Metriche standardizzate per la valutazione geometrica e radiometrica dei dati digitali nel progetto HERITALISE

Francesca Gallitto[1][0009-0005-5007-4723], Andrea Maria Lingua[1][0000-0002-5930-2711], Filiberto Chiabrando[2][0000-0002-4982-5236] ,Francesca Rivelli[1]

[1] Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino, c.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italia; francesca.gallitto@polito.it, andrea.lingua@polito.it, s347944@studenti.polito.it
[2] Dipartimento di Architettura e Design (DAD), Politecnico di Torino, v.le Mattioli 39, 10125 Torino, Italia; filiberto.chiabrando@polito.it

Abstract Il contributo propone metriche per valutare la qualità geometrica e radiometrica all'interno del progetto HERITALISE: reference-based, basate su riferimenti affidabili, e no-reference, per verificare coerenza, completezza, rumore e artefatti senza ground truth. Il metodo è applicato a un capitello e alla Reggia di Venaria Reale (scrivania Mazzarina e muro di Castellamonte). I risultati preliminari mostrano che la qualità dipende da scala d'uso, riferimento disponibile e struttura geometrica del dataset.

Parole chiave: patrimonio culturale digitale, metriche di qualità, validazione geometrica e radiometrica.

1 Introduzione

La digitalizzazione del patrimonio culturale produce oggi dati eterogenei: immagini, nuvole di punti, mesh, ortofoto, texture e prodotti multispettrali. In questo contesto, la qualità non può essere descritta da un solo indicatore. Un modello tridimensionale può essere visivamente convincente ma non adatto a una scala metrica dichiarata; allo stesso modo, un'immagine può mantenere una buona copertura radiometrica ma perdere dettaglio sui bordi, presentare una deriva cromatica o comprimere la dinamica tonale. Il progetto HERITALISE affronta questo problema proponendo un sistema di valutazione separato per dominio geometrico e radiometrico, e articolato in metriche reference-based e no-reference [13].

L'obiettivo del contributo è tradurre tale impostazione in una struttura operativa per la comunità geomatica, con particolare attenzione alla documentazione digitale del patrimonio culturale. Il criterio di fondo è che la qualità sia una proprietà relativa allo scopo: una nuvola di punti idonea alla documentazione architettonica generale può risultare insufficiente per analisi di dettaglio alla scala 1:50; una texture adatta alla visualizzazione può non esserlo per analisi conservative basate sul colore. Per questo motivo le metriche devono essere esplicite, ripetibili e collegate a tolleranze, scala di rappresentazione, risoluzione attesa e disponibilità di dati di riferimento [4, 14].

Il lavoro si colloca nel solco delle raccomandazioni internazionali per la documentazione metrica e la qualità dei dati geografici, ma introduce una lettura specifica per i flussi di lavoro HERITALISE. Le metriche geometriche includono accuratezza su punti di controllo, qualità della registrazione, distanze cloud-to-cloud e cloud-to-mesh, completezza, robustezza morfologica e coerenza interna. Le metriche radiometriche includono similarità strutturale, differenza di colore, coerenza spettrale, completezza radiometrica, artefatti di cucitura, clipping, rumore, nitidezza, consistenza multi-vista e dinamica utile [5, 8].

1.1 Oggetti di studio

I test preliminari (vedi Fig.1) considerano due livelli di complessità. Il primo è un capitello utilizzato come test bed a scala di dettaglio, utile per valutare metriche geometriche e radiometriche su un oggetto caratterizzato da superfici scolpite, sottosquadri e variazioni locali di dettaglio. Questo tipo di oggetto permette di verificare se gli indicatori siano sensibili a rugosità reale, rumore, lacune, smoothing e perdita di informazione locale. In questa fase è stata definita la metodologia.

Il secondo caso studio è la Reggia di Venaria Reale. Per la componente radiometrica è stata considerata la scrivania Mazzarina, un manufatto ligneo del XVIII secolo attribuito a Luigi Prinotto e caratterizzato da materiali differenti e superfici decorative con variazioni cromatiche e materiche. La presenza di un ColorChecker durante l'acquisizione consente di verificare la fedeltà cromatica rispetto a valori noti. Per la componente geometrica è stata analizzata una porzione del muro di Castellamonte, acquisita con fotogrammetria da UAV e confrontata con un riferimento TLS. La superficie, prevalentemente planare ma con muratura irregolare e balustrata, è adatta a verificare sia la dipendenza dalla scala sia la risposta delle metriche a drift sistematici e differenze di copertura. Vengono presentati i risultati preliminari del caso studio della Reggia di Veneria Reale [11].



Fig. 1. Inquadramento dei casi studio: capitello test bed, scrivania Mazzarina e sezione del muro di Castellamonte presso la Reggia di Venaria Reale.

2 Metodologia

La metodologia proposta organizza la valutazione in quattro famiglie: geometrica reference-based, geometrica no-reference, radiometrica reference-based e radiometrica no-reference. La distinzione è necessaria perché la disponibilità di un riferimento affidabile cambia radicalmente il significato dell'indicatore. Quando esiste un ground truth, la metrica misura una deviazione rispetto a un dato considerato più affidabile. Quando non esiste, la metrica diventa invece un indicatore diagnostico della coerenza interna del dataset.

Per evitare interpretazioni assolute, la classificazione Excellent (Exc), Ok e Critical (Crit) è associata a soglie esplicite. In geometria le soglie sono prevalentemente scale-aware, cioè dipendenti dalla tolleranza T e dal GSD o dalla risoluzione attesa. In radiometria le soglie sono definite in funzione di indici percettivi, differenze cromatiche, percentuali di copertura o profili applicativi. Ogni metrica deve produrre non solo un valore sintetico, ma anche una mappa o un report locale quando disponibile, così da distinguere problemi globali da criticità localizzate.

2.1 Metriche geometriche

La valutazione geometrica considera accuratezza, registrazione, completezza, distribuzione spaziale dei punti, coerenza locale delle superfici e qualità topologica della mesh. In un contesto di patrimonio culturale questi aspetti devono essere letti insieme: la sola distanza media non descrive le lacune, la sola completezza non descrive il drift assoluto, e una mesh topologicamente corretta può comunque non rispettare la precisione richiesta.

Reference based: le metriche geometriche reference-based (vedi Tab.1) richiedono un dato esterno più affidabile: punti di controllo indipendenti, nuvole TLS, mesh strutturate o scansioni a luce strutturata. La famiglia include il controllo preliminare della risoluzione, l'accuratezza sui check point, la qualità di co-registrazione tramite ICP, distanze cloud-to-cloud, distanze cloud-to-mesh, M3C2, indicatori di significatività rispetto al livello di detezione, Recall@tau, Precision@tau, F-score, Chamfer distance, Hausdorff robusto, coerenza delle normali e deformazione sistematica [1, 10].

L'aspetto più rilevante è la logica di scala. La tolleranza T definisce l'uso atteso del prodotto, mentre il GSD e la densità di campionamento indicano se il dato può supportare quella scala. Per esempio, per un target 1:50 la tolleranza può essere dell'ordine di pochi millimetri, mentre la stessa nuvola può risultare pienamente idonea a scale 1:200 o 1:500. Per questa ragione i risultati non devono essere comunicati come giudizi assoluti sul rilievo, ma come compatibilità rispetto a una specifica destinazione d'uso [7].

Le metriche basate su distanze robuste, come P95 cloud-to-cloud o cloud-to-mesh, limitano l'effetto di outlier isolati e sono più informative dei massimi assoluti. Gli indicatori Recall@tau e Precision@tau sono invece essenziali per distinguere

completezza e pulizia del dato: un dataset può coprire quasi tutta la superficie di riferimento e al tempo stesso essere affetto da un errore di posizionamento globale.

Tabella 1. Elenco metriche geometriche per il caso Reference Based

Metrica ID	Nome	Unità	Dato in input	Excellent / OK / Critical
RB_G0	Input Dnn & Sampling Resolution	mm	Optical parameters (f, p), distance (H) or SfM Report Ground Res.	Exc: ≤ Dnn (limit). OK: ≤ 1.5xDnn (limit). Crit: > 1.5xDnn (limit).
RB_G1	Checkpoint accuracy (CP)	mm	Independent check points (CP) coordinates + estimated CP coordinates	Exc: RMSE_XY ≤ T & RMSE_Z ≤ 1.5×T OK: RMSE_XY ≤ 1.5×T & RMSE_Z ≤ 2×T Crit: Above these value
RB_G2	Fine co-registration quality (ICP)	mm, %	Reconstruction cloud/mesh + reference cloud/mesh	Exc: inliers ≥ 95% & RMSE ≤ 0.75×T OK: inliers ≥ 90% & RMSE ≤ T Crit: < 90% or RMSE > T
RB_G3	C2C distance (A→B) robust statistics	mm	Registered point cloud A (reconstruction) + point cloud B (reference)	Exc: P95 ≤ T OK: T < P95 ≤ 1.5×T Crit: > 1.5×T
RB_G4	C2C symmetric robust distance	mm	Registered point cloud A (reconstruction) + point cloud B (reference)	Exc: sym P95 ≤ 1.5×T & asym < 20% OK: sym P95 ≤ 3×T or asym 50% Crit: sym P95 > 3xT or asym > 50%
RB_G5	C2M distance (Cloud→Mesh) robust statistics	mm	Registered cloud (reconstruction) + reference mesh (triangulated)	Exc: P95 ≤ T OK: T < P95 ≤ 1.5×T Crit: > 1.5×T
RB_G6	M3C2 distance (normal-directed) robust statistics	mm	Two registered point clouds (reconstruction and reference)	Exc: P95 ≤ T OK: T < P95 ≤ 1.5×T Crit: > 1.5×T
RB_G7	M3C2 significance / CI95 (LoD)	% points	M3C2 outputs (distance + CI95/LoD per point)	Exc: <5% OK: 5-15% Crit: >15%
RB_G8	Completeness vs Reference (Recall@τ)	%	Two registered point clouds or mesh (reconstruction and reference)	Exc: ≥95% OK: 85-95% Crit: <85%
RB_G9	Precision vs Reference (Precision@τ)	%	Registered reconstruction samples + reference	Exc: ≥95% OK: 85-95% Crit: <85%
RB_G10	F-score@τ	[0;1]	Precision@τ and Recall@τ	Exc: ≥0.95 OK: 0.85-0.95 Crit: <0.85
RB_G11	Chamfer Distance (Symmetric, Trimmed)	mm	Registered point cloud A (reconstruction) + point cloud B (reference)	Exc: ≤ 1.5 * Dnn_target OK: ≤ 3 * Dnn_target Crit: > 3 * Dnn_target

RB_G12	Robust Hausdorff (P95)	mm	Registered point cloud A (reconstruction) + point cloud B (reference)	Exc: ≤ 2 * Dnn_target OK: ≤ 4 * Dnn_target Crit: > 4 * Dnn_target
RB_G13	Normal consistency vs Reference	°	Registered reconstruction A + reference B (with normals)	Exc: P95 ≤ 10° OK: 10° - 20° Crit: > 20°
RB_G14	Systematic deformation amplitude	mm or multiple of Dnn	M3C2 signed distance field (CloudCompare)	Exc: ≤ 2 * Dnn_target OK: ≤ 2 - 4 * Dnn_target Crit: > 4 * Dnn_target

No reference based: le metriche geometriche no-reference (vedi Tab. 2) stimano la qualità interna senza ground truth. La proposta HERITALISE include densità locale (NR-G1), coverage ratio (NR-G2), hole ratio (NR-G3), spacing rispetto alla risoluzione attesa (NR-G4), rugosità locale (NR-G5), anomalie di planarità o curvatura (NR-G6), outlier ratio (NR-G7), double surface o ghosting (NR-G8), coerenza cloud-mesh (NR-G9), difetti topologici della mesh (NR-G10), aree anomale da clustering (NR-G11) e stabilità cross-scale (NR-G12).

Questi indicatori non certificano l'accuratezza assoluta. Servono piuttosto a riconoscere campionamenti irregolari, lacune, rumore, aree poco supportate, smoothing e artefatti che potrebbero propagarsi in texture, modelli HBIM, digital twin o classificazioni AI. La definizione della ROI è particolarmente importante per NR-G2 e NR-G3: se la regione attesa è una bounding box generica e non segue la superficie reale, la metrica può sovrastimare i vuoti. Analogamente, NR-G1 può risultare penalizzante quando la griglia di calcolo non è allineata alla superficie acquisita, come nel caso di una parete verticale analizzata su una griglia XY.

Tabella 2. Elenco metriche geometriche per il caso No Reference Based

Metrica ID	Nome	Unità	Dato in imput	Excellent / OK / Critical
NR-G1	Local density uniformity (CV density)	%	Point cloud (dense cloud)	Exc: ≤30% OK: 30–60% Crit: >60%
NR-G2	Coverage ratio	% area	Point cloud + ROI / expected surface region	Exc: ≥90% OK: 75–90% Crit: <75%
NR-G3	Hole ratio	% area	Point cloud + ROI / expected surface region	Exc: <10% OK: 10–25% Crit: >25%
NR-G4	Point spacing vs expected resolution	mm or ×GSD	Point cloud + expected GSD/target spacing	Exc: 0.5–2×GSD OK: 2–3×GSD / Crit: >3×GSD
NR-G5	Local roughness (plane residual)	mm or ×GSD	Point cloud	Exc: ≤1×GSD OK: 1–2×GSD

				Crit: >2×GSD
NR-G6	Abnormal planarity/curvature area	% area	Point cloud (or mesh)	Exc: <5% OK: 5–15% Crit: >15%
NR-G7	Outlier ratio (isolation/low support)	% points	Point cloud	Exc: <1% OK: 1–3% Crit: >3%
NR-G8	Double-surface / ghosting rate	% area/points	Point cloud (optionally normals)	Exc: <1% OK: 1–5% Crit: >5%
NR-G9	Mesh self-consistency (cloud↔mesh)	mm or ×GSD	Dense cloud + produced mesh	Exc: P95 ≤2×GSD OK: ≤4×GSD Crit: >4×GSD
NR-G10	Mesh topology defects	count / %	Produced mesh	low/none / moderate / high *(profile thresholds)*
NR-G11	Anomalous area (DBSCAN/HDBSCAN)	% area	Point cloud + per-cell features	Exc: <5% / OK: 5–15% Crit: >15%
NR-G12	Cross-scale stability (metric drift)	%	Point cloud/mesh at multiple scales	Exc: ≤10% OK: 10–25% Crit: >25%

2.2 Metriche radiometriche

La componente radiometrica valuta fedeltà visiva, colore, comportamento spettrale, presenza di dati validi, artefatti di cucitura e stabilità tra immagini. Nel patrimonio culturale questi aspetti sono centrali perché influenzano interpretazione materica, monitoraggio conservativo, riconoscimento di degradi, texture mapping e uso di modelli AI. Anche in questo caso è necessario separare misure con riferimento da diagnostiche interne.

Reference based: le metriche radiometriche reference-based (vedi Tab. 3) confrontano l'immagine o il prodotto valutato con un riferimento radiometricamente affidabile e geometricamente allineato. RB-R1 utilizza lo Structural Similarity Index per misurare la preservazione di luminanza, contrasto e struttura. RB-R2 usa la differenza colore CIEDE2000, calcolata nello spazio CIELAB, per stimare la fedeltà cromatica percepita. RB-R3 impiega lo Spectral Angle Mapper per confrontare firme multispettrali o iperspettrali. RB-R4 misura la completezza radiometrica come rapporto tra pixel validi nel dato valutato e pixel validi nel riferimento. RB-R5 valuta artefatti su seamline e bordi, spesso legati a mosaicking, texture blending, differenze di esposizione o piccoli disallineamenti [2, 3, 9, 12, 16].

La co-registrazione tra immagine valutata e riferimento è un prerequisito metodologico. Differenze locali di allineamento possono infatti abbassare SSIM, aumentare DeltaE00 o peggiorare RB-R5 senza che ciò dipenda necessariamente da un difetto radiometrico puro. Per questo motivo l'interpretazione deve sempre considerare la catena geometrica e quella radiometrica insieme

Tabella 3. Elenco metriche radiometriche per il caso Reference Based

Metrica ID	Nome	Unità	Dato in imput	Excellent / OK / Critical
RB-R1	SSIM (Structural Similarity Index Measure)vs reference	SSIM [0–1]	Reference image/ortho/texture + aligned product	Exc: ≥0.95 Ok: 0.85–0.95 Crit: <0.85
RB-R2	Color difference vs reference (ΔE00)	ΔE00	Reference + aligned product (or ColorChecker)	Exc: ≤3 Ok: : 3–5 Crit >5
RB-R3	SAM vs reference	°	Reference + aligned product (RGB/multispectral)	Exc : ≤5° Ok: 5–10° Crit : >10°
RB-R4	Radiometric comparison completeness	%	Reference + aligned product	Exc: ≥95% Ok: 85–95% Crit : <85%
RB-R5	Seam/edge artifact vs reference (optional)	relative	Reference + aligned ortho/texture	Low Moderate high

No reference based: le metriche radiometriche no-reference (vedi Tab. 4) lavorano senza immagine calibrata o target esterno. NR-R1 identifica immagini sfocate o outlier di nitidezza attraverso indicatori come varianza del Laplaciano e Tenengrad. NR-R2 e NR-R3 misurano rispettivamente clipping nelle alte luci e nelle ombre. NR-R4 valuta rumore radiometrico anomalo. NR-R5 controlla la coerenza di esposizione tra immagini sovrapposte, mentre NR-R6 valuta la consistenza multi-vista mediante SSIM o NCC su patch corrispondenti. NR-R7 misura derive di bilanciamento del bianco o color cast, NR-R8 gli artefatti interni di seam, e NR-R9 la dinamica utile effettiva.

Queste metriche sono particolarmente utili durante l'acquisizione o nelle fasi iniziali di processamento, perché permettono di intercettare problemi prima della generazione di ortofoto, texture o prodotti semantici. Tuttavia la loro robustezza dipende dalla dimensione del dataset e dalla qualità delle sovrapposizioni. Per esempio, un controllo di outlier di nitidezza su due sole immagini non ha la stessa affidabilità statistica di un controllo su un blocco fotogrammetrico più ampio.

Tabella 4. Elenco metriche radiometriche per il caso No Reference Based

Metrica ID	Nome	Unità	Dato in imput	Excellent / OK / Critical
NR-R1	Blur/sharpness outlier rate	% images	Input images (or texture atlas)	Exc: <5% Ok: 5–15% Crit >15%
NR-R2	Highlight clipping ratio	% pixels	Input images (or texture)	Exc: <1% Ok: 1–3% Crit >3%
NR-R3	Shadow clipping ratio	% pixels	Input images (or texture)	Exc: <5% Ok: 5–15% Crit >15%
NR-R4	Noise outlier rate	% images	Input images	Exc: <5% Ok: 5–15% Crit >15%
NR-R5	Exposure consistency in overlaps	%	Overlapping image pairs / reprojected patches	Exc: <10% Ok: 10–25% Crit >25%
NR-R6	Multi-view radiometric consistency (SSIM/NCC)	SSIM / NCC	Overlapping tiles or reprojected surface patches	Exc: P10 SSIM ≥0.85 Ok: 0.70–0.85 Crit <0.70
NR-R7	White-balance / color cast drift	Δa*, Δb*	Input images	Exc: Small Ok: Moderate Crit large *(profile thresholds)*
NR-R8	Texture seam artifact score (internal)	relative	Ortho/texture output	Exc: Low Ok: Moderate Crit :high *(profile thresholds)*
NR-R9	Effective usable dynamic range	stops (relative)	Input images	Exc: ≥8 stops Ok: 6–8 Crit :<6 *(camera-dependent)*

3 Risultati preliminari

I risultati preliminari dei due diversi casi studio della Reggia di Venaria Reale, dimostrano l'utilità di un approccio a metriche multiple. Le prove non mirano a chiudere la validazione complessiva del progetto, ma a verificare la capacità degli indicatori di descrivere situazioni reali e non banali: dati visivamente buoni ma non adeguati a una scala molto fine; immagini cromaticamente accettabili ma con perdita di bordi; metriche no-reference influenzate dalla geometria della ROI o dall'orientamento della griglia.

3.1 Metriche geometriche

Sul muro di Castellamonte la valutazione reference-based è stata impostata alla scala 1:50, con T pari a 2,5 mm e risoluzione target pari a T/4. Il dataset fotogrammetrico da UAV, acquisito con DJI Matrice 350 e Zenmuse P1, è stato confrontato con una nuvola TLS Leica RTC360. Il GSD medio riportato dal processamento è pari a 15,5 mm; tale valore è coerente con una documentazione architettonica generale, ma non con il

requisito molto più stringente della scala 1:50. Di conseguenza il controllo di risoluzione risulta Critical per quella specifica scala [6].

Il confronto con i check point indipendenti ha restituito un RMSE complessivo di 17,4 mm, mentre l'ICP tra fotogrammetria e TLS ha prodotto un RMSE di 13,21 mm con Inlier Ratio prossimo al 100%. Questa combinazione è metodologicamente significativa: l'elevato inlier ratio indica una sovrapposizione priva di gross errors, mentre l'RMSE evidenzia un drift sistematico rispetto al riferimento. Anche le distanze robuste e M3C2 risultano Critical alla scala 1:50, ma gli indicatori di completezza e pulizia del dato mostrano un quadro diverso: Recall@tau pari a 99,99%, Precision@tau pari a 100% e F-score pari a 0,9999. Il risultato conferma che il problema principale non è la copertura morfologica della superficie, bensì il posizionamento assoluto rispetto alla tolleranza dichiarata. La deformazione sistematica è contenuta; la deriva è prevalentemente rigida (vedi Fig. 2). I risultati sono riassunti in Tabella 5.

La valutazione no-reference, condotta sullo stesso dataset e con GSD atteso di 15,5 mm, ha mostrato criticità per NR-G1, NR-G2 e NR-G3. NR-G1 ha restituito 194,9360% ed è stato classificato Critical; coverage ratio e hole ratio sono risultati rispettivamente 43,1111% e 56,8889%. Tali valori sono influenzati dall'uso di una griglia XY non allineata alla parete verticale, che genera celle apparentemente vuote o densità molto disomogenee anche quando la superficie reale è campionata. Al contrario, metriche come roughness locale, planarity/curvature, outlier ratio, coerenza cloud-mesh e difetti topologici indicano risultati positivi. Questo conferma che le metriche no-reference devono essere accompagnate da scelte geometriche corrette, in particolare ROI e sistema locale orientato alla superficie.

Tabella 5. Risultai metriche geometriche reference based per il caso studio: muro di Castellamonte

Criterio	Valore	Esito
RB_G0	GSD = 15,5 mm	CRITICAL
RB_G1	RMSE CP = 17,4 mm	EXCELLENT
RB_G2	RMSE ICP = 17,7 mm & IR ≈ 99%	OK
RB_G3	P95 > 99,6 mm	CRITICAL
RB_G4	P95 > 36,42 mm	CRITICAL
RB_G5	P95 = 36,3 mm	CRITICAL
RB_G6	P95 = 22,9 mm	OK
RB_G7	Sig. Change = 98,2%	CRITICAL
RB_G8	Recall = 85,9%	OK
RB_G9	Precision = 59,6%	CRITICAL
RB_G10	F-score = 0,704	CRITICAL
RB_G11	CD = 43,64 mm	CRITICAL
RB_G12	Haus. P95 > 99,6 mm	CRITICAL
RB_G13	P95 $\Delta\theta$ = 84,96°	CRITICAL

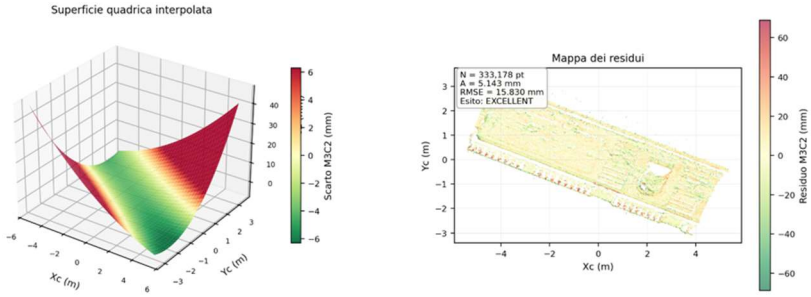

Fig 2. Report di RB_G14: fitting quadrico degli scarti M3C2 firmati sul muraglione. A sinistra: superficie quadrica fittata; a destra: mappa dei residui.

3.2 Metriche radiometriche

La scrivania Mazzarina è stata utilizzata per verificare le metriche radiometriche su un oggetto complesso per materiali, colore e riflettanza (vedi Tab. 5). Nel test reference-based, RB-R1 ha prodotto SSIM pari a 0,8874, classificato OK, indicando una buona similarità strutturale ma con differenze locali ancora presenti. RB-R2 ha restituito DeltaE00 pari a 5,6902, anch'esso classificato OK, quindi con una differenza cromatica percepibile ma entro l'intervallo accettabile adottato nel framework. RB-R3 ha prodotto SAM pari a 9,9419 gradi, classificato OK, mentre RB-R4 ha raggiunto 99,2992% ed è stato classificato Excellent, confermando una quasi completa conservazione dell'informazione radiometrica valida [15].

Il risultato più critico è RB-R5, pari a 77,7324% e classificato Critical. L'indicatore segnala una perdita di informazione sui bordi e sulle transizioni nette, compatibile con sfocatura, ricampionamento o lieve disallineamento tra immagine valutata e riferimento. In un manufatto decorato questo aspetto è rilevante perché i bordi e i dettagli fini contribuiscono alla lettura dei materiali e delle tecniche esecutive.

Nel test no-reference, NR-R2 ha indicato clipping nelle alte luci pari a 0,7579% ed NR-R3 clipping nelle ombre pari a 0,0392%, entrambi Excellent. L'immagine quindi non perde informazione in modo significativo agli estremi tonali. Tuttavia NR-R9, pari a 4,9984 stop, è Critical: la dinamica utile risulta compressa, pur in assenza di clipping elevato. Questo mostra l'importanza di usare più indicatori radiometrici: un'immagine può essere esposta senza saturazioni rilevanti ma avere comunque una gamma tonale insufficiente per distinguere variazioni sottili di materiale e superficie.

Tabella 5. Risultai metriche radiometriche reference based per il caso studio: scrivania Mazzarina.

Criterio	Valore	Esito
RB_R1	SSIM = 0,8874	OK
RB_R2	Delta E00 = 5,6902	OK
RB_R3	SAM = 9,9419	OK

RB_R4	Radiometric completness[%]=99,2992	EXCELLENT
RB_R5	Edge preservation [%]=77,7324	CRITICAL



Fig. 3. A sinistra: immagine acquisita della scrivania Mazzarina con ColorChecker. A destra: immagine calibrata per calcolo metriche radiometriche reference based.

4 Conclusioni

Il quadro di metriche HERITALISE consente di trasformare la valutazione della qualità da giudizio qualitativo a procedura esplicita, documentabile e ripetibile. La distinzione tra reference-based e no-reference è essenziale: le prime metriche quantificano lo scostamento da un riferimento affidabile, mentre le seconde forniscono diagnostiche interne utili quando un ground truth non è disponibile. In entrambi i casi, l'indicatore deve essere interpretato rispetto alla scala, al tipo di oggetto, alla ROI, alla risoluzione attesa e alla qualità della co-registrazione.

I test preliminari mostrano tre evidenze principali. Primo, la classificazione geometrica è fortemente scale-aware: il dataset del muro di Castellamonte è coerente con documentazione architettonica generale ma non con una scala 1:50 molto stringente. Secondo, completezza morfologica e accuratezza assoluta non coincidono: Recall, Precision e F-score possono essere Excellent anche in presenza di drift sistematico. Terzo, le metriche no-reference sono potenti ma richiedono una parametrizzazione coerente con la geometria dell'oggetto; una griglia non orientata alla superficie può rendere Critical indicatori di densità, coverage e hole ratio senza riflettere una reale cattiva acquisizione.

Per la componente radiometrica, le prove confermano la necessità di combinare indici percettivi, cromatici e diagnostici. SSIM, DeltaE00, SAM e completezza radiometrica descrivono aspetti complementari rispetto a bordi, clipping e dinamica utile. Lo sviluppo futuro riguarderà il consolidamento delle soglie, l'integrazione di mappe locali nei report, la gestione di dataset multi-scala e l'estensione dell'automazione nella HERITALISE Quality Tool, con particolare attenzione a ROI orientate alla superficie e controlli di affidabilità per dataset piccoli.

5 Acknowledgments

Il presente studio è stato realizzato nell'ambito del progetto HERITALISE (Horizon Europe).

6 Riferimenti bibliografici

1. Besl, P. J., McKay, N. D.: A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14(2), 239-256 (1992).
2. Brunet, D., Vrscay, E. R., Wang, Z.: On the mathematical properties of the structural similarity index. IEEE Transactions on Image Processing 21(4), 1488-1499 (2012).
3. Brown, M., Lowe, D. G.: Automatic panoramic image stitching using invariant features. International Journal of Computer Vision 74, 59-73 (2007).
4. CIPA Heritage Documentation: 3 x 3 rules for simple photogrammetric documentation of architecture (2013).
5. European Commission: Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage. Publications Office of the European Union (2022).
6. Historic England: Photogrammetric Applications for Cultural Heritage. Guidance for Good Practice. Historic England, Swindon (2017).
7. Historic England: Geospatial Survey Specifications for Cultural Heritage. Historic England, Swindon (2024).
8. International Organization for Standardization: ISO 19157-1:2023 Geographic information - Data quality - Part 1: General requirements. ISO, Geneva (2023).
9. Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., Goetz, A. F. H.: The spectral image processing system (SIPS) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. Remote Sensing of Environment 44, 145-163 (1993).
10. Lague, D., Brodu, N., Leroux, J.: Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 82, 10-26 (2013).
11. Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J.: Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. 3rd edn. De Gruyter, Berlin (2020).
12. Luo, M. R., Cui, G., Rigg, B.: The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. Color Research and Application 26(5), 340-350 (2001).
13. Remondino, F., El-Hakim, S.: Image-based 3D modelling: a review. The Photogrammetric Record 21(115), 269-291 (2006).
14. Remondino, F.: Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. Remote Sensing 3(6), 1104-1138 (2011).
15. Sharma, G., Wu, W., Dalal, E. N.: The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. Color Research and Application 30(1), 21-30 (2005).
16. Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., Simoncelli, E. P.: Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. IEEE Transactions on Image Processing 13(4), 600-612 (2004).