vault System  
of the Sala delle Asse

*Diego Arosio, Paola Condoleo, Marco Cucchi,  
Stefano Munda, Claudia Tiraboschi, Luigi Zanzi*

120 Il rilievo diagnostico:  
la sala delle Asse e il suo contesto

121 The Diagnostic Survey:  
The Sala delle Asse and its Context

*Susanna Bortolotto, Elisabetta Ciochini, Andrea Garzulino,  
Raffaella Simonelli, Fabio Zangheri*

130 Le indagini termoigrometriche preliminari  
e il monitoraggio ambientale della sala delle Asse

131 The Preliminary Thermo-Hygrometric Research  
and Environmental Monitoring of the Sala delle Asse

*Elisabetta Rosina*

144 L'alta definizione per la sala delle Asse

145 High Resolution for the Sala delle Asse

*Annarita Merigo, Vincenzo Mirarchi*

152 Integrazione dei dati laser scanner e rilievo  
fotografico multispettrale panoramico:  
dal rilievo alla produzione di ortografie a falsi  
colori nell'ottica di sviluppi in fotogrammetria

153 Integration of the Laser Scanner Data and  
the Multispectral Panoramic Photographic  
Survey: From the Survey to the Production  
of False Colour Orthographs in View  
of Developments in Photogrammetry

*Elena Biondi, Alessandro Bovero, Paolo Triolo*

162 Una visione in più: il contributo  
della diagnostica CNR all'intervento  
di conservazione del *Monocromo*  
nella sala delle Asse

163 An Additional View: the Contribution  
of CNR Diagnostics to the *Monochrome*  
in the Sala delle Asse Conservation

*Antonio Sansonetti, Alessandra Botteon, Moira Bertasa,  
Claudia Conti, Chiara Colombo, Riccardo Negrotti,  
Marco Realini, Alessia Andreotti, Laura Rampazzi*

186 L'imaging termico *dual mode*  
nell'analisi delle pitture murali: studio  
del *Monocromo* di Leonardo tramite Thermal  
Quasi-Reflectography e termografia nel medio-IR

187 Analysing Wall Painting with 'Dual Mode' Thermal  
Imaging: The Study of Leonardo's *Monochrome*  
Using Thermal Quasi-Reflectography and  
Thermography in the Mid-IR

*Claudia Daffara, Simone Parisotto, Paola Ilaria Mariotti*

200 Analisi in Hypercolorimetric Multispectral  
Imaging (HMI) e fluorescenza su monocromi  
e policromi di Leonardo da Vinci nella sala delle Asse

201 The Hypercolorimetric Multispectral Imaging  
(HMI) and Fluorescence Analyses on Leonardo  
da Vinci's Polychrome and Monochrome  
Paintings in the Sala delle Asse

*Marcello Melis*

## III.

### LO STATO DI CONSERVAZIONE E L'INTERVENTO DI RESTAURO THE STATE OF PRESERVATION AND THE RESTORATION

212 Lo stato di conservazione e l'intervento  
di restauro del *Monocromo*

213 The State of Preservation and the Restoration  
of the *Monochrome*

*Fabrizio Bandini, Alberto Felici, Maria Rosa Lanfranchi,  
Paola Ilaria Mariotti*

236 Dalla documentazione scientifica  
alla valorizzazione

237 From Scientific Documentation  
to Valorisation

*Massimo Chimenti*

250 Comunicazione multimediale  
di un restauro

251 The Multimedia Communication  
of a Restoration

*Diletta Apollonio, Nicoletta Di Blas, Paolo Paolini*

264 *Conclusioni*  
Considerazioni sul tema  
della reintegrazione delle lacune

265 *Conclusions*  
Thoughts on the Restoration  
of Lacunae

*Marco Ciatti*

270 *Il Monocromo / The Monochrome*

277 Bibliografia ragionata / Bibliographic Essay

*Carlo Catturini, Luca Tosi*

# Le indagini termoigrometriche preliminari e il monitoraggio ambientale della sala delle Asse

Elisabetta Rosina

Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura,  
Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito

## Introduzione

La documentazione, resa disponibile dagli studiosi e dai restauratori che hanno condotto la fase documentaria e conoscitiva dei materiali e del loro stato di conservazione<sup>1</sup>, ha permesso di accertare che i dipinti murali richiedono un intervento complesso, articolato e urgente. Alcune ipotesi sulle cause del degrado sono state formulate e verificate in una fase preliminare nel corso dei primi mesi del 2013, con lo scopo di indirizzare le successive analisi nei punti risultati più critici. Sulla base delle considerazioni emerse dall'analisi dello stato di conservazione e dell'avanzare del degrado si è predisposto un piano di indagini per verificare eventuali contenuti anomali di umidità nelle murature. Nonostante lo spessore delle murature e la mancanza di un diretto contatto con il terreno, la localizzazione del degrado alla base delle pareti del monocromo lasciava dubbi su possibili infiltrazioni di acqua; inoltre, data l'estensione delle parti interessate da efflorescenze saline sia sul monocromo sia in volta, si è tempestivamente<sup>2</sup> approntata la prima fase del monitoraggio microclimatico per rilevare pericolose variazioni di temperatura e umidità dell'aria che possano accelerare la diffusione dei sali solubili e aumentarne la perniciosità.

## L'indagine preliminare

Si è optato per l'uso di tecniche non invasive per rilevare la presenza di acqua nelle strutture: si è praticata un'iniziale scansione con

termografia all'infrarosso termico (IRT) in modalità passiva, per il rilievo di gradienti termici indicativi di superfici umide<sup>3-4</sup>. Nelle zone ritenute più significative si sono prelevati pochissimi campioni di malta di restauro per valutare il contenuto di acqua<sup>5</sup>, ed effettuare le analisi chimico fisiche composizionali (riportate in questo volume in *Una visione in più: il contributo della diagnostica CNR all'intervento di conservazione del Monocromo*). Per validare i dati raccolti, ci si è avvalsi anche di due tecniche innovative: la Risonanza Magnetica Unilaterale (NMR)<sup>6-7</sup> e la Dielettrometria in Campo Evanescente (EFD)<sup>8-9</sup>. Nel seguito si riassumono i risultati ottenuti, per brevità si rimanda a precedenti pubblicazioni scientifiche per la descrizione estesa delle metodologie utilizzate<sup>10-11</sup>.

## IRT e prove gravimetriche

Le prove termografiche realizzate nel maggio 2012 hanno mostrato una sostanziale omogeneità delle temperature superficiali. I modesti gradienti che si rilevano sono dovuti alla presenza della zoccolatura in materiale lapideo e della massa del solaio alla base della muratura<sup>12</sup>. Non si rilevano gradienti termici indicativi della presenza di anomali contenuti di acqua. Le prove gravimetriche comunque effettuate nei punti che sono risultati a temperatura inferiore hanno confermato contenuti di acqua di circa l'1%.

## NMR

I risultati di NMR unilaterale confermano contenuti molto bassi di acqua. Dopo la calibrazione dello strumento, ottenuta mediante la

## Indagini termoigrometriche preliminari e monitoraggio ambientale della sala delle Asse

Elisabetta Rosina

Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura,  
delle Costruzioni e Ambiente Costruito

La ricerca, resa disponibile dagli studiosi e restauratori che hanno condotto la diagnostica e conoscitiva dei materiali e del loro stato di conservazione<sup>1</sup>, ha permesso di individuare i dipinti murali che richiedono un intervento complesso, articolato e urgente. Le indagini sulle cause del degrado sono state condotte e verificate in una fase preliminare nei primi mesi del 2013, con l'obiettivo di indirizzare le successive analisi nei punti più critici. Sulla base delle conclusioni emerse dall'analisi dello stato di conservazione e dell'avanzare del degrado si è definito un piano di indagini per verificare l'eventuale presenza di anomalie ritenute anomali di umidità nelle murature nonostante lo spessore delle mura-razioni di un diretto contatto con il terreno e la realizzazione del degrado alla base del monocromo lasciava dubbi su eventuali infiltrazioni di acqua; inoltre, data la presenza delle parti interessate da efflorescenze sia sul monocromo sia in volta, si è approntata la prima fase di monitoraggio microclimatico per rilevare eventuali variazioni di temperatura e umidità che possano accelerare la diffusione e aumentare la perniciosità.

### Introduzione

L'uso di tecniche non invasive in presenza di acqua nelle strutture richiede un'iniziale scansione con

termografia all'infrarosso termico (IRT) in modalità passiva, per il rilievo di gradienti termici indicativi di superfici umide<sup>3-4</sup>. Nelle zone ritenute più significative si sono prelevati pochissimi campioni di malta di restauro per valutare il contenuto di acqua<sup>5</sup>, ed effettuare le analisi chimico fisiche composizionali (riportate in questo volume in *Una visione in più: il contributo della diagnostica CNR all'intervento di conservazione del Monocromo*). Per validare i dati raccolti, ci si è avvalsi anche di due tecniche innovative: la Risonanza Magnetica Unilaterale (NMR)<sup>6-7</sup> e la Dielettrometria in Campo Evanescente (EFD)<sup>8-9</sup>. Nel seguito si riassumono i risultati ottenuti, per brevità si rimanda a precedenti pubblicazioni scientifiche per la descrizione estesa delle metodologie utilizzate<sup>10-11</sup>.

### IRT e prove gravimetriche

Le prove termografiche realizzate nel maggio 2012 hanno mostrato una sostanziale omogeneità delle temperature superficiali. I modesti gradienti che si rilevano sono dovuti alla presenza della zoccolatura in materiale lapideo e della massa del solaio alla base della muratura<sup>12</sup>. Non si rilevano gradienti termici indicativi della presenza di anomalie contenute di acqua. Le prove gravimetriche comunque effettuate nei punti che sono risultati a temperatura inferiore hanno confermato contenuti di acqua di circa l'1%.

### NMR

I risultati di NMR unilaterale confermano contenuti molto bassi di acqua. Dopo la calibrazione dello strumento, ottenuta mediante la

## The Preliminary Thermo-Hygrometric Research and Environmental Monitoring of the Sala delle Asse

Elisabetta Rosina

Politecnico di Milano, Department of Civil and Environmental Engineering

### Introduction

The documentation provided by the scholars and restorers about the materials and their state of conservation<sup>1</sup> highlighted that the wall paintings were in need of a complex, structured, urgent intervention. A few theories about the cause of the deterioration were formulated and checked during a preliminary phase, the first months of 2013, focusing further research on the areas found to be most critical. On the basis of the observations on the analysis of the state of conservation and the advancement of deterioration, a research plan was prepared focused on discovering whether, and if so where, anomalous moisture content was present in the walls. In spite of the thickness of the walls and the absence of direct contact with the ground, the presence of deterioration at the base of the walls of the monochrome suggested the possibility of water infiltration. Moreover, given the extension of the areas of the monochrome and the vault affected by saline efflorescences, the initial phase of microclimatic monitoring started quickly<sup>2</sup> with the goal of detecting dangerous variations in temperature and air humidity that could accelerate the diffusion of soluble salts and increase its noxiousness.

### The Preliminary Research

The author planned the application of non-invasive techniques to detect the presence of water in the structures and an initial scan of passive infrared thermography (IRT) provide the

survey of thermal gradients, indicative of damp surfaces<sup>3-4</sup>. For the areas held to be most important, a very small number of restoration mortar samples were taken to assess water content<sup>5</sup> and carry out physical chemical compositions analyses (presented in the contribution *An Additional View: the Contribution of CNR Diagnostics to the Sala delle Asse Restoration* in this volume). Two innovative techniques were used to verify the collected data: unilateral nuclear magnetic resonance (NMR)<sup>6-7</sup> and evanescent field dielectrometry (EFD)<sup>8-9</sup>. The results obtained are summarised below. For reasons of brevity see the earlier scientific publications report the full description of the used methods<sup>10-11</sup>.

### IRT and Gravimetric Testing

The thermographic tests carried out in May 2012 revealed substantial surface temperature homogeneity. The modest gradients detected depend on the presence of the stone skirting board and the floor mass at the base of the walls<sup>12</sup>. No thermal gradients resulted indicative of the presences of anomalous water content. The gravimetric tests carried out in the points with a lower temperature confirmed water content of around 1%.

### NMR

The unilateral NMR results confirmed a very low water content. After the calibration of the tool through the experimental procedure<sup>13</sup> maximum water content values of 1-1.5% were obtained on the north-eastern and north-western walls under examination. The margin of error for the measurement was less

procedura sperimentale resa nota<sup>13</sup>, si sono ottenuti valori massimi di circa 1-1,5% di contenuto di acqua sulle murature nord-est e nord-ovest oggetto dell'indagine. L'errore delle misure è stato stimato inferiore al 10% del valore nominale. Le indagini sono state svolte da D. Capitani, N. Proietti e V. Di Tullio del laboratorio A.L. Segre del IMC – CNR, Roma.

#### EFD

La calibrazione dello strumento è avvenuta mediante la misura di valori massimi di contenuto di acqua ottenuti su di una piccola area, precedentemente imbevuta di acqua deionizzata e con validazione delle prove gravimetriche. Anche con questa tecnica i risultati del contenuto di acqua sono stati sempre inferiori all'1%. La mappa della distribuzione dell'indice di salinità risulta ugualmente omogenea, con valori non elevati nella parete nord-est e un poco superiori nella parete nord-ovest. Le prove sono state realizzate da R. Olmi, C. Rimini, S. Priori del IFAC – CNR di Firenze.

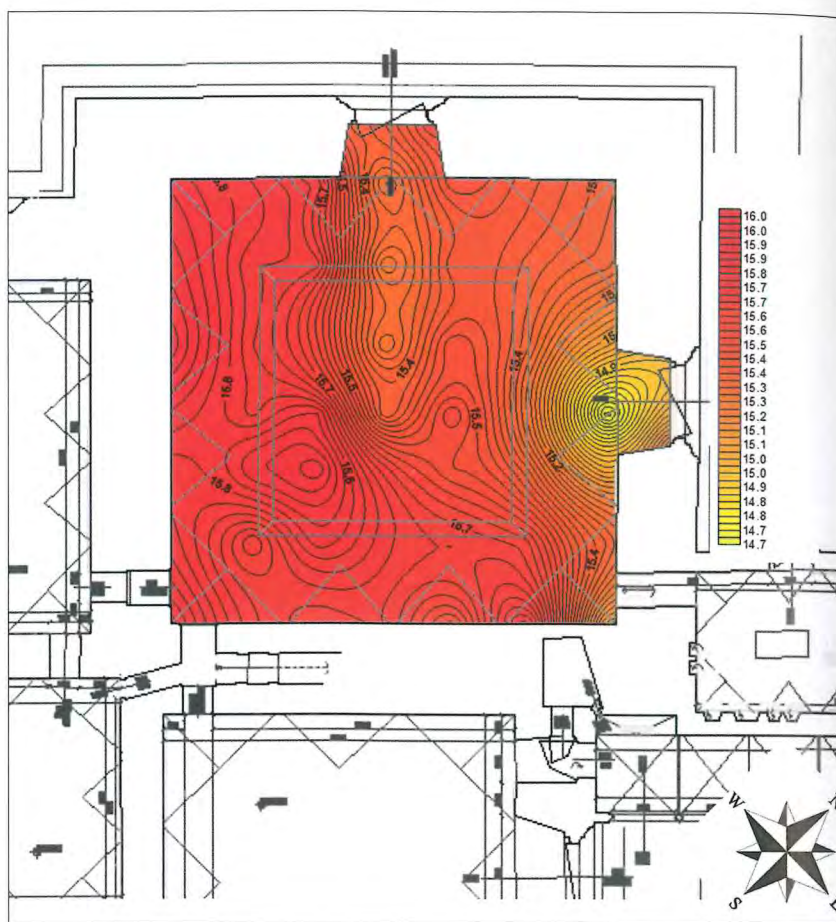
#### La verifica mediante luce radente e diffrazione X

In questa fase preliminare sono stati esaminati quattro campioni di intonaco del *Monocromo*, selezionati in base alla ricognizione della superficie con luce radente in corrispondenza di microscagliature ed efflorescenze biancastre. Le efflorescenze di sali solubili sono localizzate soprattutto nella porzione di muratura adiacente allo strombo della finestra nord-est e si sono formate avendo come substrato l'intonaco antico. I risultati della diffrattometria X mostrano la presenza di nitrato di sodio, gesso e solfati di magnesio che sono responsabili dei sollevamenti della pellicola pittorica e delle microscagliature.

Le prove sono state realizzate da A. Sansonetti dell'ICVBC – CNR di Milano.

#### I primi risultati e il proseguimento dei monitoraggi

La prima parte delle indagini ha quindi permesso di accertare che il degrado del *Monocromo* non è dovuto a infiltrazioni di acqua attive, ma è causato più probabilmente da sbilanciamenti microclimatici e dalla diffusione di sali solubili. Si ritiene che la provenienza dei sali possa essere la matrice cementizia delle malte



1. Mappatura della Temperatura (°C), 19 dicembre 2013 ore 16; dati esterni: Temperatura 4.4°C, Umidità Relativa 97.8%, pioggia. Durante la giornata si rileva un incremento delle temperature di circa 0.8°C, quindi si tratta di un modesto aumento. La distribuzione dei picchi non varia rispetto alla mattina, si segnala solo un'altra disomogeneità della distribuzione della temperatura in prossimità della finestra a sud-ovest e che le differenze di temperatura delle diverse zone sono un po' più marcate (gradiente di circa 1.2°C)

Temperature mapping (°C) on 19 December 2013 at 4 pm; outside data: temperature 4.4°C, relative humidity 97.8%, rain. During the day, the temperature increased by a modest 0.8°C. The distribution of peaks did not vary with respect to the morning; another inhomogeneity of T °C near the south-western window and the difference in temperature between the various zones was around 1.2°C

di restauro e i prodotti utilizzati per la pulitura in precedenti interventi. In effetti, anche la localizzazione dei punti in cui il degrado appare più evidente e grave (vicino alla finestra della parete nord-est) indica che ulteriori indagini vanno indirizzate al controllo del microclima

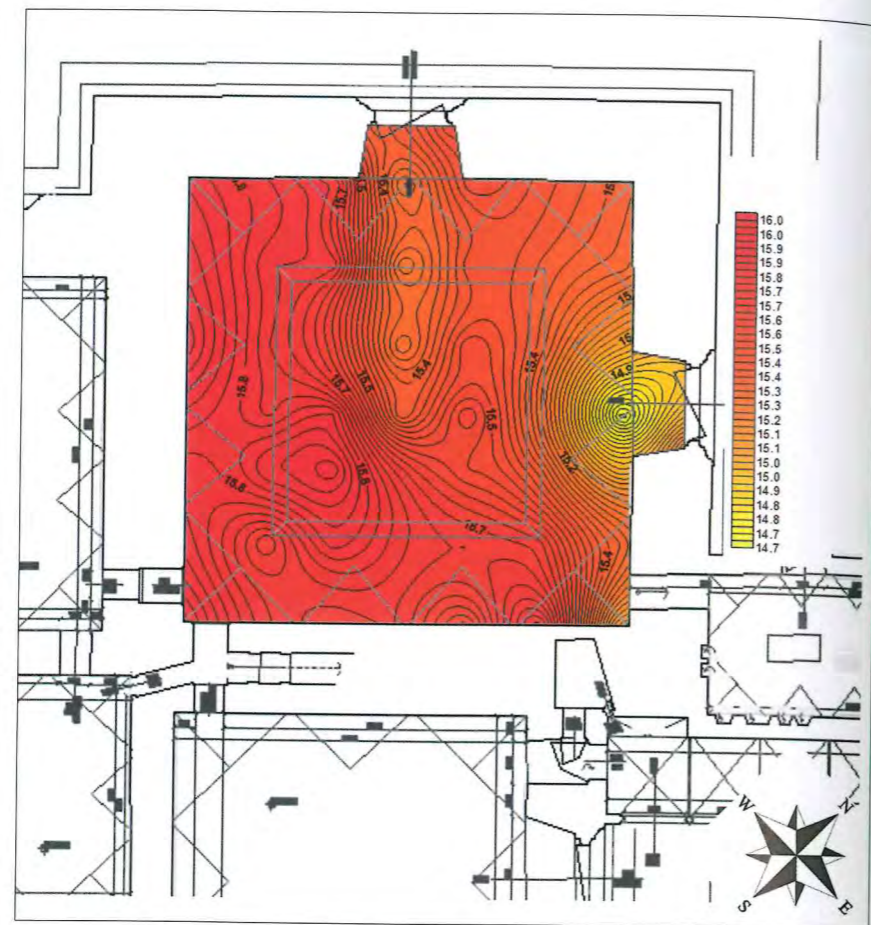
ura sperimentale resa nota<sup>13</sup>, si sono i valori massimi di circa 1-1,5% di con- di acqua sulle murature nord-est e est oggetto dell'indagine. L'errore delle è stato stimato inferiore al 10% del va- rinale. Le indagini sono state svolte da ani, N. Proietti e V. Di Tullio del labora- .. Segre del IMC – CNR, Roma.

razione dello strumento è avvenuta e la misura di valori massimi di conte- acqua ottenuti su di una piccola area, ntemente imbevuta di acqua deioniz- on validazione delle prove gravimetri- che con questa tecnica i risultati del to di acqua sono stati sempre inferiori a mappa della distribuzione dell'indi- linità risulta ugualmente omogenea, ri non elevati nella parete nord-est e superiori nella parete nord-ovest. Le no state realizzate da R. Olmi, C. Rimi- riori del IFAC – CNR di Firenze.

a mediante luce radente e diffrazione X a fase preliminare sono stati esamina- o campioni di intonaco del *Monocromo*, ati in base alla ricognizione della su- on luce radente in corrispondenza di gliature ed efflorescenze biancastre. escenze di sali solubili sono localiz- rattutto nella porzione di muratura e allo strombo della finestra nord-est formate avendo come substrato l'in- ntico. I risultati della diffrattometria X o la presenza di nitrato di sodio, gesso i magnesio che sono responsabili dei enti della pellicola pittorica e delle gliature. sono state realizzate da A. Sansonetti C – CNR di Milano.

## sultati e il proseguimento toraggi

parte delle indagini ha quindi per- accertare che il degrado del *Monocro-* dovuto a infiltrazioni di acqua attive, sato più probabilmente da sbilancia- croclimatici e dalla diffusione di sali i ritiene che la provenienza dei sali ere la matrice cementizia delle malte

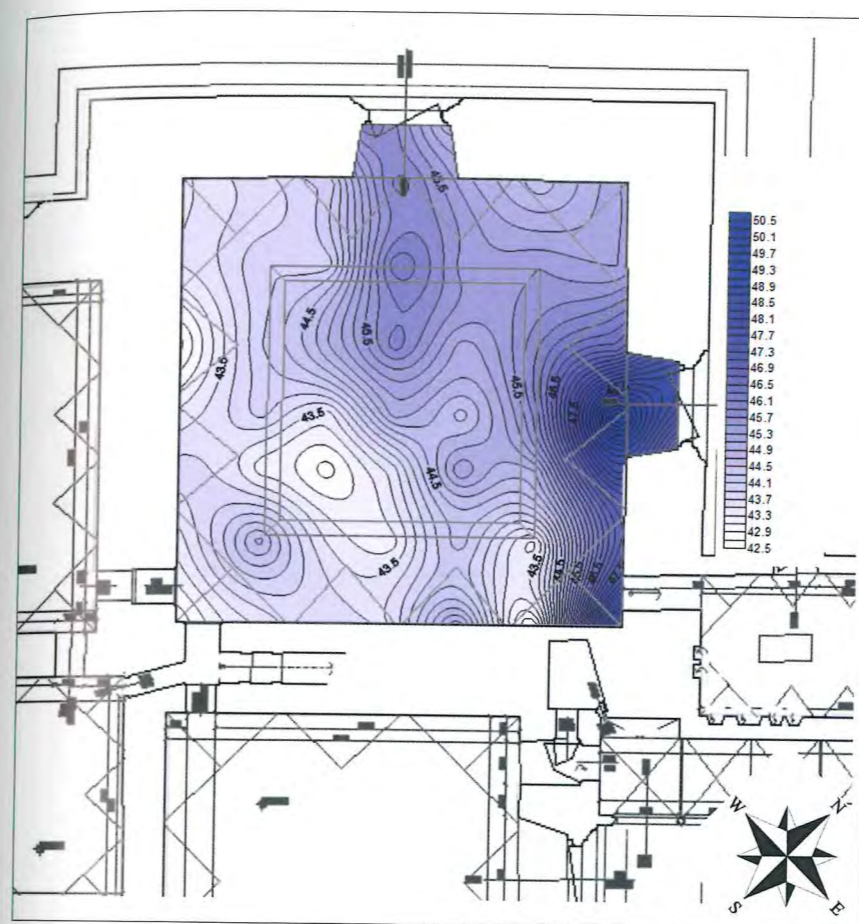


1. Mappatura della Temperatura (°C), 19 dicembre 2013 ore 16; dati esterni: Temperatura 4.4°C, Umidità Relativa 97.8%, pioggia. Durante la giornata si rileva un incremento delle temperature di circa 0.8°C, quindi si tratta di un modesto aumento. La distribuzione dei picchi non varia rispetto alla mattina, si segnala solo un'altra disomogeneità della distribuzione della temperatura in prossimità della finestra a sud-ovest e che le differenze di temperatura delle diverse zone sono un po' più marcate (gradiente di circa 1.2°C)

Temperature mapping (°C) on 19 December 2013 at 4 pm; outside data: temperature 4.4°C, relative humidity 97.8%, rain.

During the day, the temperature increased by a modest 0.8°C. The distribution of peaks did not vary with respect to the morning; another inhomogeneity of T °C near the south-western window and the difference in temperature between the various zones was around 1.2°C

di restauro e i prodotti utilizzati per la pulitura in precedenti interventi. In effetti, anche la localizzazione dei punti in cui il degrado appare più evidente e grave (vicino alla finestra della parete nord-est) indica che ulteriori indagini vanno indirizzate al controllo del microclima



2. Mappatura dell'Umidità Relativa (%) del giorno 19 dicembre 2013 alle ore 16; dati esterni: temperatura 4.4°C, Umidità Relativa 97.8%, pioggia. Si rileva un gradiente di UR rispetto alla mattina, che segna un incremento massimo dell'8%, rilevato in prossimità della finestra sud-ovest e della porta che permette l'accesso alla saletta a nord-est. Si tratta comunque di valori molto contenuti, intorno al 40-43%. La mappa della distribuzione dell'US è molto simile a quella della distribuzione di UR, anche per l'US si rilevano valori molto contenuti (mediamente 4 gr/mc)

Map of Relative Humidity (%) on 19 December 2013 at 4 pm; outside data: temperature 4.4°C, Relative Humidity 97.8%, rain.

With respect to the morning, the RH increased 8%, near the south-western window and the door opening onto the small room to the north-east. The values were, however, very low, around 40-43%. The map of SH distribution is very similar to that of RH distribution, the values for SH also being very low (on average, 4 gr/mc)

than 10% of the nominal value. The research was carried out by D. Capitani, N. Proietti and V. Di Tullio from the A. L. Segre laboratory of the IMC – CNR, Rome.

## EFD

The tool was calibrated through the measurement of maximum water content values obtained from a small area, previously soaked in deionized water, and validation of the gravimetric tests. With this technique as well, the water content was also found to be less than 1%. The map of the salt index distribution resulted equally homogeneous, with modest values in the north-eastern wall and values a bit higher in the north-western wall. The testing was carried out by R. Olmi, C. Riminesi and S. Priori of the IFAC – CNR in Florence.

## Grazing Light and X Diffraction

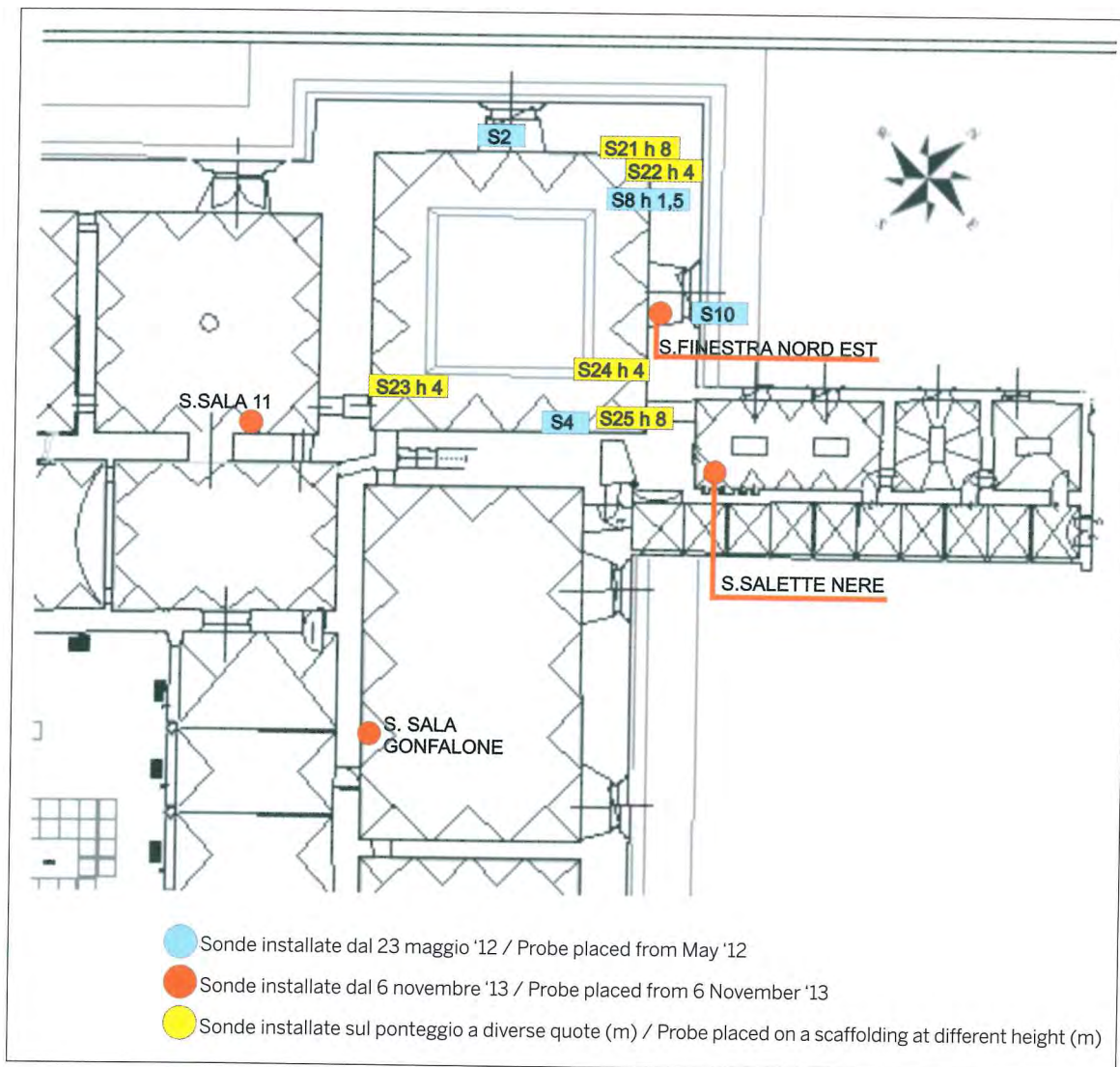
During this preliminary phase, four samples from the monochrome were examined, selected based on study of the surface under grazing light in the areas of microflaking and whitish efflorescences.

The soluble salt efflorescences are primarily located in the area of the wall adjacent to the splaying of the north-eastern window on the old plaster. The results of the X diffraction revealed the presence of sodium nitrate, calcium and magnesium sulphates, responsables for the detachments of the paint surface and microflaking.

The testing was carried out by A. Sansonetti of the ICVBC – CNR in Milan.

## The Initial Results and the Continuation of Monitoring

The first phase of research thus made it possible to ascertain that the deterioration of the monochrome was not due to active water infiltrations, to rather more probably microclimatic imbalances and the diffusion of soluble salts. It was thought that the salts might be coming from the cement matrix of the restoration mortar and from the products using during previous cleaning interventions. In fact, the location of the points where the deterioration seems most evident and severe (near the window on the north-eastern wall) indicates that further research needs to focus on the microclimate and checking the mixing ratio in the windows, due to the probable lack of window and door seals and the holes opened to install the aspiration plant.



e alla verifica del rapporto di mescolanza in prossimità delle finestre, a causa della probabile mancanza di tenuta dei serramenti.

I primi risultati del monitoraggio hanno infatti già permesso di spiegare parzialmente la dinamica della ventilazione naturale nella sala, e per raccogliere ulteriori informazioni che confermassero le prime indicazioni si è proceduto ad allargare la zona di indagine alle sale contigue, oltre che a raffinare la rete dei sensori installati e a ripetere stagionalmente una serie di battute psicrometriche nel secondo e terzo anno. La finalità dell'indagine psicrometrica è di valutare gli sbilanciamenti di Temperatura ( $T$  °C) e Umidità (UR e US) che si possono verificare all'interno della sala e definire i valori soglia che permettano l'ottimale conservazione delle preziose superfici storiche in opera.

#### Psicrometria

Per installare le sonde aggiuntive nei punti più significativi si è proceduto a verificare gli sbi-

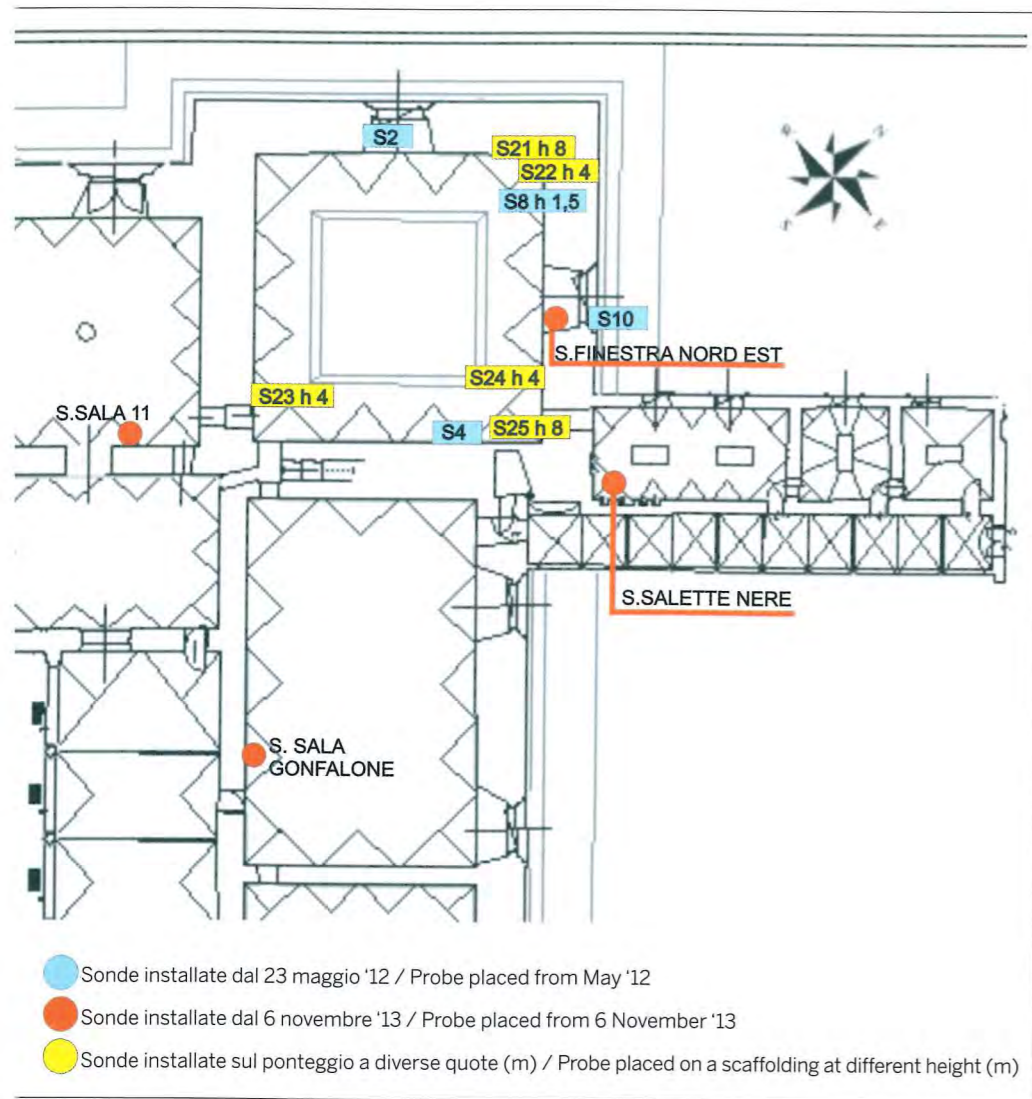
lanci mediante battute psicrometriche, ripetute più volte al giorno, a cadenza stagionale<sup>14</sup>. A scopo esemplificativo si illustrano le mappe ottenute nel dicembre 2013 (figg. 1-2).

#### Monitoraggio microclimatico

Nella seconda fase delle indagini, alle iniziali quattro sonde installate nella sala sono state aggiunte altre otto sonde, distribuite a più altezze oltre che nei locali adiacenti (sala del Gonfalone, Salette Nere, fig. 3).

Risulta infatti evidente anche dalle analisi psicrometriche che le zone in cui gli sbilanciamenti sono più frequenti si trovano in prossimità delle finestre e delle porte che conducono ad altri locali meno isolati dall'esterno. I risultati hanno posto in evidenza che la sonda localizzata nell'imbotte della finestra nord-est rileva variazioni simili a quelle che si verificano all'esterno (con un ritardo di circa 2-3 ore), ma di minor ampiezza (escursioni giornaliere fino a circa 3°C in tarda primavera





3.  
Localizzazione delle sonde nella seconda fase del monitoraggio microclimatico  
Location of the probes for the second phase of microclimatic monitoring

ica del rapporto di mescolanza in delle finestre, a causa della probabi- a di tenuta dei serramenti. lti del monitoraggio hanno infatti so di spiegare parzialmente la di- la ventilazione naturale nella sala, ogliere ulteriori informazioni che ero le prime indicazioni si è proce- argare la zona di indagine alle sale tre che a raffittire la rete dei sensori a ripetere stagionalmente una serie psicrometriche nel secondo e terzo alità dell'indagine psicrometrica è gli sbilanciamenti di Temperatura dità (UR e US) che si possono verifi- rno della sala e definire i valori so- mettano l'ottimale conservazione se superfici storiche in opera.

lanci mediante battute psicrometriche, ripe- tute più volte al giorno, a cadenza stagionale<sup>14</sup>. A scopo esemplificativo si illustrano le mappe ottenute nel dicembre 2013 (figg. 1-2).

#### Monitoraggio microclimatico

Nella seconda fase delle indagini, alle iniziali quattro sonde installate nella sala sono sta- te aggiunte altre otto sonde, distribuite a più altezze oltre che nei locali adiacenti (sala del Gonfalone, Salette Nere, fig. 3). Risulta infatti evidente anche dalle anali- si psicrometriche che le zone in cui gli sbi- lanciamenti sono più frequenti si trovano in prossimità delle finestre e delle porte che con- ducono ad altri locali meno isolati dall'esterno. I risultati hanno posto in evidenza che la sonda localizzata nell'imbotte della finestra nord-est rileva variazioni simili a quelle che si verificano all'esterno (con un ritardo di cir- ca 2-3 ore), ma di minor ampiezza (escursioni giornaliere fino a circa 3°C in tarda primavera

From the initial monitoring results, it was in fact already possible to partially explain the dynamic of the natural ventilation in the room. To gather further information that could confirm the initial indications, the area of investigation was expanded to include the contiguous rooms; the network of installed sensors was increased and a series of psy- chometric readings was carried out season- ally in the second and third years. The goal of the psychrometric research was to assess the Temperature (T °C) and Humidity (RH and SH) imbalances in the room and define the threshold values for the optimal conser- vation of the priceless historical surfaces under examination.

#### Psychrometry

To install the additional probes in the most ap- propriate spots, the imbalances were checked seasonally multiple times per day using psy- chometry<sup>14</sup>. As an example, the paper reports the maps obtained in December 2013 (figs. 1, 2).

#### Microclimatic Monitoring

During the second phase of research, eight additional probes were added to the initial four, and were set up at different heights as well as in the adjacent rooms (Sala del Gon- falone, Salette Nere, fig. 3).

In fact, the psychrometric analysis also re- vealed that the zones with the most fre- quent imbalances are near the windows and the doors that lead to rooms less isolated from the outdoors. The results demonstrat- ed that the probe set up in the intrados of the north-western window detected varia- tions similar to those found outside (with a delay of two and three hours). To a lesser ex- tent (daily ranges around 3°C in late spring, whereas in summer, autumn, winter and early spring, the measured gradient could reach 7–8°C), while, on the contrary, the oth- er probes installed along the walls but far from the windows registered slow, gradu- al variations (daily ranges up to 1°C). The probe installed on the north-east wall close to the monochrome and the one installed in the intrados of the north-eastern window registered values wholly similar to those de- tected by the other probes in the room, far from the windows. The two probes installed near the two windows thus registered very

different values, in spite of the windows be- ing the same size and having frames of the same type and from the same period.

Over the year, the Relative Humidity (RH) va- lues in the room varied between 30% and 70% and the greatest variations were registered near the north-western window, where the imbalances could cause RH ranges of even 20% in just a few hours. The other probes measured less frequent, smaller and, above all, slower variations. Daily oscillations were registered of up to 10%, with very low average daily values (30%) especially during the winter months of 2012–2013. During the same years, from April to September, the values were high- er on average, and remained between 40% and 60%. In 2014, on the contrary, high values were registered even during the winter, often above 70%. During the summer of 2014, values above 70% were also often registered, due to long pe- riods of rain, violent storms and high-speed winds. The data registered on the scaffolding, at heights of 4 and 8 metres, is substantially homogeneous with the exception of that gath- ered by probe no. 23, which detected higher temperatures, around 0.5–1.5°C.

Finally, out of the entire area under study, the temperatures were closest to those outdoors in the Salette Nere (in the winter measuring only 3–5°C above the outdoor one), where there were, obviously, the greatest variations in RH. As a consequence, the passageway between the Salette Nere and the Sala delle Asse permits air from the outside to enter the room, the effects of which must be mitigated. Therefore, the conditions inside the space are substantially homogeneous, at all heights, with the exception of the areas where, as previously noted, air enters from outside (either through the north-eastern window or through the door that communicates with Room 11 and, above all, the Salette Nere).

As an example, the paper report the T°C and RH data measured by the probes between 21 July and 16 September 2013 (figs. 4 and 5).

#### Discussion of the Results

The probes installed in the Sala delle Asse revealed uniformity of the values measured along the walls, while the one installed in the

mentre in estate, nei mesi autunnali/invernali e inizio primavera il gradiente misurato può raggiungere i 7-8°C); al contrario, le altre sonde installate lungo le pareti, ma lontano dalle finestre, registrano variazioni lente e graduali (escursioni giornaliere fino a 1°C). La sonda installata sulla parete nord-est in prossimità del monocromo e quella installata nell'imbotte della finestra nord-est registrano valori del tutto simili a quelli rilevati dalle altre sonde all'interno del locale, discoste dalle finestre. Le due sonde installate in prossimità delle due finestre registrano quindi valori molto diversi tra loro, pur essendo in prossimità di aperture delle stesse dimensioni e con serramenti uguali e della stessa epoca.

Nel corso dell'anno solare i valori di UR variano tra il 30 e il 70% all'interno della sala, e le maggiori variazioni si misurano in prossimità della finestra nord-ovest, ove gli squilibri possono comportare escursioni di UR anche oltre il 20% in poche ore. Le altre sonde misurano variazioni meno frequenti, più ridotte e soprattutto più lente. Si registrano oscillazioni giornaliere fino al 10%, con valori medi giornalieri molto bassi (30%) soprattutto nei mesi invernali del 2012-2013. Negli stessi anni, dal mese di aprile fino a settembre, i valori sono mediamente più elevati, e rimangono contenuti tra il 40 e il 60%. Al contrario nel 2014 si registrano valori elevati anche in inverno, spesso oltre il 70%. Nei mesi estivi del 2014 si registrano frequentemente valori anche oltre il 70% a causa delle prolungate piogge, accompagnate da violenti temporali e venti di elevata velocità. Considerando i dati registrati dalle sonde posizionate sul ponteggio, alle quote di 4 e 8 m, è possibile riscontrare una sostanziale omogeneità dei dati tranne che per le misure raccolte dalla sonda n. 23: si rilevano temperature superiori sempre, circa 0,5-1,5°C.

Infine, nelle Salette Nere si rilevano temperature più vicine a quelle esterne di tutta l'area considerata (in inverno si misurano solo 3-5°C in più rispetto all'esterno) e ovviamente le maggiori variazioni di UR. Pertanto il passaggio esistente tra le Salette Nere e la sala delle Asse permette l'immissione nella sala di flussi di aria esterna i cui effetti devono essere mitigati.

Si ritiene quindi che all'interno del locale ci siano sostanzialmente condizioni omogenee, a qualunque altezza, tranne nelle zone in cui,

come già osservato, si verificano flussi di aria provenienti dall'esterno (o attraverso la finestra nord-ovest o dalla porta che comunica con la sala 11 e, soprattutto, le Salette Nere).

A scopo esemplificativo si mostrano i grafici di T°C e UR misurate dalle sonde dal 21 luglio al 16 settembre 2013 (figg. 4-5).

## Discussione dei risultati

Le sonde installate all'interno della sala delle Asse hanno mostrato una buona uniformità dei valori misurati lungo le pareti, mentre quella installata nell'imbotte della finestra nord-ovest (sonda n. 2) ha registrato dati che mostrano una variabilità maggiore rispetto alle altre, a causa della poca tenuta del serramento dei fori praticati per l'installazione dell'impianto di aspirazione e, probabilmente, della direzione preminente dei venti in quella zona. Infatti, durante i temporali estivi del 2014 le variazioni sono state particolarmente rapide. Anche in prossimità della porta che conduce alle Salette Nere si verifica una situazione analoga. Tuttavia le variazioni misurate sono minori rispetto a quelle registrate nell'imbotte della finestra sia per ampiezza, sia per frequenza. Evidentemente il volume delle salette mitiga e ritarda i flussi di aria provenienti dall'esterno prima che raggiungano la sala delle Asse. All'interno di sala delle Asse l'ampiezza dell'area in cui si verificano le maggiori variazioni non è estesa. Infatti è molto raro che tali variazioni possano essere correlate a eventuali sbilanciamenti al centro del locale o lungo le pareti più lontane.

I risultati del monitoraggio microclimatico permettono di rilevare che sussistono condizioni non favorevoli alla conservazione per prolungati periodi di pioggia (ad esempio estate e tardo autunno 2014), se si considerano gli standard di temperatura e UR della normativa vigente per i musei<sup>14</sup>.

La successiva fase di elaborazione dei dati ha consentito di estrapolare il numero delle variazioni che sono da considerare di estremo rischio per la solubilizzazione dei sali e per la loro cristallizzazione sulle preziose superfici. In particolare si sono analizzati i dati del monitoraggio in relazione alla curva di cristallizzazione del sale più diffuso sul monocromo,

ne, nei mesi autunnali/invernali vera il gradiente misurato può essere di -8°C); al contrario, le altre sonde registrano variazioni lente e gradualmente giornaliere fino a 1°C). La sonda installata nella parete nord-est in prossimità della porta e quella installata nell'imbottitura nord-est registrano valori del gradiente locale, discoste dalle finestre. Le sonde installate in prossimità delle due porte registrano quindi valori molto diversi essendo in prossimità di aperture di diverse dimensioni e con serramenti di diversa stessa epoca.

Per tutto l'anno solare i valori di UR variano tra il 40% al 70% all'interno della sala, e le variazioni si misurano in prossimità della parete nord-ovest, ove gli squilibri possono essere più evidenti. Le altre sonde misurano escursioni di UR anche oltre 10% al giorno, con valori medi giornalieri bassi (30%) soprattutto nei mesi invernali del 2012-2013. Negli stessi anni, dal gennaio fino a settembre, i valori sono stati più elevati, e rimangono contenuti tra il 50% e il 60%. Al contrario nel 2014 i valori sono stati elevati anche in inverno, con valori medi del 70%. Nei mesi estivi del 2014 si registrano frequentemente valori anche oltre il 70% delle prolungate piogge, accompagnate da venti di elevata intensità. Considerando i dati registrati dalle sonde sul ponteggio, alle quote di 10 e 20 metri è possibile riscontrare una sostanziale correlazione tra i dati tranne che per le misurazioni della sonda n. 23: si rilevano temperature sempre, circa 0,5-1,5°C.

Nella Sala delle Salette Nere si rilevano temperature simili a quelle esterne di tutta l'area (in inverno si misurano solo in prossimità all'esterno) e ovviamente grandi variazioni di UR. Pertanto il passaggio tra le Salette Nere e la sala delle Asse permette l'immissione nella sala di aria esterna i cui effetti devono essere valutati. Quindi che all'interno del locale ci siano inizialmente condizioni omogenee, a seconda dell'altezza, tranne nelle zone in cui,

come già osservato, si verificano flussi di aria provenienti dall'esterno (o attraverso la finestra nord-ovest o dalla porta che comunica con la sala 11 e, soprattutto, le Salette Nere).

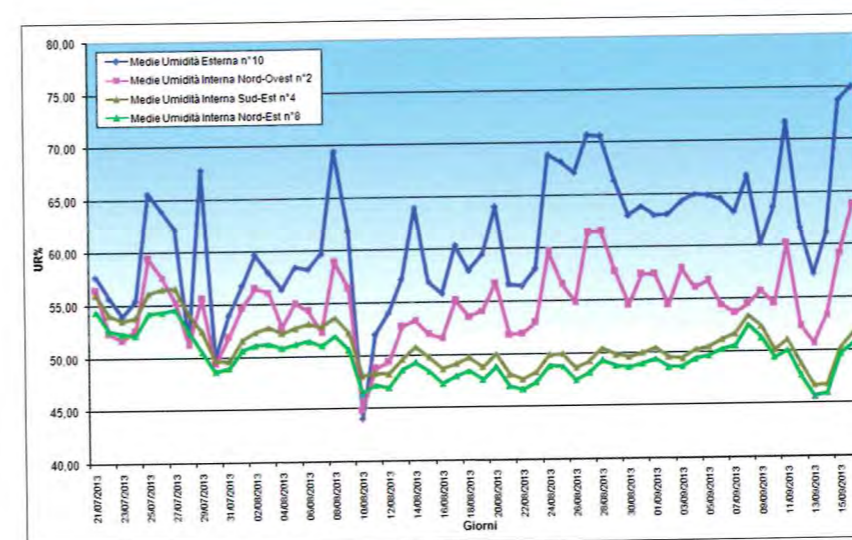
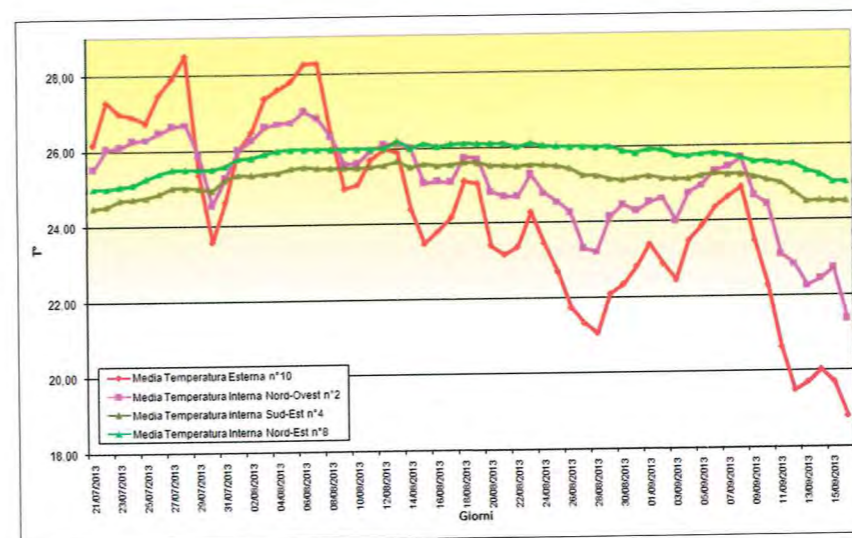
A scopo esemplificativo si mostrano i grafici di temperatura e UR misurate dalle sonde dal 21 luglio al 16 settembre 2013 (figg. 4-5).

### Discussione dei risultati

Le sonde installate all'interno della sala delle Asse hanno mostrato una buona uniformità dei valori misurati lungo le pareti, mentre quella installata nell'imbottitura della finestra nord-ovest (sonda n. 2) ha registrato dati che mostrano una variabilità maggiore rispetto alle altre, a causa della poca tenuta del serramento dei fori praticati per l'installazione dell'impianto di aspirazione e, probabilmente, della direzione preminente dei venti in quella zona. Infatti, durante i temporali estivi del 2014 le variazioni sono state particolarmente rapide. Anche in prossimità della porta che conduce alle Salette Nere si verifica una situazione analoga. Tuttavia le variazioni misurate sono minori rispetto a quelle registrate nell'imbottitura della finestra sia per ampiezza, sia per frequenza. Evidentemente il volume delle salette mitiga e ritarda i flussi di aria provenienti dall'esterno prima che raggiungano la sala delle Asse. All'interno di sala delle Asse l'ampiezza dell'area in cui si verificano le maggiori variazioni non è estesa. Infatti è molto raro che tali variazioni possano essere correlate a eventuali sbilanciamenti al centro del locale o lungo le pareti più lontane.

I risultati del monitoraggio microclimatico permettono di rilevare che sussistono condizioni non favorevoli alla conservazione per prolungati periodi di pioggia (ad esempio estate e tardo autunno 2014), se si considerano gli standard di temperatura e UR della normativa vigente per i musei<sup>14</sup>.

La successiva fase di elaborazione dei dati ha consentito di estrapolare il numero delle variazioni che sono da considerare di estremo rischio per la solubilizzazione dei sali e per la loro cristallizzazione sulle preziose superfici. In particolare si sono analizzati i dati del monitoraggio in relazione alla curva di cristallizzazione del sale più diffuso sul monocromo,



4. Grafico delle medie giornaliere dei valori di Temperatura dal 21 luglio al 16 settembre 2013

Graphic of the average daily temperature values from 21 July to 16 September 2013

5. Grafico delle medie giornaliere dei valori di Umidità Relativa (UR) dal 21 luglio al 16 settembre 2013

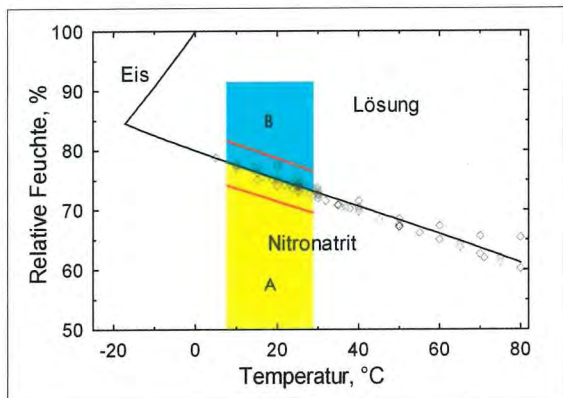
Graphic of the average daily relative humidity (RH) values from 21 July to 16 September 2013

intrados of the north-western window (probe no. 2) registered data showing greater variability with respect to the others, due to the poorly sealed opening, the mentioned holes, and, probably, the prevalent direction of the wind in that area. In fact, during the summer storms in 2014, the variations were especially fast. A similar situation was detected near the door leading to the Salette Nere. However, the measured variations are of lesser extent and frequency than those registered in the window intrados. The volume of the Salette apparently mitigates and delays the flow of air from the outside before it reaches the Sala delle Asse. Inside the Sala delle Asse, the area in which the greatest variations were verified is not extensive. In fact, it is only very rarely that such variations can be correlated to possible imbalances in the centre of the room or along the farther walls.

The microclimatic monitoring results reveal that conditions have been unfavourable to conservation during long periods of rain (for

example during the summer and late fall in 2014), considering current temperature and RH standards regulating museum practice<sup>14</sup>. The subsequent phase of data processing made it possible to extrapolate the number of variations to be considered high risk for the solubilisation of salts and their crystallisation on the priceless surfaces. In particular, the monitoring data was analysed relative to the crystallisation curve for the most common salt on the monochrome, sodium nitrate (NaNO<sub>3</sub>). The equilibrium diagram of the analysed compound (fig. 6)<sup>15</sup> was used to define the values of the critical line that marks the transformation of the precipitation of the solute into a solution and vice versa (and so the possible formation of efflorescence). The frequency of the events was then calculated, the resulting figure being very low (ten occurrences). Nevertheless, although the most common salt is sodium nitrate, there are also other salts in the mix, even if in smaller proportion. In the case of a mixture of salts the conditions for solubilisation and crystallisation change<sup>16-17</sup>, the RH threshold values decrease, therefore the interval to be considered at risk for cycles of solubilisation/crystallisation increases. Moreover, the curve used to determine the number of events that carry risk of deterioration was obtained by modelling the behaviour of the materials to the change of the microclimatic conditions. Even though based on experimental results, the data was in any case obtained in the laboratory and not directly within the conditions and from the materials of the Sala delle Asse. Hence, it is preferable to consider the data indicating possible critical events within a broader interval, which was established at +/-5% with respect to the crystallisation curve, based on the researchers' previous experience.

The first step was to determine the maximum and minimum T°C and RH values, considering the first year of monitoring, during which the hourly values measured were more similar to those registered during the preceding decade, and so held to be more representative of climate conditions over the long term. In fig. 6, the coloured area indicates that all of the acquired values fell between a minimum T°C of 8°C and a maximum of 29°C; the maximum RH detected was 91.5%, and the minimum 21%. Of interest with respect to the research

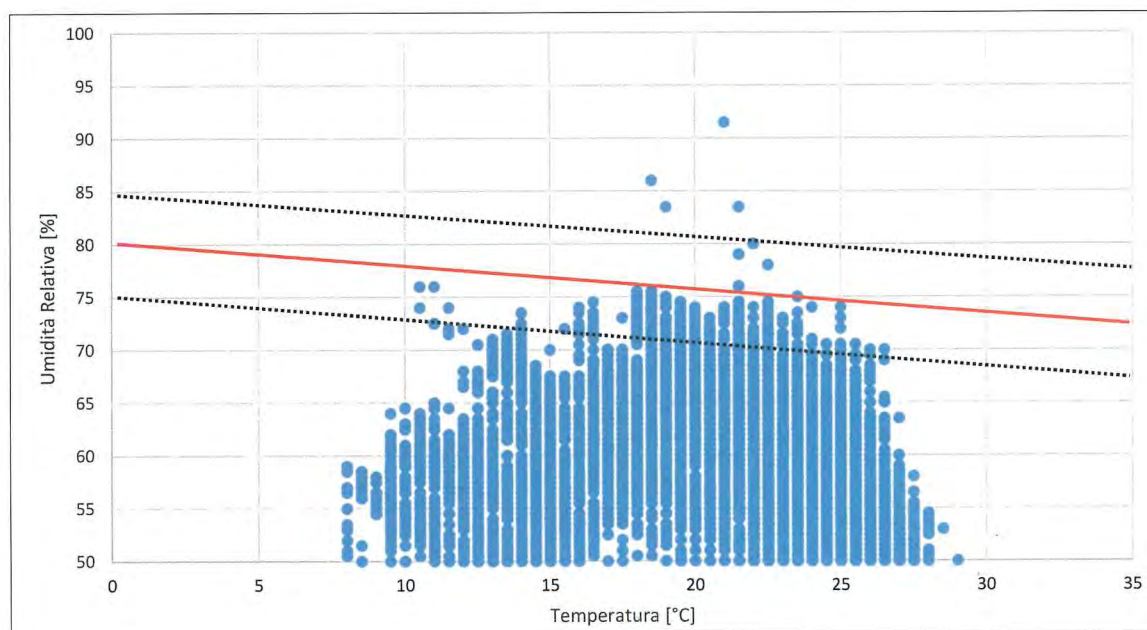


il nitrato di sodio ( $\text{NaNO}_3$ ). Utilizzando il diagramma di stato del composto analizzato (fig. 6)<sup>15</sup> sono stati definiti i valori della retta critica che segna il passaggio in soluzione e viceversa la precipitazione del soluto e quindi la possibile formazione di efflorescenze. Si è quindi calcolata la frequenza degli eventi, e il numero risultato è esiguo (10 occorrenze). Tuttavia si deve considerare che benché il sale più diffuso sia il nitrato di sodio, sono comunque presenti altri sali in miscela, sia pur in proporzioni minori; in presenza di una miscela di sali le condizioni per la solubilizzazione e per la cristallizzazione cambiano<sup>16-17</sup> e in genere si osserva che i valori soglia di UR si abbassano, quindi l'intervallo da ritenere di rischio di cicli di solubilizzazione/cristallizzazione salina si amplia. Inoltre, la curva utilizzata per determinare il numero di eventi che comporta rischio di degrado è ottenuta mediante modellazione del comportamento dei materiali al mutare delle condizioni microclimatiche. Anche se si basa su risultati sperimentali, si tratta comunque di

dati ottenuti in laboratorio e non direttamente nelle condizioni e sui materiali di sala delle Asse. È quindi preferibile considerare come possibili eventi critici i dati entro un intervallo più ampio, che si è stabilito del +/-5% rispetto alla curva di cristallizzazione, sulla base delle esperienze pregresse dei ricercatori.

In prima battuta si sono determinati i valori di  $T^\circ\text{C}$  e UR massimi e minimi considerando il primo anno di monitoraggio, in cui si sono misurati valori orari più simili a quelli registrati nel precedente decennio, e quindi ritenuti più significativi dell'andamento climatico nel lungo periodo. In fig. 6, l'area colorata indica che tutti i valori acquisiti sono compresi tra una  $T^\circ\text{C}$  minima pari a  $8^\circ\text{C}$  e una massima di  $29^\circ\text{C}$ ; l'UR massima riscontrata è pari al 91,5%, la minima è il 21%. Di interesse ai fini dello studio sono i passaggi di stato che avvengono tra due valori, definiti da  $T^\circ\text{C}$  e UR, acquisiti a distanza di un'ora, che appartengono quindi a due insiemi diversi (A solido e B liquido).

Inoltre, è visibile anche la fascia che si è definita di sicurezza (delimitata dai segmenti rossi), pari a +/- 5% del termine noto della retta di cristallizzazione, che include i punti che potrebbero essere con alta probabilità occorrenze dei fenomeni di transizione. Il grafico riportato in fig. 7 mostra che la maggioranza dei punti acquisiti dalla sonda n. 2, identificati dai valori della temperatura (asse X) e dell'Umidità Relativa (asse Y), si trovano sotto la retta che segna il passaggio di fase, e sotto la fascia di sicurezza inferiore. Alla presenza dei passaggi di stato si associano 261 punti localizzati nel-

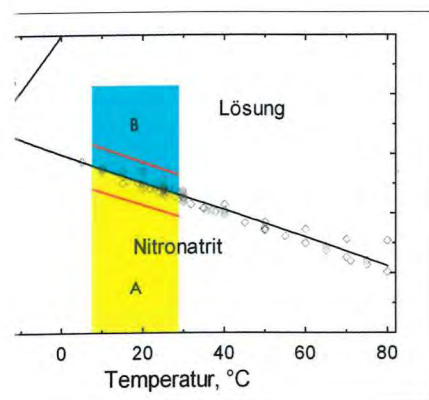


6. Curva di cristallizzazione del nitrato di sodio [www.saltwiki.net/](http://www.saltwiki.net/) Hans-JuegenSchwarz)

Sodium nitrate crystallisation curve (source [www.saltwiki.net/](http://www.saltwiki.net/)) Hans-JuegenSchwarz)

7. Grafico della dispersione dei dati acquisiti dal maggio 2012 al 10 maggio 2013 dalla sonda n. 2

Graphic of the dispersion of data acquired from probe no. 2 between May 2012 and 10 May 2013

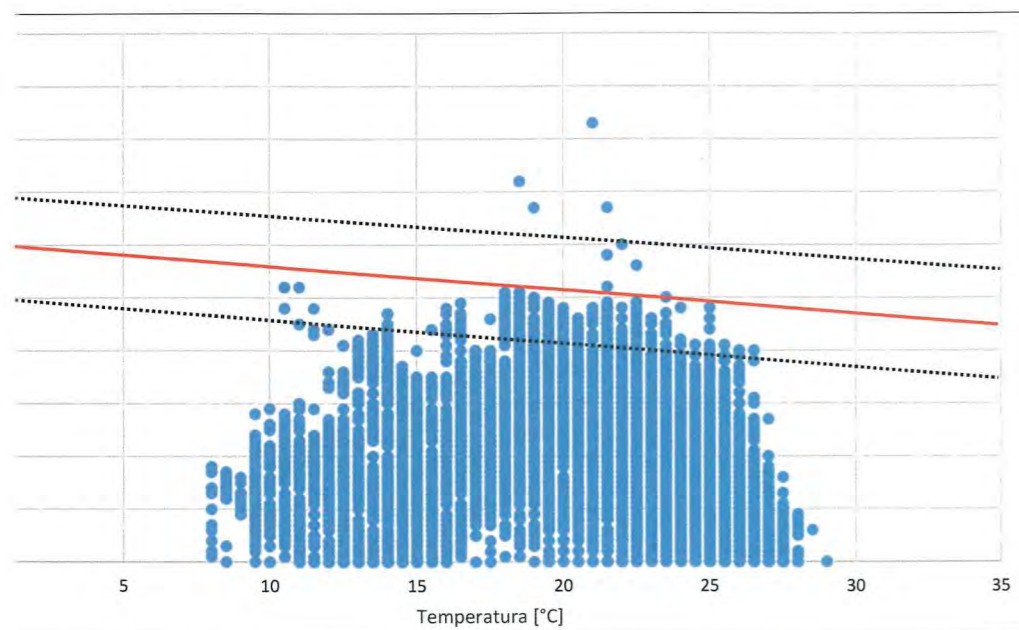


sodio ( $\text{NaNO}_3$ ). Utilizzando il diagramma del composto analizzato (fig. 6) sono definiti i valori della retta critica per il passaggio in soluzione e viceversa, la solubilizzazione del soluto e quindi la posizione di efflorescenze. Si è quindi determinata la frequenza degli eventi, e il numero medio annuo (10 occorrenze). Tuttavia si è osservato che benché il sale più diffuso sia quello di sodio, sono comunque presenti anche altri sali, sia pur in proporzioni minime. La presenza di una miscela di sali influisce sulla solubilizzazione e per la cristallizzazione salina si amplia la gamma di UR si abbassano, quindi si può ritenere di rischio di cicli di soluzione/cristallizzazione salina si amplia. La curva utilizzata per determinare i valori critici è stata determinata per eventi che comporta rischio di deumidità mediante modellazione del comportamento dei materiali al mutare delle condizioni microclimatiche. Anche se si basano su dati sperimentali, si tratta comunque di

dati ottenuti in laboratorio e non direttamente nelle condizioni e sui materiali di sala delle Asse. È quindi preferibile considerare come possibili eventi critici i dati entro un intervallo più ampio, che si è stabilito del +/-5% rispetto alla curva di cristallizzazione, sulla base delle esperienze pregresse dei ricercatori.

In prima battuta si sono determinati i valori di  $T^\circ\text{C}$  e UR massimi e minimi considerando il primo anno di monitoraggio, in cui si sono misurati valori orari più simili a quelli registrati nel precedente decennio, e quindi ritenuti più significativi dell'andamento climatico nel lungo periodo. In fig. 6, l'area colorata indica che tutti i valori acquisiti sono compresi tra una  $T^\circ\text{C}$  minima pari a  $8^\circ\text{C}$  e una massima di  $29^\circ\text{C}$ ; l'UR massima riscontrata è pari al 91,5%, la minima è il 21%. Di interesse ai fini dello studio sono i passaggi di stato che avvengono tra due valori, definiti da  $T^\circ\text{C}$  e UR, acquisiti a distanza di un'ora, che appartengono quindi a due insiemi diversi (A solido e B liquido).

Inoltre, è visibile anche la fascia che si è definita di sicurezza (delimitata dai segmenti rossi), pari a +/- 5% del termine noto della retta di cristallizzazione, che include i punti che potrebbero essere con alta probabilità occorrenze dei fenomeni di transizione. Il grafico riportato in fig. 7 mostra che la maggioranza dei punti acquisiti dalla sonda n. 2, identificati dai valori della temperatura (asse X) e dell'Umidità Relativa (asse Y), si trovano sotto la retta che segna il passaggio di fase, e sotto la fascia di sicurezza inferiore. Alla presenza dei passaggi di stato si associano 261 punti localizzati nel-



6. Curva di cristallizzazione del nitrato di sodio (fonte [www.saltwiki.net/Hans-JuegenSchwarz](http://www.saltwiki.net/Hans-JuegenSchwarz))

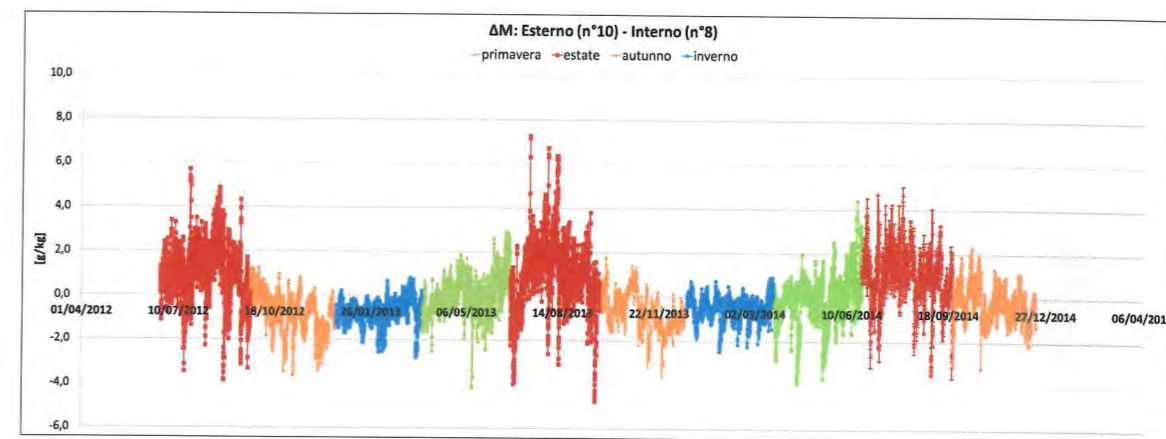
Sodium nitrate crystallisation curve (source [www.saltwiki.net/Hans-JuegenSchwarz](http://www.saltwiki.net/Hans-JuegenSchwarz))

7. Grafico della dispersione dei dati acquisiti dal 23 maggio 2012 al 10 ottobre 2013 dalla sonda n. 2

Graphic of the dispersion of data acquired from probe no. 2 between 23 May 2012 and 10 October 2013

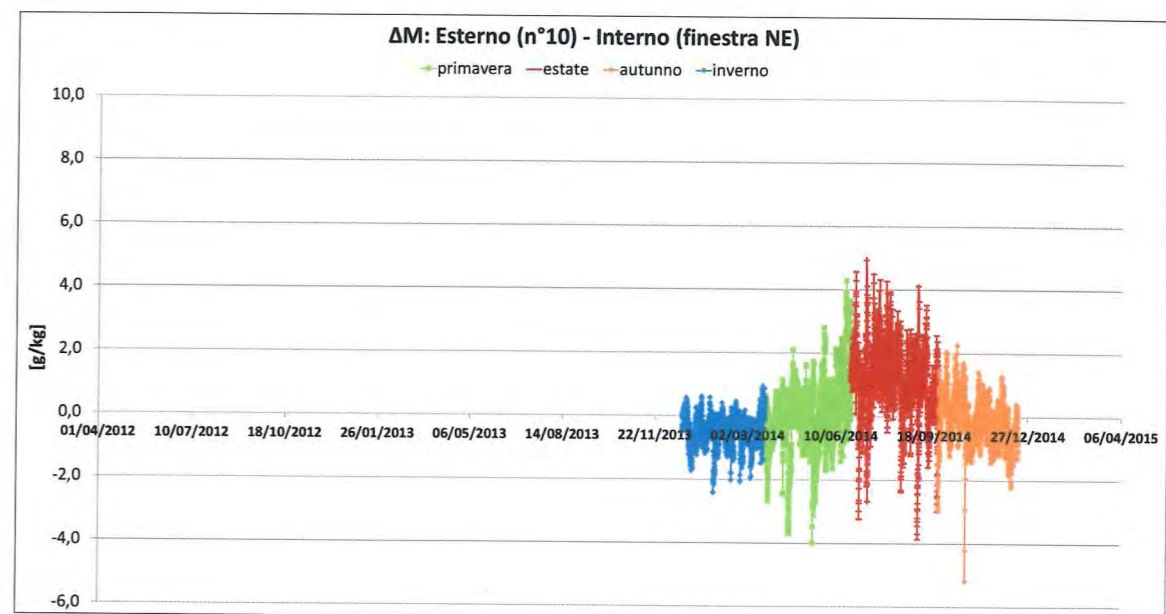
8. Differenze di rapporto di mescolanza esterno (sonda n. 10) - interno (sonda n. 8) rappresentate contro il tempo in ascissa

Differences in outside (probe no. 10) and inside mixing ratios (probe no. 8) represented with respect to the time on the abscissa



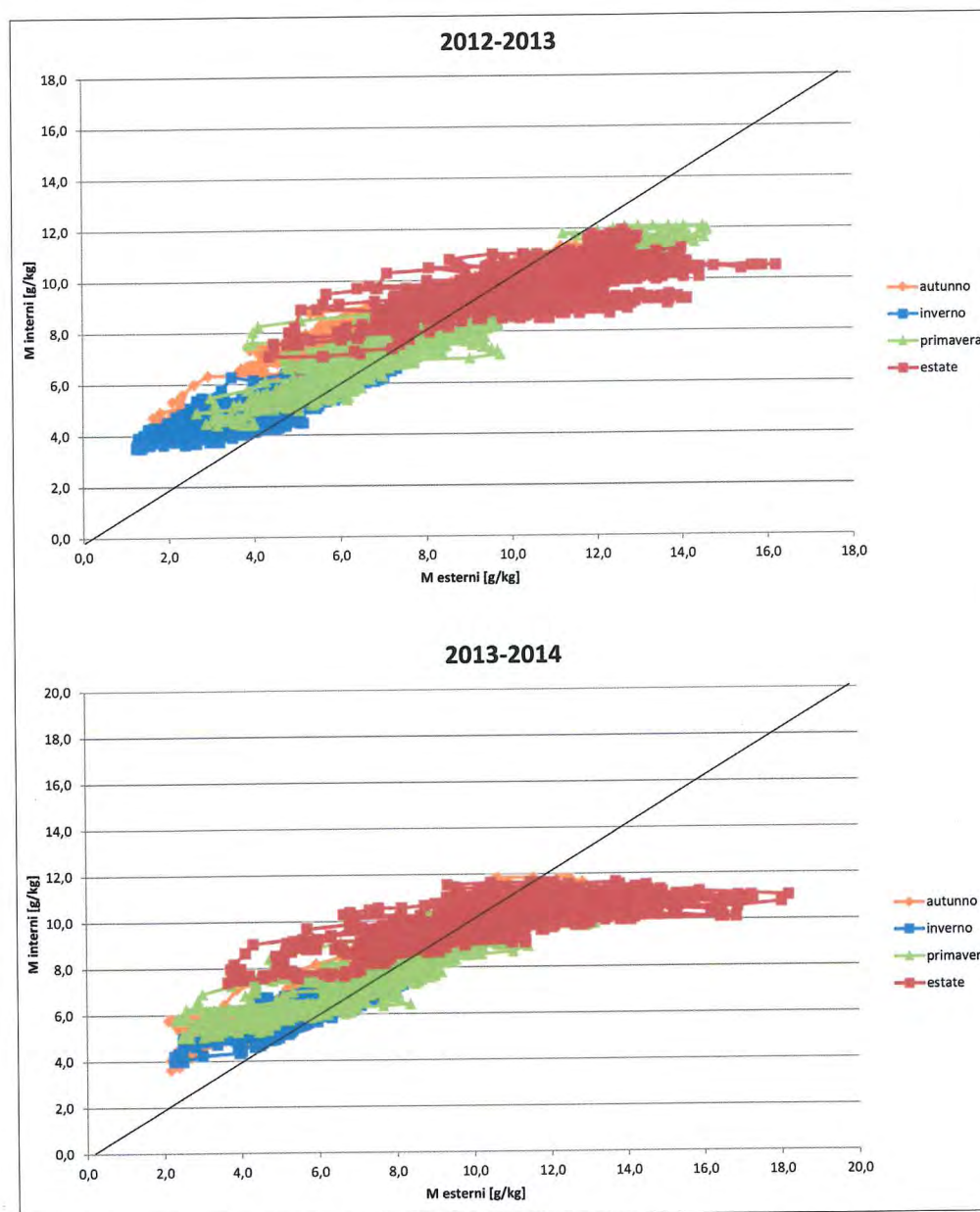
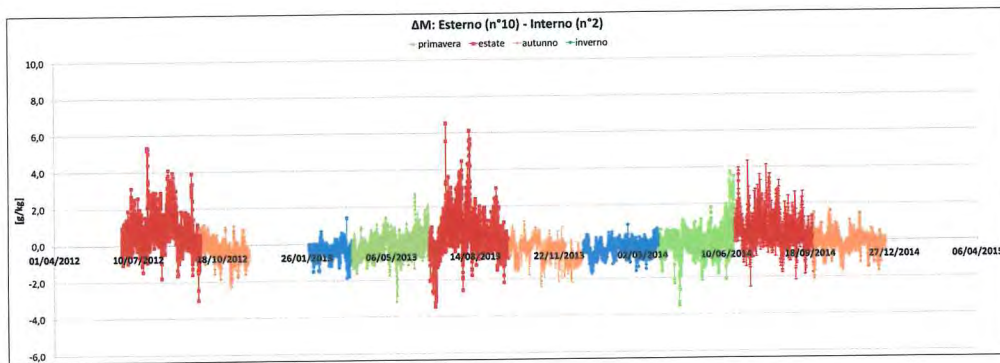
9. Differenze di rapporto di mescolanza esterno (sonda n. 10) - interno (sonda finestra nord-est) rappresentate contro il tempo in ascissa

Differences in outside (probe no. 10) and inside mixing ratios (north-east window probe) represented with respect to the time on the abscissa



aims were the changes in state that took place between two values, in terms of  $T^\circ\text{C}$  and RH, acquired at a distance of one hour, belonging to two different groups (A solid and B liquid). Moreover, the safety zone (delimited by the red segments) is also visible, equal to +/- 5% of the known end of the crystallisation line, which includes the points that could be with high probability occurrences of transition phenomena. The graphic presented in fig. 7 shows that the majority of the points acquired by probe no. 2, identified by the temperature values (X axis) and the Relative Humidity values (Y axis), are below the line marking the phase transition, and below the lower safety zone. The presence of changes in state is associated with 261 points located in the critical zone, which are more frequently found in correspondence with critical events. The ten transition events all took place between May and July, while for the data located in the critical zone, the period during which occurrences were most frequent was between

April and October. Since the air conditioning systems are always turned off, and since management of the room and visits to the room does not vary over the course of the year, the hypothesis that the measured variations are driven by those outside is considered to be confirmed. Comparison of the data registered inside with those registered outside confirmed that almost all of the considered events are in correspondence with RH increments, more than 80%, for numerous consecutive hours. However, no correlations were detected when the variations were fast. For verification, the external/internal air mixing ratios were measured<sup>18</sup> on the basis of values measured by the external probe and three internal probes (figs. 8, 9, 10, 11, 12, 13). As can be seen in the graphics, the values of the mixing ratios show a similar trend for the three probes under examination. The peaks and greatest differences were registered during the summer (red) and late spring (green). The differences between the mixing values were more modest during



la zona critica, i quali si trovano più spesso in corrispondenza degli eventi critici. I dieci eventi di transizione sono tutti localizzati tra maggio, giugno e luglio, mentre per i dati posti nella fascia critica il periodo di occorrenza più frequente si estende da aprile a ottobre. Poiché gli impianti di climatizzazione sono sempre spenti, e poiché le modalità di gestione della sala e

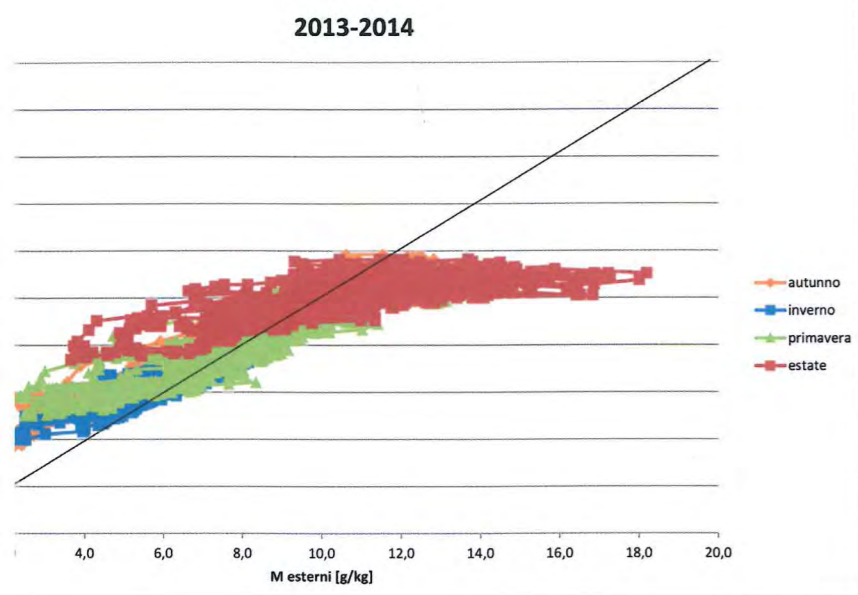
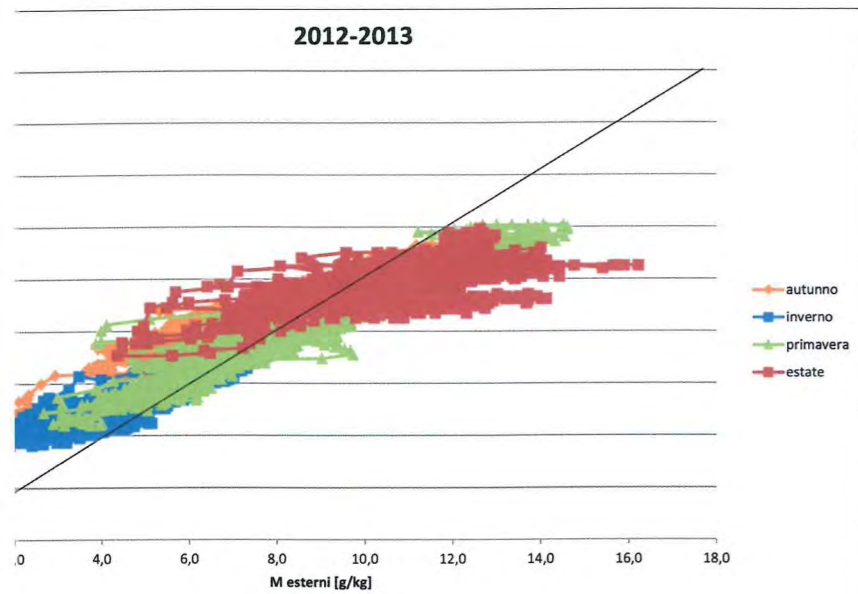
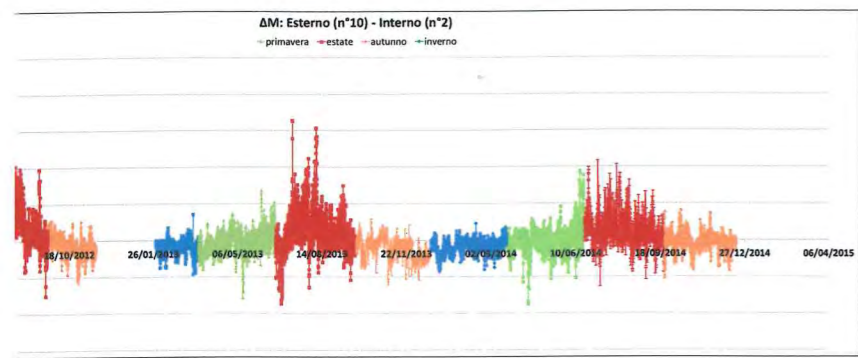
di visita della sala non sono variate nel corso dell'anno si è ritenuto confermato che le variazioni misurate fossero indotte da quelle esterne. Confrontando i dati rilevati all'interno con quelli esterni, si è verificato che quasi tutti gli eventi considerati si trovano in corrispondenza di incrementi di UR, oltre l'80%, per diverse ore consecutive. Non si rilevano invece correlazio-

10. Differenze di rapporto di mescolanza esterno (sonda n. 10) - interno (sonda n. 2) rappresentate contro il tempo in ascissa

Differences in outside (probe no. 10) and inside mixing ratios (probe no. 2) represented with respect to the time on the abscissa

11a-11b. Rapporto di mescolanza esterno (sonda n. 10) in ascissa - interno (sonda n. 8) in ordinata, anno 2012-2013 (a), 2013-2014 (b)

Outside mixing ratio (probe no. 10) on the abscissa; inside mixing ratio (probe no. 8) on the ordinate, year 2012-2013 (a), 2013-2014 (b)



a, i quali si trovano più spesso in za degli eventi critici. I dieci even- ne sono tutti localizzati tra mag- gliolo, mentre per i dati posti nella il periodo di occorrenza più fre- ende da aprile a ottobre. Poiché gli imatizzazione sono sempre spen- modalità di gestione della sala e

di visita della sala non sono variate nel corso dell'anno si è ritenuto confermato che le varia- zioni misurate fossero indotte da quelle ester- ne. Confrontando i dati rilevati all'interno con quelli esterni, si è verificato che quasi tutti gli eventi considerati si trovano in corrispondenza di incrementi di UR, oltre l'80%, per diverse ore consecutive. Non si rilevano invece correlazio-

10. Differenze di rapporto di mescolanza esterno (sonda n. 10) - interno (sonda n. 2) rappresentate contro il tempo in ascissa

Differences in outside (probe no. 10) and inside mixing ratios (probe no. 2) represented with respect to the time on the abscissa

11a-11b. Rapporto di mescolanza esterno (sonda n. 10) in ascissa - interno (sonda n. 8) in ordinata, anno 2012-2013 (a), 2013-2014 (b)

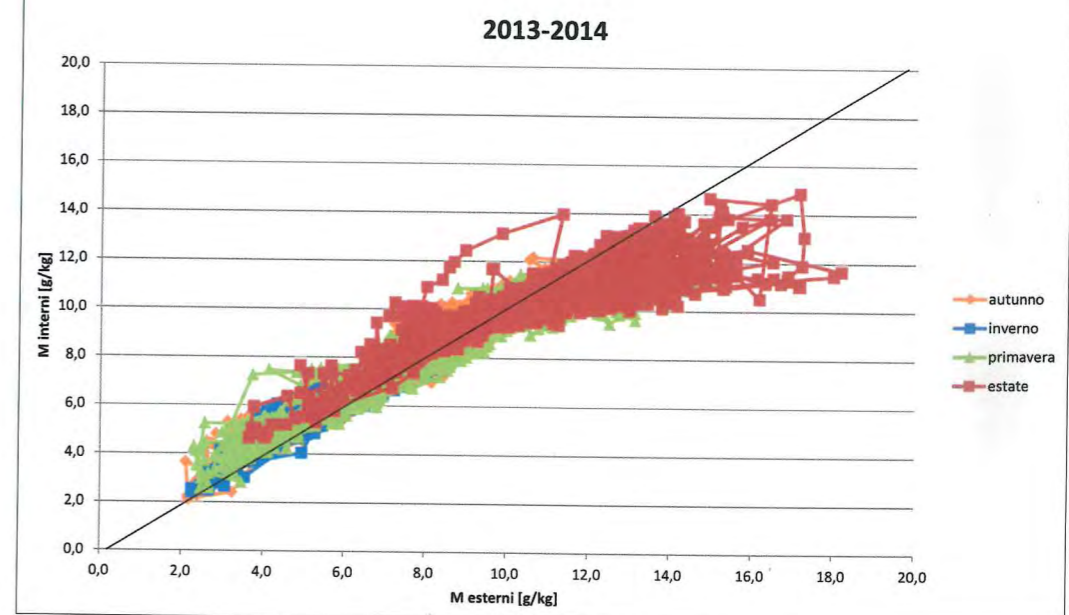
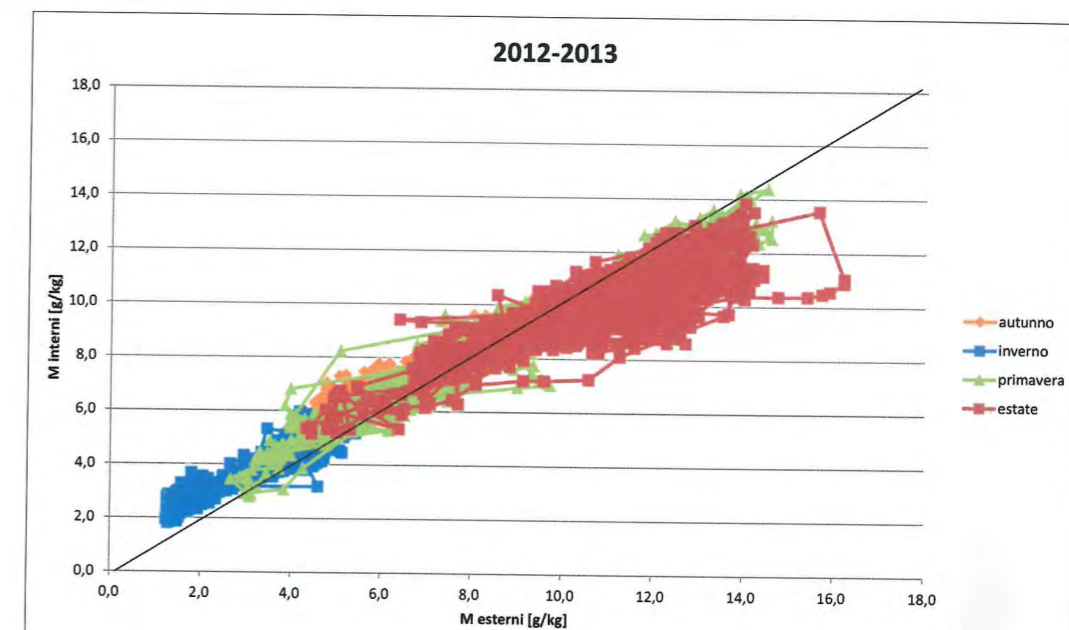
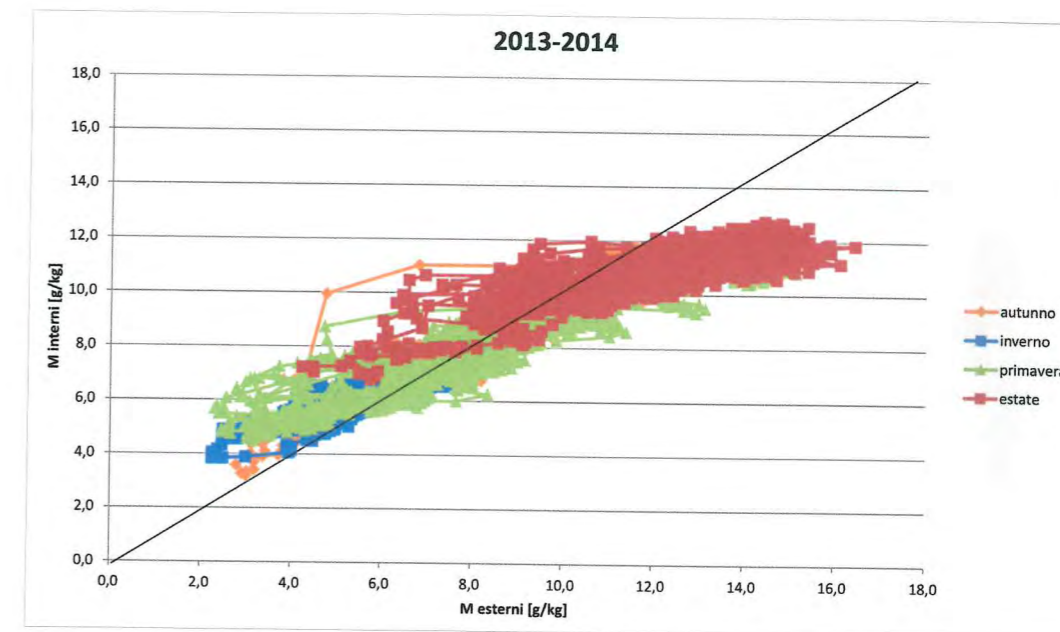
Outside mixing ratio (probe no. 10) on the abscissa; inside mixing ratio (probe no. 8) on the ordinate, year 2012-2013 (a), 2013-2014 (b)

12. Rapporto di mescolanza esterno (sonda n. 10) in ascissa - interno (sonda finestra nord-est) in ordinata

Outside mixing ratio (probe no. 10) on the abscissa; inside mixing ratio (north-east window probe) on the ordinate

13a. - 13b. Rapporto di mescolanza esterno (sonda n. 10) in ascissa - interno (sonda n. 2) in ordinata, anno 2012-2013 (a), 2013-2014 (b)

Outside mixing ratio (probe no. 10) on the abscissa; inside mixing ratio (probe no. 2) on the ordinate, year 2012-2013 (a), 2013-2014 (b)



ni quando le variazioni sono rapide. Per verifica si sono calcolati i rapporti di mescolanza dell'aria esterna/interna<sup>18</sup> sulla base dei valori misurati dalla sonda esterna e da tre sonde interne (figg. 8, 9, 10, 11, 12, 13). Come visibile dai grafici, i valori dei rapporti di mescolanza mostrano un andamento simile per le tre sonde in esame; i picchi e le differenze maggiori si rilevano in corrispondenza della stagione estiva (colore rosso) e alla fine della primavera (in verde). Nelle stagioni autunnali (arancione) e in particolare invernali (azzurro), le differenze tra i valori di mescolanza sono più contenute. Questi risultati sono in accordo con la localizzazione degli eventi critici di formazione di sali, confermando che il periodo di occorrenza più frequente si estende da aprile a ottobre.

## Conclusioni

Le indagini sinora condotte hanno permesso di accertare che non sussistono infiltrazio-

ni attive di acqua nelle strutture, e quindi la prevenzione di ulteriori degradi, una volta terminato l'intervento di restauro, è fondamentalmente affidata al controllo microclimatico. Il monitoraggio tuttora in corso ha permesso di verificare che si registrano sbilanciamenti termoigrometrici influenzati dalle variazioni esterne soprattutto nei periodi più caldi e in cui, probabilmente, la direzione e intensità dei venti predominanti è tale da provocare maggiori infiltrazioni di aria attraverso le aperture sia in sala delle Asse sia negli ambienti adiacenti.

Le prime indicazioni per eliminare i fattori di rischio che si possono trarre, nonostante i monitoraggi siano ancora in corso, sono quindi inerenti la gestione dell'ambiente interno di sala delle Asse e il miglioramento dell'efficienza delle chiusure verticali trasparenti, al fine di eliminare scambi con l'esterno, limitare i non voluti ricambi di aria e garantire un microclima omogeneo in prossimità delle superfici dipinte.

## Ringraziamenti

Si ringraziano le collaboratrici Elke Di Flumeri e Silvia Erba.

<sup>1</sup> In particolare sono state utili le ricerche condotte da Carolina Di Biase e Laura Basso e le relazioni tecniche di Maria Teresa Fiorio e Anna Lucchini oltre alle osservazioni e indicazioni del comitato scientifico e dei restauratori

<sup>2</sup> Il monitoraggio microclimatico preliminare è iniziato nel maggio 2012.

<sup>3</sup> E. Rosina, *Indicazioni metodologiche per la valutazione degli scambi termoigrometrici tra murature e ambiente*, in E. Rosina (a cura di), *Contributi di ricerca e didattica per la conservazione del Castello di Malpaga*, Cinisello Balsamo 2008, pp. 87-97.

<sup>4</sup> N. Ludwig, F. Luzi, R. Ricca (a cura di), *La termografia: teoria e applicazioni*, Point Veterinaire Italie, Milano 2015.

<sup>5</sup> E. Rosina, *Le analisi microclimatiche e del regime termoigrometrico delle murature*, in S. Gizzi, S. Della Torre, A. Casula, E. Rosina (a cura di), *Il Canopolo di Sassari, da casa professa a pinacoteca. Storia e restauri*, Cinisello Balsamo 2009, pp. 59-75.

<sup>6</sup> D. Capitani, V. Di Tullio, N. Proietti, *Nuclear Magnetic Resonance to Characterize and Monitor Cultural Heritage*, in *Prog. Nucl. Magn. Reson. Spectrosc.*, LXIV, 2012, pp. 29-69.

<sup>7</sup> N. Proietti, D. Capitani, E. Rossi, S. Cozzolino, A.L. Segre, *Unilateral NMR study of a XVI century wall painted*, in "Journal of Magnetic Resonance", 186, 2007, pp. 311-318.

<sup>8</sup> R. Olmi, M. Bini, A. Ignesti, S. Priori, C. Riminesi, A. Felici, *Diagnostics and monitoring of frescoes using evanescent-field dielectrometry*, in "Measurement Science and Technology", XVII, 8, 2006, pp. 2281-2288.

<sup>9</sup> R. Olmi, C. Riminesi, *Study of water mass transfer dynamics in frescoes by dielectric spectroscopy*, in "Il Nuovo Cimento", XXXI, C, n. 3, pp. 389-402.

<sup>10</sup> N. Proietti, D. Capitani, V. Di Tullio, R. Olmi, S. Priori, C. Riminesi, A. Sansonetti, F. Tasso, E. Rosina, "MOdiHMA at Sforza Castle in Milano: Innovative Techniques for Moisture

Detection in Historical Masonry, in *Built Heritage 2013, Monitor, Conservation, Management*, a cura di L. Toniolo, atti del Convegno (Milano, 18-20 novembre 2013), Milano 2015, ed. Centro per Conservazione dei Beni Culturali del Politecnico di Milano, pubblicazione on-line, pp. 1-6

<sup>11</sup> N. Proietti, D. Capitani, V. Di Tullio, R. Olmi, S. Priori, C. Riminesi, A. Sansonetti, F. Tasso, E. Rosina, *MOdiHMA at Sforza Castle in Milano: Innovative Techniques for Moisture Detection in Historical Masonry*, in *Built Heritage Monitoring Conservation Management*, a cura di L. Toniolo, M. Boriani, G. Guidi, Svizzera 2015, pp. 187-197.

<sup>12</sup> V. Pracchi, E. Rosina, *Effetti della temperatura superficiale della pavimentazione sul degrado dei rivestimenti e sul microclima*, in atti del XXII Convegno *Scienza e beni Culturali Pavimentazioni storiche: uso e conservazione* (Bressanone, 11-14 luglio 2006), Venezia 2006, pp. 453-462.

<sup>13</sup> V. Di Tullio, N. Proietti, M. Gobbino, D. Capitani, R. Olmi, S. Priori, C. Riminesi, E. Giani, 2010. *Non-destructive mapping of dampness and salts in degraded wall paintings in hypogeous buildings: the case of St. Clement at mass fresco in St. Clement Basilica, Rome*, in "Anal. Bioanal. Chem.", 396, 2010, pp. 1885-1896.

<sup>14</sup> UNI 10829:1999. Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi

<sup>15</sup> [www.saltwiki.net/Hans-Juegen\\_Schwarz](http://www.saltwiki.net/Hans-Juegen_Schwarz).

<sup>16</sup> A. Sawdy, C. Price, *Salt damage at Cleeve Abbey, England. Part I: a comparison of theoretical prediction and practical observation*, in "Journal of Cultural Heritage", VI, 2, 2005, pp. 125-135.

<sup>17</sup> A. Sawdy, C. Price, *Salt damage at Cleeve Abbey, England. Part II: seasonal variability of salt distribution and implications for sampling strategies*, in "Journal of Cultural Heritage", VI, 4, 2005, pp. 361-367.

<sup>18</sup> D. Camuffo et alii, *Past, present and future effects of climate change on a wooden inlay bookcase cabinet: a new methodology inspired by the novel European Standard EN*, in "Journal of Cultural Heritage", XV, 2014, pp. 26-35.



variazioni sono rapide. Per verificare i rapporti di mescolanza interna<sup>18</sup> sulla base dei valori della sonda esterna e da tre sonde (8, 9, 10, 11, 12, 13). Come visibile dai valori dei rapporti di mescolanza l'andamento simile per le tre sonde e i picchi e le differenze maggiori si corrispondono alla stagione estiva (agosto) e alla fine della primavera (in maggio) e stagioni autunnali (arancione) e stagioni invernali (azzurro), le differenze di mescolanza sono più contenute. I dati sono in accordo con la localizzazione degli eventi critici di formazione di sali, che il periodo di occorrenza più esteso si estende da aprile a ottobre.

Le indagini finora condotte hanno permesso di verificare che non sussistono infiltrazioni

attive di acqua nelle strutture, e quindi la prevenzione di ulteriori degradi, una volta terminato l'intervento di restauro, è fondamentalmente affidata al controllo microclimatico. Il monitoraggio tuttora in corso ha permesso di verificare che si registrano sbilanciamenti termoigrometrici influenzati dalle variazioni esterne soprattutto nei periodi più caldi e in cui, probabilmente, la direzione e intensità dei venti predominanti è tale da provocare maggiori infiltrazioni di aria attraverso le aperture sia in sala delle Asse sia negli ambienti adiacenti.

Le prime indicazioni per eliminare i fattori di rischio che si possono trarre, nonostante i monitoraggi siano ancora in corso, sono quindi inerenti la gestione dell'ambiente interno di sala delle Asse e il miglioramento dell'efficienza delle chiusure verticali trasparenti, al fine di eliminare scambi con l'esterno, limitare i non voluti ricambi di aria e garantire un microclima omogeneo in prossimità delle superfici dipinte.

Detection in Historical Masonry, in *Built Heritage 2013, Monitor, Conservation, Management*, a cura di L. Toniolo, atti del Convegno (Milano, 18-20 novembre 2013), Milano 2015, ed. Centro per Conservazione dei Beni Culturali del Politecnico di Milano, pubblicazione on-line, pp. 1-6

<sup>11</sup> N. Proietti, D. Capitani, V. Di Tullio, R. Olmi, S. Priori, C. Riminesi, A. Sansonetti, F. Tasso, E. Rosina, *MOdihMA at Sforza Castle in Milano: Innovative Techniques for Moisture Detection in Historical Masonry*, in *Built Heritage Monitoring Conservation Management*, a cura di L. Toniolo, M. Boriani, G. Guidi, Svizzera 2015, pp. 187-197.

<sup>12</sup> V. Pracchi, E. Rosina, *Effetti della temperatura superficiale della pavimentazione sul degrado dei rivestimenti e sul microclima*, in atti del XXII Convegno Scienza e beni Culturali Pavimentazioni storiche: uso e conservazione (Bressanone, 11-14 luglio 2006), Venezia 2006, pp. 453-462.

<sup>13</sup> V. Di Tullio, N. Proietti, M. Gobbino, D. Capitani, R. Olmi, S. Priori, C. Riminesi, E. Giani, 2010. *Non-destructive mapping of dampness and salts in degraded wall paintings in hypogeous buildings: the case of St. Clement at mass fresco in St. Clement Basilica, Rome*, in "Anal. Bioanal. Chem.", 396, 2010, pp. 1885-1896.

<sup>14</sup> UNI 10829:1999. Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi

<sup>15</sup> www.saltwiki.net/Hans-Juegen Schwarz.

<sup>16</sup> A. Sawdy, C. Price, *Salt damage at Cleeve Abbey, England. Part I: a comparison of theoretical prediction and practical observation*, in "Journal of Cultural Heritage", VI, 2, 2005, pp. 125-135.

<sup>17</sup> A. Sawdy, C. Price, *Salt damage at Cleeve Abbey, England. Part II: seasonal variability of salt distribution and implications for sampling strategies*, in "Journal of Cultural Heritage", VI, 4, 2005, pp. 361-367.

<sup>18</sup> D. Camuffo et alii, *Past, present and future effects of climate change on a wooden inlay bookcase cabinet: a new methodology inspired by the novel European Standard EN*, in "Journal of Cultural Heritage", XV, 2014, pp. 26-35.

the autumn (orange) and, in particular, winter (blue). These results tally with the location of the critical salt formation events, confirming that the period of most frequent occurrence runs from April to October.

## Conclusions

At present, the research resulted that no active water infiltrations are in the structures. Therefore the prevention of further deterioration, once the restoration work is completed, will primarily focus on microclimatic control. The monitoring still under way revealed the presence of thermo-hygrometric imbalances

## Acknowledgements

Thank you to the collaborators Elke Di Flumeri and Silvia Erba.

<sup>1</sup> In particular, the research conducted by Carolina Di Basso and Laura Basso, the technical reports of Maria Teresa Fiorio and Anna Lucchini and the observations and indications from the scientific committee and the restorers have been especially helpful.

<sup>2</sup> The preliminary microclimatic monitoring began in May 2012.

<sup>3</sup> E. Rosina, 'Indicazioni metodologiche per la valutazione degli scambi termoigrometrici tra murature e ambiente', in *Contributi di ricerca e didattica per la conservazione del Castello di Malpaga*, ed. E. Rosina, Cinisello B. 2008, pp. 87-97.

<sup>4</sup> N. Ludwig, F. Luzi, R. Ricca (edited by), *La termografia: teoria e applicazioni*, Point Veterinaire Italie, Milan 2015.

<sup>5</sup> E. Rosina, 'Le analisi microclimatiche e del regime termoigrometrico delle murature', in *Il Canopolo di Sassari, da casa professa a pinacoteca. Storia e restauri*, eds. S. Gizzi, S. Della Torre, A. Casula, E. Rosina, Cinisello B., 2009, pp. 59-75.

<sup>6</sup> D. Capitani, V. Di Tullio, N. Proietti, 'Nuclear Magnetic Resonance to Characterize and Monitor Cultural Heritage', in *Prog. Nucl. Magn. Reson. Spectrosc.*, Vol. 64, 2012, pp. 29-69.

<sup>7</sup> N. Proietti, D. Capitani, E. Rossi, S. Cozzolino, A. L. Segre, 'Unilateral NMR study of a XVI century wall painted', in *Journal of Magnetic Resonance*, no. 186, 2007, pp. 311-318.

<sup>8</sup> R. Olmi, M. Bini, A. Ignesti, S. Priori, C. Riminesi and A. Felici, 'Diagnostics and monitoring of frescoes using evanescent-field dielectrometry', in *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, no. 8, 2006, pp. 2281-2288.

<sup>9</sup> R. Olmi, C. Riminesi, 'Study of water mass transfer dynamics in frescoes by dielectric spectroscopy', in *Il Nuovo Cimento*, Vol. 31 C, no. 3, pp. 389-402.

<sup>10</sup> N. Proietti, D. Capitani, V. Di Tullio, R. Olmi, S. Priori, C. Riminesi, A. Sansonetti, F. Tasso, E. Rosina, *MOdihMA*

influenced by external variations, especially during the warmest periods and in which the direction and intensity of the predominant wind provokes air infiltration through the openings in the Sala delle Asse and in the adjacent spaces.

The first indications that can be drawn concerning how to eliminate risk factors, although the monitoring is still under way, are therefore connected to managing the environment inside the Sala delle Asse and improving the efficiency of the transparent vertical closures, with the aim of eliminating exchanges with the outside, limiting unwanted air exchange and ensuring a homogeneous microclimate near the painted surfaces.

at Sforza Castle in Milano: Innovative Techniques for Moisture Detection in Historical Masonry, ed. L. Toniolo, atti del Convegno 'Built Heritage 2013, Monitor, Conservation, Management' (Milano, 18-20 November 2013), Milano 2015, ed. Centro per Conservazione dei Beni Culturali del Politecnico di Milano, online publication, pp. 1-6.

<sup>11</sup> N. Proietti, D. Capitani, V. Di Tullio, R. Olmi, S. Priori, C. Riminesi, A. Sansonetti, F. Tasso, E. Rosina, 'MOdihMA at Sforza Castle in Milano: Innovative Techniques for Moisture Detection in Historical Masonry', in *XX*, Springer ed.

<sup>12</sup> V. Pracchi, E. Rosina, *Effetti della temperatura superficiale della pavimentazione sul degrado dei rivestimenti e sul microclima*, atti del XXII Convegno 'Scienza e beni Culturali Pavimentazioni storiche: uso e conservazione' (Bressanone, 11-14 July 2006), Venice 2006, pp. 453-462.

<sup>13</sup> V. Di Tullio, N. Proietti, M. Gobbino, D. Capitani, R. Olmi, S. Priori, C. Riminesi, E. Giani, 2010. 'Non-destructive mapping of dampness and salts in degraded wall paintings in hypogeous buildings: the case of St. Clement at mass fresco in St. Clement Basilica, Rome', in *Anal. Bioanal. Chem.*, no. 396, 2010, pp. 1885-1896.

<sup>14</sup> UNI 10829:1999. Beni di interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi.

<sup>15</sup> www.saltwiki.net/Hans-Juegen Schwarz.

<sup>16</sup> A. Sawdy, C. Price, 'Salt damage at Cleeve Abbey, England. Part I: a comparison of theoretical prediction and practical observation', in "Journal of Cultural Heritage", 6 (2), pp. 125-135.

<sup>17</sup> A. Sawdy, C. Price, *Salt damage at Cleeve Abbey, England. Part II: seasonal variability of salt distribution and implications for sampling strategies*, in *Journal of Cultural Heritage*, 6 (4), pp. 361-367.

<sup>18</sup> D. Camuffo et al., 'Past, present and future effects of climate change on a wooden inlay bookcase cabinet: a new methodology inspired by the novel European Standard EN', in *Journal of Cultural Heritage*, no. 15, 2014, pp. 26-35.