

Analisi cromatica dei laterizi romani: un ponte tra tradizione e innovazione

Martina Empler

Abstract

L'obiettivo di questa ricerca è condurre un'analisi cromatica dei laterizi di epoca romana, suddivisi in periodi storici, utilizzando algoritmi *Python* e superando le tradizionali indagini visive documentate dagli archeologi. L'approccio si basa su nuove tecniche di analisi e documentazione digitale, offrendo una prospettiva innovativa per lo studio delle murature antiche; le immagini analizzate provengono da un *dataset* creato nell'ambito di un progetto di ricerca più ampio, di cui questo studio rappresenta il primo passo. L'indagine si concentra sui pattern cromatici, con particolare attenzione alle variazioni di colore dei laterizi e delle malte impiegati nelle murature. Attraverso questa analisi, è possibile identificare tendenze specifiche legate ai diversi periodi storici, fornendo informazioni utili per la datazione preliminare delle strutture e per la comprensione delle tecniche costruttive adottate nei diversi contesti temporali e geografici. Questo lavoro getta le basi per sviluppare strumenti analitici scalabili e automatizzati, contribuendo a una nuova e diversa interpretazione del patrimonio architettonico e archeologico.

Parole chiave

Analisi cromatica, *opus testaceum*, Impero Romano, *Python*, tecniche murarie romane.



Parete est in *opus testaceum* del triclinio della *domus Flavia* sul Palatino (foto dell'autore).

Introduzione

La presente ricerca si colloca all'interno di un progetto più ampio che mira a esplorare le potenzialità delle tecnologie digitali per l'analisi del patrimonio architettonico e archeologico romano. In particolare, l'obiettivo principale è di sviluppare un metodo innovativo per la datazione preliminare delle fasi costruttive di un edificio, basandosi sul riconoscimento automatico delle caratteristiche delle murature in cortina laterizia. Tale approccio si fonda sull'integrazione di competenze multidisciplinari, combinando l'architettura, l'archeologia, e l'intelligenza artificiale. Attraverso questa sinergia, si intende unire metodologie di ricerca tradizionali con strumenti digitali avanzati, creando nuove prospettive per l'interpretazione e la valorizzazione del patrimonio culturale.

Il focus principale della ricerca è rivolto all'*opus testaceum* (fig. 1), con l'intento di indagare contesti geografici architettonicamente omogenei per individuare soluzioni che consentano di generalizzare l'analisi a scala più ampia. L'integrazione di dati parametrizzabili è un elemento centrale del progetto, poiché consente di sviluppare un metodo scalabile e accurato per la classificazione e l'interpretazione delle murature. Attraverso l'uso di modelli basati su reti neurali e algoritmi di *clustering* non supervisionato, si intende estrarre caratteristiche significative dai *dataset* per creare un sistema di analisi automatica robusto e replicabile.

Il primo passo di questo percorso, evidenziato nel paper, consiste nell'analisi cromatica dei laterizi di epoca romana, suddivisa in tre periodi storici principali: giulio-claudio, flavio e traiano. Questo studio rappresenta una base per lo sviluppo di modelli predittivi e sistemi di classificazione automatica, poiché la variazione cromatica dei laterizi è strettamente legata ai processi produttivi, alle materie prime utilizzate e alle tecniche costruttive specifiche di ciascun periodo. L'analisi è condotta su immagini ad alta risoluzione, utilizzando tecniche di *Machine Learning* per identificare pattern distintivi che permettano di classificare i campioni e attribuirli alle epoche corrispondenti. Questo approccio non si limita alla semplice classificazione cromatica, ma considera una vasta gamma di pattern distintivi che caratterizzano i laterizi di epoca romana, come i *pattern* metrici, di tessitura muraria, *texture* e microstrutture, e quelli derivati da agenti atmosferici e contestuali. Tuttavia, come spiegato in precedenza, in questo studio l'attenzione è focalizzata esclusivamente sull'analisi dei pattern cromatici, che rappresentano il primo passo di un programma più articolato.

Fino ad oggi, gli studi cromatici sono stati effettuati principalmente attraverso l'analisi visiva da parte di archeologi, con limitazioni legate alla soggettività e alla mancanza di standardizzazione. Il supporto di tecnologie digitali e algoritmi permette ora di superare queste barriere, offrendo un approccio più oggettivo e replicabile, ponendo le basi per l'integrazione futura con gli altri *pattern* descritti.



Fig. 1. Setti murari in *opus testaceum* che sostenevano il pavimento dell'arena del Colosseo (foto dell'autore).

Stato dell'Arte

In archeologia il principale metodo di datazione è stratigrafico, mentre il resto è strutturato attorno a fonti documentarie, tipologiche, formali, strutturali o archeometriche [Giles 2020]. L'analisi stratigrafica richiede l'identificazione delle unità e dei loro rapporti, per ricostruire l'evoluzione storica di un edificio. A questa si affianca l'analisi tipologica sincronica, che confronta caratteristiche formali di elementi materiali, raggruppandoli in *cluster* omogenei [Mesañza-Moraza, García-Gómez, Azkarate 2020]. In ambito architettonico, le tipologie servono principalmente a datare gli edifici; oltre ai metodi cronologici scientifici, come il Carbonio 14 e la termoluminescenza, vengono utilizzati indicatori specifici, come la cronologia degli elementi strutturali e la mensiocronologia, che analizza statisticamente le dimensioni dei mattoni per collegarle ai diversi periodi storici [Castillo 1997; Pittaluga 2009]. Questo approccio, basato su campioni ampi e comparazioni con esempi datati (tramite documenti, iscrizioni, ceramiche), funziona meglio in contesti locali omogenei [Cantini *et al.* 2019]. Nella topografia archeologica, identificare con certezza un monumento antico è complesso, soprattutto per edifici minori, a causa della scarsità di fonti: l'analisi delle tecniche costruttive diventa allora essenziale, pur con margini d'incertezza. Le fonti classiche non sempre aiutano, specie se l'edificio presenta solo una delle sue fasi costruttive o forme non coerenti con l'epoca attribuita [Lugli 2014]. I caratteri costruttivi sono quindi più affidabili di quelli stilistici, perché più difficili da imitare. Tecniche costruttive differenti possono coesistere, ma quelle innovative tendono a prevalere nel tempo: un edificio in cemento armato può richiamare forme antiche, ma non può precedere il XIX secolo [Venantzi 1953].

Le caratteristiche dell'*opus testaceum* (fig. 2) sono state sistematizzate da Giuseppe Lugli in undici periodi storici, dalla Repubblica alla fine dell'Impero Romano. I parametri considerati includono: qualità, forma e colore del laterizio, impasto, dimensioni del lato a vista, distacco tra giunti, spessore della malta, aspetto generale e modulo (misura che comprende cinque filari di mattoni e cinque strati intermedi di malta) [Lugli 1957]. Purtroppo, questo tipo di datazione presenta diversi limiti, che ne restringono l'applicabilità e l'affidabilità, in quanto si basa principalmente su un'analisi visiva delle caratteristiche fisiche e morfologiche. L'approccio da lui utilizzato può essere problematico lì dove ci si trovi di fronte a contesti variabili che non rendono il campione omogeneo: questo è il caso di modifiche dovute a restauri oppure nel caso di stratificazione dovuta a fattori esterni come tempo e usura. Inoltre, è presente un'assenza di standardizzazione del metodo, in quanto pur essendoci una serie di parametri per la classificazione, il metodo rimane alquanto soggettivo, dipendendo dall'esperienza dell'archeologo stesso: la mancanza di un sistema unificato o di standard per la misurazione ha reso la datazione difficilmente replicabile e comparabile tra diverse aree di studio, portando a divergenze interpretative quando si confrontano risultati ottenuti da approcci differenti.

L'adozione di approcci alternativi può offrire criteri più precisi e riproducibili. L'integrazione tra patrimonio culturale e intelligenza artificiale sta infatti ridefinendo la ricerca contemporanea, superando le tradizionali separazioni tra scienze storiche e informatica. Il *Machine Learning*, ormai adottato da archeologi e architetti, accelera lo studio dei monumenti e arricchisce l'analisi, permettendo di gestire dati eterogenei e complessi, i cosiddetti '*Slow Data*' [Bickler 2021]. Il *Deep Learning* invece si è dimostrato particolarmente efficace nell'estrazione automatica di caratteristiche da dati visivi e viene oggi impiegato in ambiti come il riconoscimento di artefatti, il restauro digitale e la classificazione di contenuti culturali. Le prime applicazioni riguardavano il rilevamento di siti archeologici tramite fotografie aeree, con l'identificazione di tombe e tracce topografiche [Altaweel *et al.* 2022], ma si sono poi estese anche alla classificazione degli stili architettonici, grazie a piattaforme come *Blocklet* [Cosovic, Jankovic 2020]. In altri casi, reti come *VGG*, *InceptionNet*, *ResNet* e *R-CNN* sono state usate per rilevare danni superficiali durante le ispezioni nei siti storici [Lee, Yu 2023], e, oltre agli edifici, sono state effettuate applicazioni anche ai reperti archeologici, per classificarne i materiali con tecniche spettroscopiche (fluorescenza X, NIR), rilevando variazioni compositive [Mishra *et al.* 2022]. Negli ultimi anni, il *Deep Learning* è diventato centrale anche nella conservazione digitale del patrimonio tangibile e intangibile, rivoluzionando le pratiche di ricerca e restauro [Tao 2024].



Fig. 2. Cortina laterizia del Grande Emiciclo dei Mercati di Traiano (foto dell'autore).

Materiali e Metodi

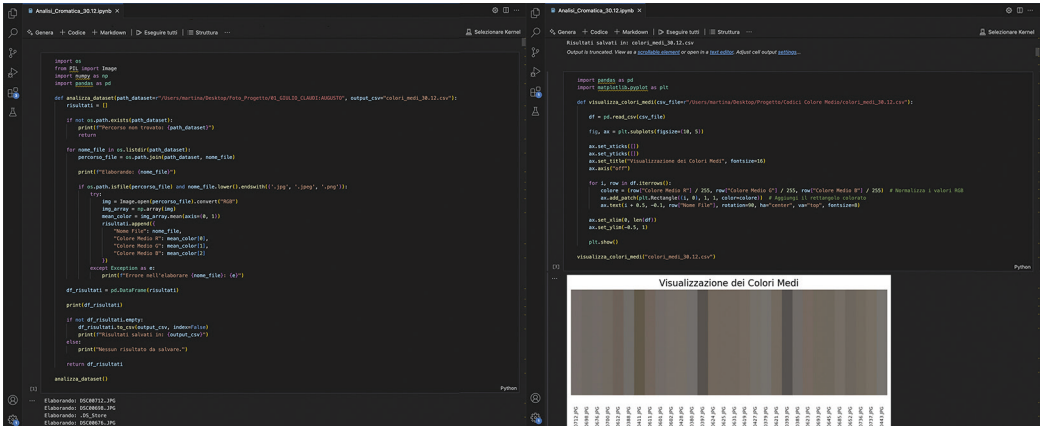
Il metodo proposto richiede la scelta di edifici che forniscano informazioni utili per l'apprendimento del sistema informatico: i *dataset* fotografici devono includere caratteristiche comuni, come la stessa epoca storica e la localizzazione all'interno delle Mura Aureliane, per garantire la riproducibilità dell'esperimento. La ricerca è quindi condotta su dodici edifici divisi in tre epoche: iniziando con l'età giulio-claudia sono stati presi in considerazione la Casa di Augusto, i *Castra Praetoria*, l'Acquedotto Neroniano e la *Domus Aurea*, per un totale di 160 immagini; il secondo periodo è quello dei Flavi, dove gli edifici presi in esame sono la *Domus Augustiana*, la Rampa Domiziana, il Colosseo e la Casa delle Vestali, per un totale di 200 immagini; il terzo periodo riguarda Traiano e prende in considerazione i Mercati di Traiano, i *Ludus Magnus*, le Terme di Traiano e il Foro di Cesare (ricostruzione di Traiano), per un totale di 180 immagini. Le foto, acquisite con una fotocamera Sony Alpha 6400 e salvate in formato *.jpeg*, sono state organizzate in *directory*, pre-processate, etichettate con l'epoca di appartenenza e sottoposte a controllo qualitativo per garantire la corretta rappresentazione dei materiali e delle tecniche murarie (fig. 3).

L'analisi di *pattern* cromatici, basata sulla colorimetria, permette di misurare e quantificare il



Fig. 3. Estratto della *directory* con le foto del rilievo del *Ludus Magnus* (immagine dell'autore).

Fig. 4. Script Python utilizzati per l'analisi delle immagini visualizzati nell'editor Visual Studio Code (immagine dell'autore).



colore attraverso modelli matematici. Applicata ai laterizi, analizza tonalità di mattoni, tegole e malte, influenzate da materie prime e processi di cottura. Uniformità cromatiche o variazioni riflettono tecniche produttive dell'epoca, mentre segni di degrado, come efflorescenze e ossidazione, offrono ulteriori informazioni temporali [Oleari 1998].

L'indagine è stata condotta attraverso script Python (fig. 4), sfruttando le librerie *OpenCV*, *NumPy* e *Pandas*. *OpenCV*, libreria per la visione artificiale, ha permesso l'elaborazione delle immagini; *NumPy* è stata impiegata per gestire matrici e *array* multidimensionali; *Pandas* ha facilitato la manipolazione dei dati e la loro successiva esportazione. Le immagini sono state convertite nello spazio colore RGB, consentendo l'accesso ai valori cromatici di ciascun pixel. Ogni *pixel* delle immagini è stato analizzato e filtrato in base ai criteri cromatici definiti. I *pixel* che soddisfacevano i parametri sono stati selezionati e utilizzati per calcolare un valore medio dei colori RGB. Questo valore medio rappresenta una sintesi cromatica delle tonalità marroni presenti nelle immagini e costituisce la base per confronti tra i diversi campioni. Successivamente, la stessa analisi è stata estesa alle tonalità grigie, caratteristiche delle malte associate ai laterizi. È stato definito un intervallo di valori RGB specifico per isolare i *pixel* grigi e calcolare il valore medio dei colori corrispondenti, seguendo lo stesso approccio utilizzato per i *pixel* marroni. Questa ulteriore analisi ha permesso di indagare le variazioni cromatiche delle malte nei diversi campioni del dataset.

I risultati dell'analisi sono stati esportati in un file .csv (fig. 5), che contiene per ogni immagine il nome del file e i valori medi RGB. Per facilitare la comprensione e l'interpretazione dei dati, è stato inoltre creato un grafico che visualizza i colori medi marroni e grigi di ciascun campione dove ogni immagine analizzata è accompagnata da un'annotazione che descrive il relativo valore cromatico RGB, permettendo un confronto immediato.

Fig. 5. Estratto del file output del codice in formato .csv, con le elaborazioni dei marroni nelle immagini dell'epoca giulio-claudia (immagine dell'autore).

Nome File	Colore Medio Marrone R	Colore Medio Marrone G	Colore Medio Marrone B	Nome File	Colore Medio Marrone R	Colore Medio Marrone G	Colore Medio Marrone B
DSC00712.JPG	97.08998096126658	79.79242559863386	71.36663245139903	DSC00631.JPG	96.05403508533189	78.47259292271735	68.25792158617135
DSC00698.JPG	90.27574695019275	80.19620670937783	72.04825846992587	DSC00619.JPG	96.25674879979832	78.0902653632719	65.27371219307182
DSC00676.JPG	94.87690660780554	78.32393711426717	69.47145438913034	DSC00427.JPG	93.01882909124814	81.99843134072454	71.34004078341451
DSC00700.JPG	94.46907340593845	78.3262642412878	70.04024041721428	DSC00379.JPG	92.94027699988262	82.7733554451451	73.0692424171514
DSC00612.JPG	96.80940555034631	76.29734613422603	66.83549533124621	DSC00621.JPG	98.12675292284153	79.96250039103937	67.33703932007496
DSC00388.JPG	95.78009815320262	82.59033474390344	70.81798687599625	DSC00393.JPG	91.73248579323628	78.97541960449374	71.48187608372575
DSC00411.JPG	99.00162673380194	82.89784973510714	65.00290795325348	DSC00385.JPG	99.65614313251831	80.06274773991147	62.94283782821342
DSC00611.JPG	99.02914181799007	77.7198894303086	67.2576234090541	DSC00623.JPG	97.90211016478742	78.67018582738532	67.73271351155867
DSC00601.JPG	94.79886674416679	77.952941173758906	70.24977960684586	DSC00693.JPG	97.21930004595804	79.005540045845	67.67906344505859
DSC00602.JPG	95.7134394427043	78.9744520915352	70.4020835129362	DSC00645.JPG	94.18480717046457	80.3497758001733	70.37142994688763
DSC00428.JPG	95.56934729695107	82.1807319689982	71.20290241480912	DSC00685.JPG	97.13098721949379	80.93222566098122	69.74000235579743
DSC00380.JPG	96.68152476835495	82.86007143216327	73.30127421322726	DSC00652.JPG	95.01790388719893	78.90956715967576	67.96950459680657
DSC00397.JPG	93.02666762440731	79.74780792369178	68.73325530354808	DSC00736.JPG	98.39533805444067	81.2556114754362	67.94068192550503
DSC00624.JPG	98.9339087934731	79.59976925994397	67.22148596331326	DSC00737.JPG	100.04536455576104	81.54871372489704	68.80363806367781
DSC00625.JPG	96.28107097745743	76.46072806465607	65.8908945062094	DSC00443.JPG	92.6686561192903	81.70440410789381	73.0680727323687

Conclusioni

L'analisi eseguita ha rilevato differenze significative nelle palette cromatiche associate a ciascun periodo storico, sia per i laterizi che per le malte. Il confronto tra le palette evidenzia variazioni rilevanti, sia nei valori dei singoli canali cromatici sia nell'intero spettro, suggerendo una chiara distinzione percettiva tra i periodi analizzati.

Nell'età giulio-claudia (figg. 6, 9), le palette di grigi e marroni si distinguono per tonalità mediamente uniformi e bilanciate, suggerendo una certa stabilità nei materiali utilizzati. I toni di grigio delle malte, con valori RGB compresi tra 80-115 si collocano su una scala media, mentre i marroni dei laterizi appaiono scuri, terrosi e con una gamma cromatica equilibrata, con valori RGB stimati tra 100-140 (R), 70-100 (G), 50-80 (B); essendo l'epoca più antica tra le tre e contenendo nel dataset edifici del I sec d.C., i colori reali sono sbiaditi a causa del deterioramento,

Fig. 6. Estratto della palette cromatica dei colori medi grigi delle malte dell'epoca giulio-claudia (immagine dell'autore).



Fig. 7. Estratto della palette cromatica dei colori medi grigi delle malte dell'epoca flavia (immagine dell'autore).

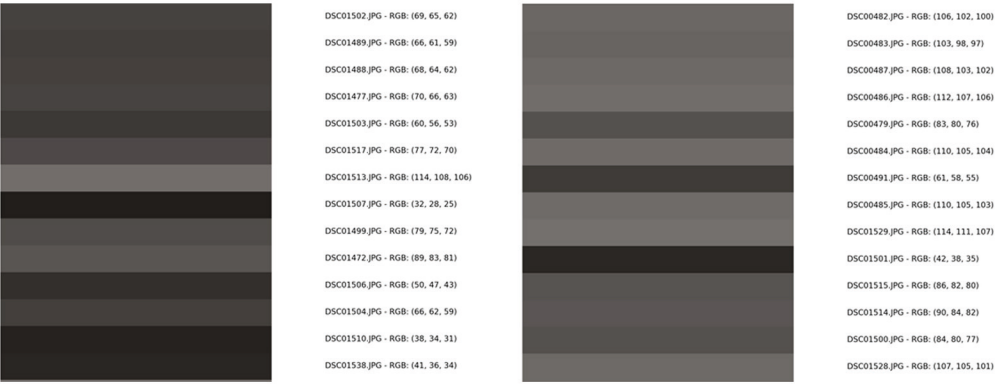
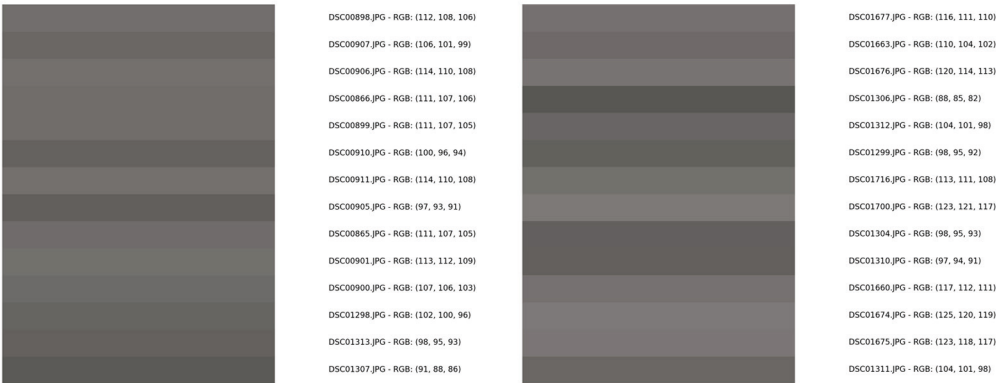


Fig. 8. Estratto della palette cromatica dei colori medi grigi delle malte dell'epoca traianea (immagine dell'autore).



delle patine e dall'esposizione degli scavi, in quanto alcuni di essi sono siti ipogei. Nell' epoca dei Flavi (figg. 7, 10) si osserva un'evoluzione verso tonalità più scure nei grigi delle malte e più giallastre nei laterizi, con un aumento della variabilità cromatica che indica il cambiamento nella composizione dei materiali e una maggiore esposizione agli agenti atmosferici. Le malte tendono verso tonalità più profonde, con valori RGB compresi tra i 70-110, mentre i laterizi mostrano sfumature più diversificate, riflettendo la variazione nella tecnica produttiva dell'argilla, con valori RGB stimati tra 90-130 (R), 60-90 (G), 40-70 (B). Nel periodo traiano (figg. 8, 11), la palette cromatica si sposta verso toni più chiari e brillanti, con malte che presentano grigi uniformi e più luminosi con valori RGB compresi tra 90-120, e laterizi caratterizzati da marroni vivaci tendenti al rossastro, con una stima dei valori RGB tra 110-160 (R), 80-120 (G), 60-90 (B), suggerendo una maggiore attenzione all'aspetto estetico e un'evoluzione tecnologica nella lavorazione dei materiali. Questo cambiamento complessivo attraverso i tre periodi

Fig. 9. Estratto della palette cromatica dei colori medi marroni dei laterizi dell'epoca giulio-claudia (immagine dell'autore).



Fig. 10. Estratto della palette cromatica dei colori medi marroni dei laterizi dell'epoca flavia (immagine dell'autore).

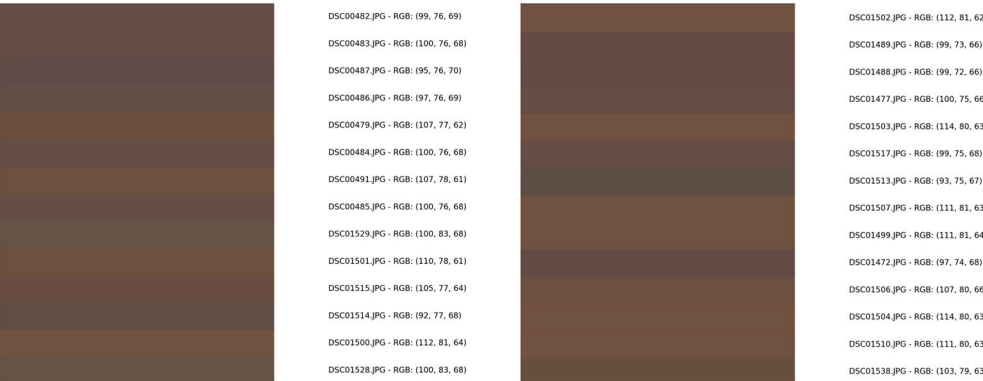
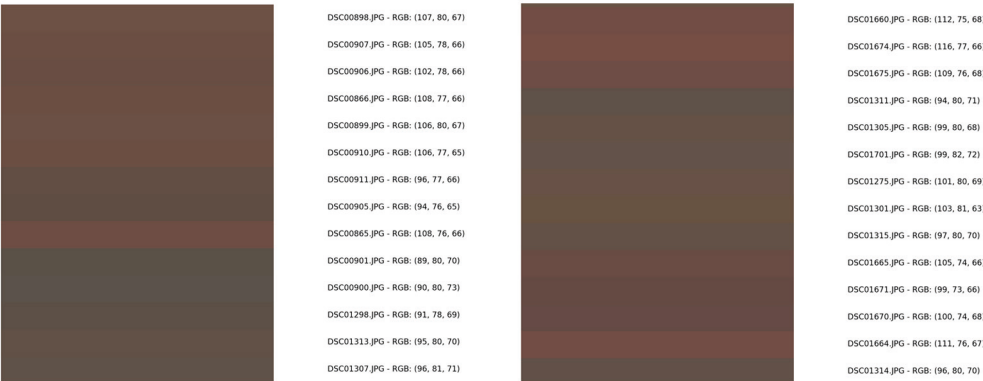


Fig. 11. Estratto della palette cromatica dei colori medi marroni dei laterizi dell'epoca traiana (immagine dell'autore).



evidenza una progressiva trasformazione, nella selezione dei materiali e nelle condizioni di conservazione, riflettendo l'evoluzione tecnologica dell'architettura romana.

I risultati ottenuti mostrano una differenza sostanziale tra i periodi analizzati, costituendo un primo passo per lo studio degli altri *pattern*; la capacità dell'algoritmo di riconoscere queste differenze e quindi, potenzialmente, di distinguere i tre diversi periodi se fossero stati etichettati, dimostra l'efficacia dell'approccio adottato e conferma la validità dell'uso di strumenti computazionali per il supporto della ricerca legata al patrimonio culturale. Le prospettive future di sviluppo saranno volte all'applicazione di questo metodo per identificare delle caratteristiche più complesse per la generalizzazione e l'applicazione di algoritmi su *dataset* più ampi.

Riferimenti bibliografici

Altaweel, M., Khelifi, A., Li, Z., Squitieri, A., Basmaji, T., Ghazal, M. (2022). Automated Archaeological Feature Detection Using Deep Learning on Optical UAV Imagery: Preliminary Results. In *Remote Sensing*, n. 14, p. 553. <https://doi.org/10.3390/rs14030553>.

Bickler, S. H. (2021). Machine learning arrives in archaeology. In *Advances in Archaeological Practice*, n. 9, pp. 186-191. <https://doi.org/10.1017/aap.2021.6>.

Cantini, L., Previtali, M., Moiola, R., Della Torre, S. (2019). The mensiochronology analysis supported by new advanced survey techniques: field tests in Milanese area. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. 42, pp. 359-365. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-359-2019>.

Castillo, J. A. Q. (1996). Indicadores cronológicos de ámbito local: cronotipología y mensiocronología. In *Arqueología de la Arquitectura*, pp. 179-187.

Cosovic, M., Jankovic, R. (2020). CNN classification of the cultural heritage image. In *Proceedings of the 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA*. East Sarajevo, 18-20 March 2020, pp. 1-6. New York: IEEE.

Giles, K. (2020). Buildings archaeology. In C. Smith (Ed.). *Encyclopedia of Global Archaeology*, pp. 1033-1041. New York: Springer.

Lee, J., Yu, J.M. (2023). Automatic surface damage classification developed based on deep learning for wooden architectural heritage. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp.153-157.

Lugli, G. (1957). *La tecnica edilizia romana: con particolare riguardo a Roma e Lazio*. Roma: G. Bardi.

Lugli, G. (2014). *Storia edilizia di Roma antica: dall'epoca dei re alle invasioni barbariche: dall'VIII secolo a.C. al VI secolo d.C.* Roma: Arbor Sapientiae.

Mesanza-Moraza, A., García-Gómez, I., Azkarate, A. (2020). Machine learning for the built heritage archaeological study. In *Journal on Computing and Cultural Heritage*, n. 14, pp. 1-21. <https://doi.org/10.1145/3422993>.

Mishra, P., Passos, D., Marini, F., Xu, J., Amigo, J.M., Gowen, A.A., Jansen, J.J., Biancolillo, A., Roger, J.M., Rutledge, D.N. (2022). Deep learning for nearinfrared spectral data modelling: Hypes and benefits. In *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, n.157. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116804>.

Oleari, C. (a cura di). (1998). *Misurare il colore: Spettrofotometria, fotometria e colorimetria: Fisiologia e percezione*. Milano: Hoepli.

Pittaluga, D. (2009). *La mensiocronologia dei mattoni: per datare, per conoscere e per comprendere le strutture storiche*. Genova: ECIG.

Tao, R. (2024). The practice and exploration of deep learning algorithm in the creation and realization of intangible cultural heritage animation. In *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, n. 9, pp. 1-16.

Venanzi, C. (1953). *Caratteri costruttivi dei monumenti; Strutture murarie a Roma e nel Lazio*. Roma: Centro di Studi per la Storia dell'Architettura.

Autrice

Martina Empler, Sapienza Università di Roma, martina.empler@uniroma1.it

Per citare questo capitolo: Martina Empler (2025). Analisi cromatica dei laterizi Romani: un ponte tra tradizione e innovazione. In L. Carlevaris et al. (a cura di), *èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/èkphrasis. Descriptions in the space of representation*. Atti del 46° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Milano: FrancoAngeli, pp. 3715-3730. DOI: 10.3280/oa-1430-c948.

Chromatic Analysis of Roman Bricks: Bridging Tradition and Innovation

Martina Empler

Abstract

The objective of this research is to conduct a chromatic analysis of Roman-era bricks, divided by historical periods, using *Python* algorithms and overcoming the traditional visual investigations documented by archaeologists. The approach is based on new techniques of digital analysis and documentation, offering an innovative perspective for the study of ancient masonry. The images analyzed come from a dataset created as part of a broader research project, of which this study represents the first step. The investigation focuses on chromatic patterns, with particular attention to color variations in bricks and mortars used in masonry. Through this analysis, it is possible to identify specific trends related to different historical periods, providing valuable information for the preliminary dating of structures and for understanding the construction techniques adopted in various temporal and geographical contexts. This work lays the foundation for developing scalable and automated analytical tools, contributing to a new and diverse interpretation of architectural and archaeological heritage.

Keywords

Chromatic analysis, *opus testaceum*, Roman Empire, *Python*, Roman masonry techniques.



East wall in *Opus Testaceum* of the triclinium in the *Domus Flavia* on the Palatine Hill (photo by the Author).

Introduction

This research is part of a broader project aimed at exploring the potential of digital technologies for analyzing Roman architectural and archaeological heritage.

The primary objective is to develop an innovative method for the preliminary dating of construction phases of buildings, based on the automatic recognition of characteristics in brick-faced masonry. This approach relies on the integration of multidisciplinary expertise, combining architecture, archaeology, and artificial intelligence. Through this synergy, the project seeks to merge traditional research methodologies with advanced digital tools, creating new perspectives for the interpretation and enhancement of cultural heritage.

The main focus of the research is directed towards *Opus Testaceum* (fig. 1), aiming to investigate architecturally homogeneous geographical contexts to develop solutions that allow for broader-scale analysis. The integration of parameterizable data is a central element of the project, enabling the development of a scalable and accurate method for classifying and interpreting masonry.

By employing models based on neural networks and unsupervised clustering algorithms, the research aims to extract significant features from datasets to create a robust and replicable system for automated analysis.

The first step in this process, highlighted in the paper, involves the chromatic analysis of Roman-era bricks, divided into three main historical periods: Julio-Claudian, Flavian, and Trajanic. This study serves as a foundation for the development of predictive models and automatic classification systems, as the chromatic variation in bricks is closely tied to production processes, raw materials used, and construction techniques specific to each period. The analysis is conducted on high-resolution images using machine learning techniques to identify distinctive patterns that allow for the classification of samples and their attribution to corresponding periods.

This approach goes beyond simple chromatic classification by considering a wide range of distinctive patterns that characterize Roman-era bricks, such as metric patterns, masonry textures, structural micro-patterns, and those derived from environmental and contextual factors. However, as previously explained, this study focuses exclusively on the analysis of chromatic patterns, representing the initial step of a more extensive program.

Until now, chromatic studies have primarily relied on visual analysis by archaeologists, with inherent limitations in terms of subjectivity and lack of standardization.

The support of digital technologies and algorithms now allows these barriers to be overcome, offering a more objective and replicable approach, paving the way for the future integration of additional patterns described in the broader research.



Fig. 1. Masonry walls in *Opus Testaceum* that supported the floor of the Colosseum Arena (photo by the Author).

State of the Art

In archaeology, the main method of dating is stratigraphic, while the rest is structured around documentary, typological, formal, structural, or archaeometric sources [Giles 2020]. Stratigraphic analysis requires the identification of units and their relationships, in order to reconstruct the historical evolution of a building. Alongside this, there is synchronic typological analysis, which compares formal characteristics of material elements by grouping them into homogeneous clusters [Mesanza-Moraza, García-Gómez, Azkarate 2020]. In the architectural field, typologies are mainly used to date buildings; in addition to scientific chronological methods such as Carbon-14 and thermoluminescence, specific indicators are used, such as the chronology of structural elements and mensiochronology, which statistically analyzes the dimensions of bricks to link them to different historical periods [Castillo 1997; Pittaluga 2009]. This approach, based on large samples and comparisons with dated examples (through documents, inscriptions, ceramics), works best in homogeneous local contexts [Cantini *et al.* 2019]. In archaeological topography, identifying an ancient monument with certainty is complex, especially for minor buildings, due to the scarcity of sources: in such cases, the analysis of construction techniques becomes essential, albeit with margins of uncertainty. Classical sources do not always help, especially if the building only preserves one of its construction phases or has forms not consistent with the attributed period [Lugli 2014]. Construction features are therefore more reliable than stylistic ones, as they are harder to imitate. Different construction techniques may coexist, but innovative ones tend to prevail over time: a reinforced concrete building can recall ancient forms, but it cannot predate the 19th century [Venantzi 1953].

The characteristics of *Opus Testaceum* (fig. 2) were systematized by Giuseppe Lugli into eleven historical periods, from the Republic to the end of the Roman Empire. The parameters considered include: the quality, shape, and color of the brick, its mixture, the visible side's dimensions, spacing between joints, mortar thickness, general appearance, and the module (a measure that includes five rows of bricks and five interlayers of mortar) [Lugli 1957]. Unfortunately, this type of dating presents several limitations that reduce its applicability and reliability, as it is mainly based on visual analysis of physical and morphological characteristics. The approach he used can be problematic when facing variable contexts that do not provide a homogeneous sample: this is the case with modifications due to restorations or stratification caused by external factors such as time and wear. Moreover, there is a lack of standardization in the method: although a series of classification parameters exists, the method remains quite subjective, relying on the archaeologist's experience. The absence of a unified system or measurement standards has made dating difficult to replicate and compare across different study areas, leading to interpretative divergences when results from different approaches are compared.

The adoption of alternative approaches can offer more precise and reproducible criteria. The integration between cultural heritage and artificial intelligence is in fact redefining contemporary research, overcoming traditional separations between historical sciences and computer science. Machine Learning, now adopted by archaeologists and architects, accelerates the study of monuments and enriches analysis, enabling the management of heterogeneous and complex data—the so-called 'Slow Data' [Bickler 2021]. Deep Learning, on the other hand, has proven particularly effective in the automatic extraction of features from visual data and is now employed in fields such as artifact recognition, digital restoration, and classification of cultural content. The first applications concerned the detection of archaeological sites through aerial photographs, identifying tombs and topographic traces [Altaweel *et al.* 2022], but later extended to the classification of architectural styles, thanks to platforms like *Blocklet* [Cosovic, Jankovic 2020]. In other cases, networks like VGG, *InceptionNet*, *ResNet*, and *R-CNN* have been used to detect surface damage during inspections at historical sites [Lee, Yu 2023], and beyond buildings, applications have also been made to archaeological artifacts, classifying materials with spectroscopic techniques (XRF, NIR), identifying compositional variations [Mishra *et al.* 2022]. In recent years, Deep Learning has also become central to the digital preservation of tangible and intangible heritage, revolutionizing research and restoration practices [Tao 2024, pp. 1–16].



Fig. 2. Brick Wall of the Great Hemicycle of Trajan's Markets (photo by the author).

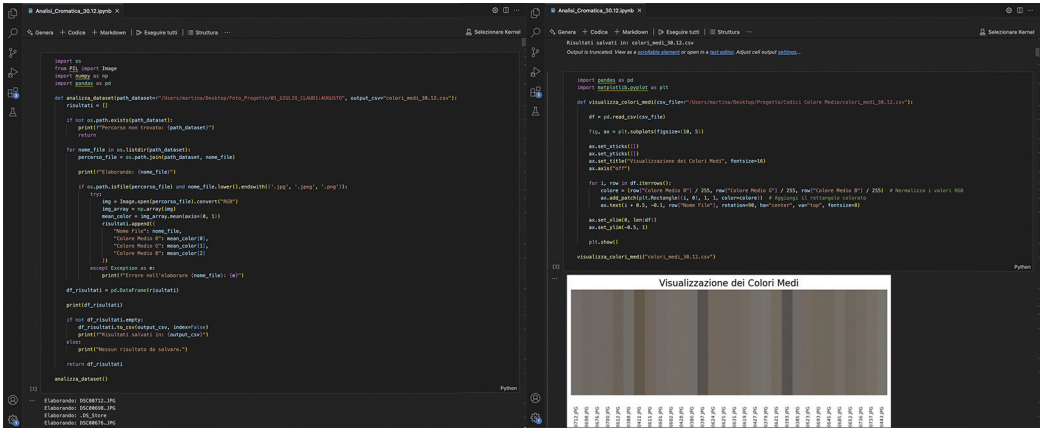
Materials and Methods

The proposed method requires the selection of buildings that provide useful information for training the computational system: the photographic datasets must include common characteristics, such as belonging to the same historical period and being located within the Aurelian Walls, to ensure the reproducibility of the experiment. The research is therefore conducted on twelve buildings divided into three periods: starting with the Julio-Claudian era, the selected buildings are the House of Augustus, the *Castra Praetoria*, the Neronian Aqueduct, and the *Domus Aurea*, for a total of 160 images; the second period covers the Flavian dynasty, including the *Domus Augustiana*, the Domitian Ramp, the Colosseum, and the House of the Vestals, for a total of 200 images; the third period pertains to the reign of Trajan and considers Trajan's Markets, the *Ludus Magnus*, the Baths of Trajan, and Caesar's Forum (Trajan's reconstruction), for a total of 180 images. The photos, taken with a Sony Alpha 6400 camera and saved in .jpeg format, were organized into directories, pre-processed, labeled with their corresponding period, and subjected to quality control to ensure an accurate representation of materials and construction techniques (fig. 3).



Fig. 3. Extract from the directory containing images from the survey of the *Ludus Magnus* (image by the Autor).

Fig. 4. Python scripts used for image analysis displayed in the Visual Studio Code editor (image by the Autor).



The analysis of color patterns, based on colorimetry, makes it possible to measure and quantify color through mathematical models. When applied to brickwork, it analyzes the hues of bricks, tiles, and mortars, which are influenced by raw materials and firing processes. Chromatic uniformity or variations reflect the production techniques of the period, while signs of deterioration such as efflorescence and oxidation offer additional temporal information [Oleari 1998].

The investigation was conducted using Python scripts (fig. 4), leveraging the OpenCV, NumPy, and Pandas libraries. OpenCV, a computer vision library, enabled image processing; NumPy was used to manage matrices and multidimensional arrays; Pandas facilitated data manipulation and export. The images were converted to the RGB color space, allowing access to the color values of each pixel. Each pixel of the images was analyzed and filtered based on defined chromatic criteria. Pixels that met the parameters were selected and used to calculate an average RGB color value. This average value represents a chromatic synthesis of the brown tones present in the images and forms the basis for comparisons between the different samples. Subsequently, the same analysis was extended to gray tones, characteristic of the mortars associated with bricks. A specific range of RGB values was defined to isolate the gray pixels and calculate the average color value, accordingly, following the same approach used for brown pixels. This additional analysis allowed for an investigation of chromatic variations in the mortars across the different samples in the dataset.

The results of the analysis were exported to a .csv file (fig. 5), which includes for each image the filename and the average RGB values. To facilitate data comprehension and interpretation, a graph was also created displaying the average brown and gray colors of each sample, where each analyzed image is accompanied by an annotation describing its corresponding RGB color value, allowing for immediate comparison.

Fig. 5. Extract from the output file of the code in .csv format, showing the processing of browns in images from the Julio-Claudian era (image by the Autor).

Nome File	Colore Medio Marrone R	Colore Medio Marrone G	Colore Medio Marrone B	Nome File	Colore Medio Marrone R	Colore Medio Marrone G	Colore Medio Marrone B
DSC00712.JPG	97.08998096126658	79.79242559863386	71.36663245139903	DSC00631.JPG	96.05403508533189	78.47259292271735	68.25792158617135
DSC00698.JPG	90.27574695019275	80.19620670937783	72.04825846992587	DSC00619.JPG	96.25674879979832	78.0902653632719	65.27371219307182
DSC00676.JPG	94.87690660780554	78.32393711426717	69.47145438913034	DSC00427.JPG	93.01882909124814	81.99843134072454	71.34004078341451
DSC00700.JPG	94.46907340593845	78.3262642412878	70.04024041721428	DSC00379.JPG	92.94027699986262	82.77335544541451	73.0692424171514
DSC00612.JPG	96.80940555034631	76.29734613422603	66.83549533124621	DSC00621.JPG	98.12675292284153	79.96250039103937	67.33703932007496
DSC00388.JPG	95.78009815320262	82.59033474390344	70.81798687599625	DSC00393.JPG	91.73248579323628	78.97541960449374	71.48187608372575
DSC00411.JPG	99.00162673380194	82.89784973510714	65.00290795325348	DSC00385.JPG	99.65614313251831	80.06274773991147	62.94283782821342
DSC00611.JPG	99.02914181799007	77.7198894303086	67.2576234090541	DSC00623.JPG	97.90211016478742	78.67018582738532	67.73271351155867
DSC00601.JPG	94.79886674416679	77.95294173758906	70.24977960684586	DSC00683.JPG	97.21930004595804	79.005540045845	67.67906344505859
DSC00602.JPG	95.7134394427043	78.9744520915352	70.4020835129362	DSC00645.JPG	94.18480717046457	80.3497758001733	70.37142994688763
DSC00428.JPG	95.56934729695107	82.1807319689982	71.20290241480912	DSC00685.JPG	97.13098721949379	80.9322566098122	69.74000235579743
DSC00380.JPG	96.68152476835495	82.86007143216327	73.30127421322726	DSC00652.JPG	95.01790388719893	78.90956715967576	67.96950459680657
DSC00397.JPG	93.02666762440731	79.74780792369178	68.7325530354808	DSC00736.JPG	98.39533805444067	81.2556114754362	67.94068192550503
DSC00624.JPG	98.9339087934731	79.59976925994397	67.22148596331326	DSC00737.JPG	100.04536455576104	81.54871372489704	68.80363806367781
DSC00625.JPG	96.28107097745743	76.46072806465607	65.8908945062094	DSC00443.JPG	92.8686581192903	81.70440410789381	73.0680727323687

Conclusions

The analysis revealed significant differences in the color palettes associated with each historical period, both for the bricks and the mortars. The comparison between palettes highlights notable variations, both in the values of individual color channels and across the entire spectrum, suggesting a clear perceptual distinction among the periods examined.

In the Julio-Claudian period (figs. 6, 9), the gray and brown palettes are characterized by moderately uniform and balanced tones, suggesting a certain consistency in the materials used. The gray tones of the mortars, with RGB values ranging between 80–115, fall within a medium scale, while the browns of the bricks appear dark, earthy, and chromatically balanced, with estimated RGB values between 100–140 (R), 70–100 (G), and 50–80 (B). As the oldest of the three periods, and including buildings from the 1st century CE, the actual colors are faded due

Fig. 6. Extract of the color palette of average gray hues of the mortars from the Julio-Claudian era (image by the Autor).

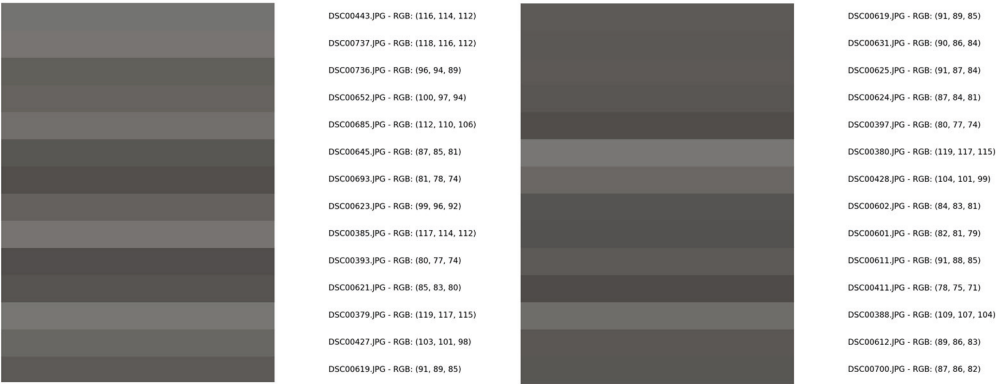


Fig. 7. Extract of the color palette of average gray hues of the mortars from the Flavian era (image by the Autor).

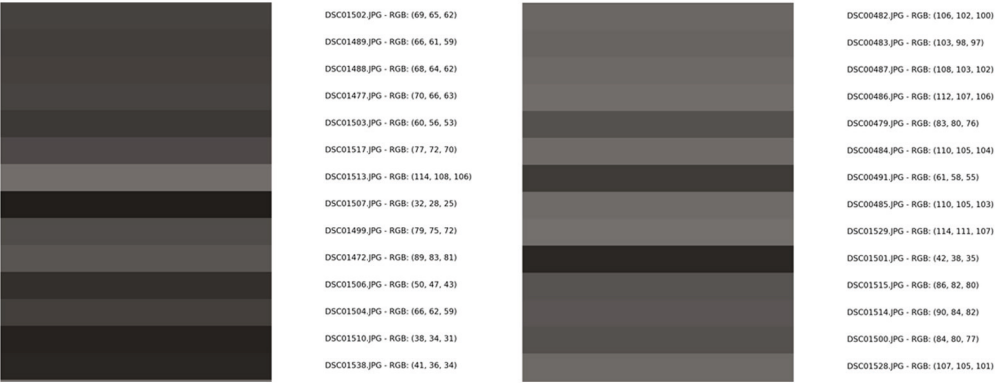
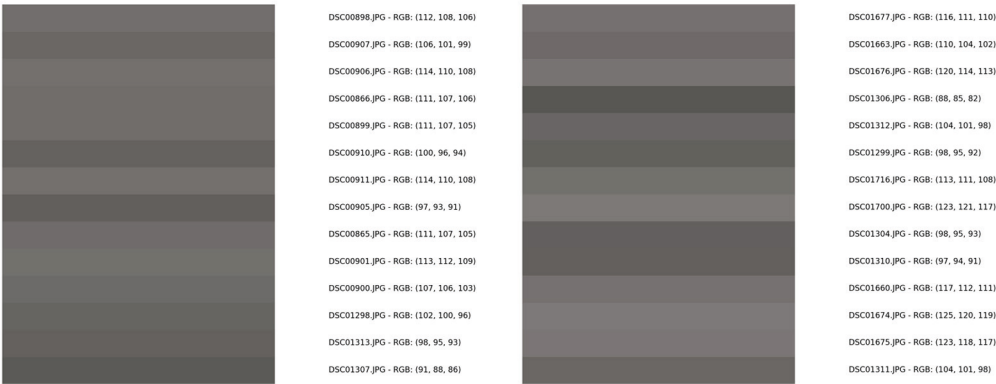


Fig. 8. Extract of the color palette of average gray hues of the mortars from the Trajanic era (image by the Autor).



to deterioration, surface patinas, and excavation exposure, since some of these buildings are underground structures. In the Flavian era (figs. 7, 10), there is a shift toward darker gray tones in the mortars and more yellowish hues in the bricks, accompanied by increased chromatic variability. This indicates a change in material composition and greater exposure to atmospheric agents. The mortars tend toward deeper tones, with RGB values between 70–110, while the bricks show more diverse hues, reflecting variations in clay processing techniques, with estimated RGB values between 90–130 (R), 60–90 (G), and 40–70 (B). In the Trajanic period (figs. 8, 11), the chromatic palette shifts toward brighter and more luminous tones, with mortars displaying uniform and lighter grays (RGB 90–120), and bricks characterized by vibrant reddish browns, with RGB values estimated between 110–160 (R), 80–120 (G), and 60–90 (B). This suggests a greater focus on aesthetics and a technological evolution in material processing. This overall shift across the three periods highlights a progressive

Fig. 9. Extract of the color palette of average brown hues of the bricks from the Julio-Claudian era (image by the Autor).



Fig. 10. Extract of the color palette of average brown hues of the bricks from the Flavian era (image by the Autor).



Fig. 11. Extract of the color palette of average brown hues of the bricks from the Trajanic era (image by the Autor).



transformation in material selection and preservation conditions, reflecting the technological development of Roman architecture.

The results obtained show a substantial difference among the periods analyzed, marking a first step toward the study of other patterns. The algorithm's ability to recognize these differences—and potentially distinguish the three periods if labeled—demonstrates the effectiveness of the approach and confirms the value of computational tools in supporting research in Cultural Heritage. Future development will focus on applying this method to identify more complex features for generalization and on implementing algorithms across larger datasets.

Reference List

- Altaweel, M., Khelifi, A., Li, Z., Squitieri, A., Basmaji, T., Ghazal, M. (2022). Automated Archaeological Feature Detection Using Deep Learning on Optical UAV Imagery: Preliminary Results. In *Remote Sensing*, n. 14, p. 553. <https://doi.org/10.3390/rs14030553>.
- Bickler, S. H. (2021). Machine learning arrives in archaeology. In *Advances in Archaeological Practice*, n. 9, pp. 186-191. <https://doi.org/10.1017/aap.2021.6>.
- Cantini, L., Previtali, M., Moiola, R., Della Torre, S. (2019). The mensiochronology analysis supported by new advanced survey techniques: field tests in Milanese area. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. 42, pp. 359-365. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-359-2019>.
- Castillo, J. A. Q. (1996). Indicadores cronológicos de ámbito local: cronotipología y mensiocronología. In *Arqueología de la Arquitectura*, pp. 179-187.
- Cosovic, M., Jankovic, R. (2020). CNN classification of the cultural heritage image. In *Proceedings of the 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA*. East Sarajevo, 18–20 March 2020, pp. 1-6. New York: IEEE.
- Giles, K. (2020). Buildings archaeology. In C. Smith (Ed.). *Encyclopedia of Global Archaeology*, pp. 1033-1041. New York: Springer.
- Lee, J., Yu, J.M. (2023). Automatic surface damage classification developed based on deep learning for wooden architectural heritage. In *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp.153-157.
- Lugli, G. (1957). *La tecnica edilizia romana: con particolare riguardo a Roma e Lazio*. Roma: G. Bardi.
- Lugli, G. (2014). *Storia edilizia di Roma antica: dall'epoca dei re alle invasioni barbariche: dall'VIII secolo a.C. al VI secolo d.C.* Roma: Arbor Sapientiae.
- Mesanza-Moraza, A., García-Gómez, I., Azkarate, A. (2020). Machine learning for the built heritage archaeological study. In *Journal on Computing and Cultural Heritage*, n. 14, pp. 1-21. <https://doi.org/10.1145/3422993>.
- Mishra, P., Passos, D., Marini, F., Xu, J., Amigo, J.M., Gowen, A.A., Jansen, J.J., Biancolillo, A., Roger, J.M., Rutledge, D.N. (2022). Deep learning for nearinfrared spectral data modelling: Hypes and benefits. In *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, n.157. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116804>.
- Oleari, C. (a cura di). (1998). *Misurare il colore: Spettrofotometria, fotometria e colorimetria: Fisiologia e percezione*. Milano: Hoepli.
- Pittaluga, D. (2009). *La mensiocronologia dei mattoni: per datare, per conoscere e per comprendere le strutture storiche*. Genova: ECIG.
- Tao, R. (2024). The practice and exploration of deep learning algorithm in the creation and realization of intangible cultural heritage animation. In *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, n. 9, pp. 1-16.
- Venanzi, C. (1953). *Caratteri costruttivi dei monumenti; Strutture murarie a Roma e nel Lazio*. Roma: Centro di Studi per la Storia dell'Architettura.

Author

Martina Empler, Sapienza University of Rome, martina.empler@uniroma1.it

To cite this chapter: Martina Empler (2025). Chromatic Analysis of Roman Bricks: Bridging Tradition and Innovation. In L. Carlevaris et al. (Eds.). *èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/èkphrasis. Descriptions in the space of representation*. Proceedings of the 46th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 3715-3730. DOI: 10.3280/oa-1430-c948.