



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per la Sostenibilità
a.a. 2024/2025
Sessione di Laurea Febbraio 2025

Tecniche geomatiche per la digitalizzazione del patrimonio architettonico

Classificazione nuvole di punti 3D mediante algoritmi di
Machine Learning.
Caso studio dell'Abbazia di Novalesa.

Relatori:

Antonia Teresa Spano'
Giacomo Patrucco

Candidato:

Leonardo Bonerotto

Indice

Abstract	3
1. Introduzione	4
1.1 Obiettivo della tesi	8
2. L'abbazia di Novalesa	10
2.1 Inquadramento storico	13
2.2 Aspetti architettonici	21
3. Il rilievo metrico 3D dell'abbazia di Novalesa	27
3.1 Il rilievo Global Navigation Satellite System della rete topografica	30
3.2 La rete topografica per il rilievo 3D dell'abbazia di Novalesa	33
• 3.2.1 Il sistema di riferimento e il sistema di coordinate	35
3.3 Il rilievo topografico dei punti di controllo	37
3.4 Rilievo fotogrammetrico con UAS del complesso abbaziale	40
• 3.4.1 Principi e processo fotogrammetrico	40
• 3.4.2 Fotogrammetria con Unmanned Aerial Vehicle applicata all'abbazia della Novalesa	46
3.5 Rilievo laser scanner distanziometrico terrestre dei fronti architettonici della Chiesa Santi Pietro e Andrea	50
• 3.5.1 Funzionamento e caratteristiche del laser scanner terrestre	50
• 3.5.2 Applicazione del laser scanner terrestre nel sagrato dell'abbazia di Novalesa	52
• 3.5.3 Registrazione delle scansioni	53
4. I sistemi di Machine Learning	55
4.1 Il sistema ML supervisionato applicato all'abbazia della Novalesa	57
4.2 Pre-elaborazione e ottimizzazione del dataset	59
• 4.2.1 Pre-elaborazione a scala architettonica	63

• 4.2.2 <i>Pre-elaborazione a scala ambientale</i>	68
4.3 Gli algoritmi d'apprendimento.....	70
• 4.3.1 <i>Gli algoritmi Random Forest</i>	71
• 4.3.2 <i>Algoritmo basato su features geometriche e software classificatore</i>	84
4.4 Over-fitting e replicabilità	93
4.5 Metriche per la valutazione.....	110
• 4.5.1 <i>Metriche di valutazione delle nuvole del sagrato dell'abbazia della Novalesa a scala architettonica</i>	112
• 4.5.2 <i>Metriche di valutazione delle nuvole dell'abbazia della Novalesa a scala ambientale</i>	127
5. Il modello BIM da nuvola classificata.....	132
6. Conclusioni	135
7. Bibliografia	139
8. Sitografia	142
9. Tavole.....	144

Abstract

L'ambito dei beni architettonici è estremamente eterogeneo e articolato rendendo la tutela del manufatto complicata. Basti pensare al numero di maestranze e professionisti che si alternano per restaurare e conservare il bene in epoche diverse in seguito a calamità naturali o alla semplice erosione del tempo. Intervendo su un bene attuiamo delle modifiche, alterazioni le quali devono essere registrate, documentate e archiviate in maniera precisa, veloce e dettagliata. Mediante le tecniche geomatiche multi-sensore abbiamo la possibilità di acquisire un'istantanea dell'architettura nelle sue condizioni attuali operando in tempi ridotti e modi non invasivi. L'acquisizione del dato mediante tecniche multi-sensore è una pratica ormai consolidata, facilmente accessibile ed automatizzata. Questa produzione costante di nuovi dati necessita di essere gestita, strutturata ed archiviata attraverso sistemi informatizzati adottando un linguaggio codificato che permette a vari professionisti del settore di operare in maniera congiunta sul medesimo dato digitale. Nello specifico stiamo parlando di piattaforme come il BIM (*Building Information Modeling*) o il GIS (*Geographic Information System*) con i rispettivi linguaggi di codifica IFC (*Industry Foundation Classes*), CityGML (*Geography Markup Language*).

La ricerca geomatica oggi si concentra su come strutturare e archiviare il dato in maniera automatica riducendo i tempi di elaborazione attraverso l'impiego dell'intelligenza artificiale. L'idea è quella di riuscire a realizzare un sistema in grado di apprendere dai dati digitali fornitigli raccolti con tecniche LiDAR (*Light Detection and Ranging*) potendo successivamente adoperare il sistema istruito su nuovi dati digitali incogniti abbattendo tempi di elaborazione, errori ed incertezze. L'applicazione di un sistema d'intelligenza artificiale su un dato geomatico può aiutarci nel riconoscere elementi architettonici, materici, di degrado, e facilitare il passaggio da modello digitale a parametrico. Le sue applicazioni possono essere molteplici per differenti scopi ed analisi.

1. Introduzione

La geomatica è la disciplina che attraverso strumenti e metodi informatizzati consente di acquisire, modellare, interpretare, elaborare, archiviare, divulgare qualsiasi oggetto avente una consistenza materica georeferenziandolo in un sistema di riferimento noto unico. I campi di applicazione della geomatica sono molteplici e a scale molto differenti tra loro: geodesia, cartografia, topografia, sistemi informativi territoriali, fotogrammetria, telerilevamento (ISO 19101, standard ISO/TC211). Il rilievo di un bene culturale è la prima operazione fondamentale che ci permette di comprendere a pieno lo stato dell'oggetto nelle sue forme, dimensioni e matericità. In base all'obiettivo e all'analisi che portiamo avanti definiremo i metodi e la strumentazione idonea per l'ottenimento di un risultato che sia il più accurato, preciso, veloce e sostenibile per i nostri scopi. Le tecnologie a nostra disposizione per il rilievo e le successive elaborazioni informatiche ci permettono di analizzare e comprendere molteplici aspetti del bene da tutelare: forma e composizione architettonica, assetto morfologico paesaggistico, supporto e valutazione dei rischi ambientali, stato di conservazione materico, comportamenti strutturali agli elementi finiti, ricostruzioni di stadi antecedenti al manufatto originario, indagini diagnostiche (Spanò, Donadio, Chiabrando 2017). Il rilievo ci restituisce un'istantanea delle condizioni del bene potendo effettuare restituzioni grafiche ed analisi utili ad intraprendere le corrette azioni future necessarie per tutelare e conservare il bene. Gli strumenti a nostra disposizione ad oggi nell'ambito della geomatica sono estremamente informatizzati, automatizzati e richiedono da parte dell'operatore (a seguito di una attenta pianificazione) minimi interventi sul campo se confrontati con metodi del passato, potendo raccogliere un elevato numero di dati digitali. I metodi diretti longimetrici nel campo del rilievo geomatico ad oggi ricoprono un ruolo secondario di supporto alle più moderne, sviluppate e consolidate tecnologie multi-sensore dette LiDAR che prevedono in particolare l'impiego di laser scanner (sensori attivi) e fotogrammetria digitale (sensori passivi) integrati tra loro. Entrambe lavorano nel campo delle onde elettromagnetiche acquisendo dati in forma diretta (emissione di un fascio laser) o indiretta catturando la luce visibile emessa dagli oggetti (Patrucco, Chiabrando, Spanò 2018). Questi sistemi di misura automatizzati hanno spostato in modo significativo l'intervento da parte dell'operatore dal campo alla fase di elaborazione dei dati per l'estrazione di modelli digitali 3D del bene. Il dato grezzo in uscita

acquisito deve essere reso comprensibile, filtrato ed usufruibile per le successive restituzioni ed analisi. L'aspetto di maggior interesse nella ricerca nell'ambito della geomatica è come automatizzare questo processo di elaborazione dei dati per generare modelli 3D georeferenziati di varia natura (nuvole di punti, *mesh*, *mesh texturizzate*, modelli 3D parametrici) o estrarre dati strutturati, categorizzati, etichettati, segmentati secondo l'analisi che stiamo conducendo. Tale operazione per essere portata a termine grazie ad operazioni umane richiede un dispendio di tempo e viene fatta in maniera soggettiva. Per automatizzare, standardizzare e ridurre i tempi necessari all'estrazione e strutturazione delle informazioni raccolte si possono adottare sistemi di ML (*Machine Learning*) e DL (*Deep Learning*) appartenenti al campo dell'intelligenza artificiale. I temi del ML e del DL oggi sono attuali più che mai, come possiamo vedere dalla figura 1 l'interesse e lo studio intorno a queste tematiche è molto acceso. La loro applicazione per quanto riguarda la disciplina della geomatica interessano i seguenti ambiti ed applicazioni:

- Segmentazione di nuvole di punti per l'attribuzione automatica di istanze predefinite o incognite.
- Automazione per la generazione di una superficie solida (*mesh*) che approssimi quella reale riducendo aberrazioni e incongruenze della nuvola di punti di partenza.
- Riconoscimento automatico con associazione di elementi parametrici appartenenti all'ambiente BIM, HBIM (*Heritage Building Information Modeling*) utilizzando linguaggi di codifica che mettano in relazione il modello digitale 3D con il software parametrico.
- Segmentazioni e riconoscimento all'interno di immagini di: punti, linee, curve, angoli, simmetrie, aree, o altri parametri geometrici, materici o di degrado che connotano l'oggetto.
- Realizzazione di simulazioni e scenari predittivi futuri sulla base di uno storico di dati per il controllo e monitoraggio del bene.

(Patrucco, Setragno 2023).

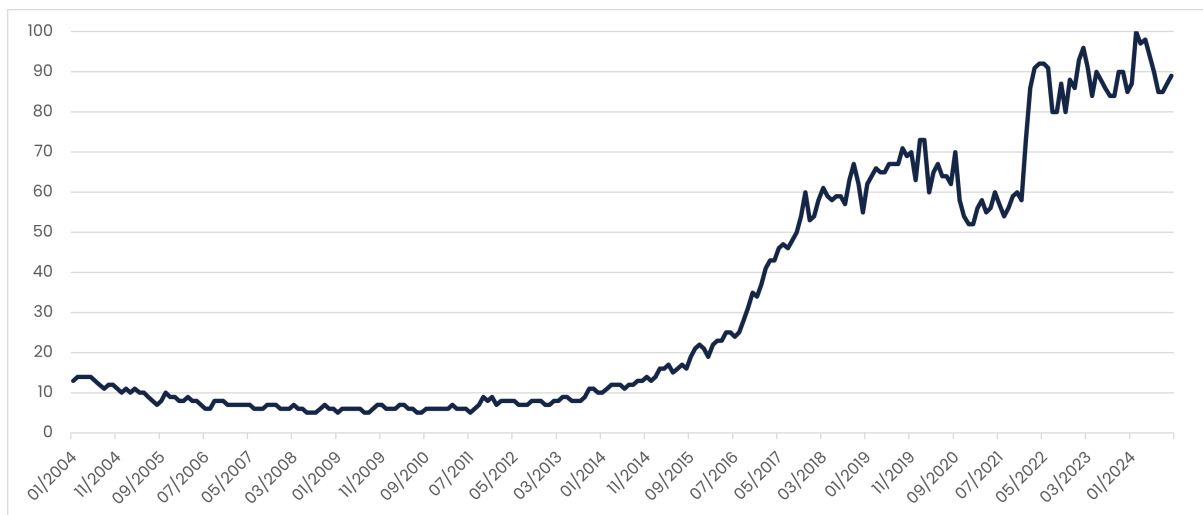


Figura 1 Interesse nella ricerca del termine machine learning dal 2004 al 2024, 100 l'interesse è massimo 0 l'interesse è nullo (Google trends 2024).

L'altro ambito di importanza fondamentale su cui si concentra la geomatica riguarda la gestione e l'interoperabilità del modello digitale 3D attraverso l'utilizzo di piattaforme e strumenti in grado di raccogliere, integrare, condividere, archiviare, strutturare, estrapolare e produrre nuovi dati in maniera semantica realizzando un ecosistema, report digitale del bene culturale architettonico costituito da differenti progetti, analisi, schede descrittive, annotazioni utili per futuri approcci multidisciplinari al bene (Roussel, De Luca 2023). Le piattaforme designate a questo compito sono il BIM e il GIS per rendere disponibile e accessibile lo scambio di dati ai differenti attori che concorrono alla conservazione e valorizzazione del bene.

BIM/HBIM trovano un ampio uso in ambito architettonico ingegneristico. Gli elementi che compongono il fabbricato vengono modellati in maniera parametrica. La parametrizzazione delle geometrie degli elementi edilizi ci permette di associare a quel singolo componente o famiglia una base dati digitale. Lo scambio di dati geometrici spaziali numerici avviene mediante lo standard di comunicazione IFC che permette di creare processi collaborativi e scambio di dati in maniera biunivoca in modo che differenti saperi sempre più specializzati possano scambiarsi informazioni in un linguaggio standard codificato univoco (Lo Turco 2015). Il GIS riguarda maggiormente gli aspetti geografici a scala ambientale, ma può essere applicato anche a livello architettonico. Il concetto però rimane il medesimo, cioè garantire il corretto flusso di dati ed informazioni tra diverse figure professionali. Il GIS e il BIM non solo ci permettono di realizzare elaborati e analisi condivisibili, ma anche di

costruire archivi, registri storici digitali dei beni architettonici, paesaggistici, territoriali, archeologici. Definiamo questi sistemi informativi navigabili 3D "digital twin", i quali replicano l'oggetto nel suo stato attuale mediante l'incrocio e interoperabilità di molteplici dati digitali provenienti da differenti discipline (Spanò, Patrucco, Sammartano, Perri, Avena, Fillia, Milan 2023). Nell'immagine 2 a seguire riportiamo in maniera schematica il processo di acquisizione e digitalizzazione di un bene architettonico con il supporto e l'integrazione di un'intelligenza artificiale per la restituzione, compressione, conservazione e archiviazione dell'oggetto edilizio.

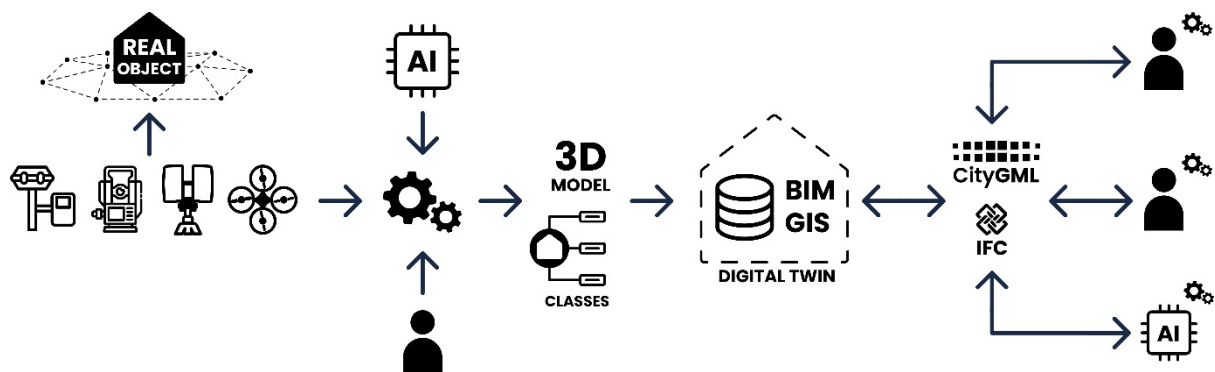


Figura 2 Schema del flusso di lavoro.

1.1 Obiettivo della tesi

L'oggetto di studio e applicazione di tecniche geomatiche per la digitalizzazione dei beni architettonici paesaggistici riguarda l'abbazia situata a Novalesa. Verrà fatto un breve excursus storico dell'abbazia necessario alla comprensione ed introduzione del bene attraverso l'analisi di fonti e documenti storici archeologici utili a delineare ed inquadrare le principali fasi, connotazioni, stratificazioni, aspetti architettonici stilistici materici antecedenti ed attuali. Verranno illustrate le procedure necessarie per la realizzazione di un rilievo partendo dalle operazioni topografiche della rete d'inquadramento per georiferire i metodi di misura successivi ad un sistema di riferimento assoluto unico. Nello specifico le tecniche e gli strumenti impiegati sono la fotogrammetria aerea mediante UAS (*Unmanned Aerial System*) sistemi a pilotaggio remoto di velivoli civili a ridotte dimensioni dotati di fotocamera e il laser scanner distanziometrico terrestre. Da queste due tecniche integrate tra loro otteniamo il dato grezzo che deve essere processato per estrapolare il modello digitale 3D non strutturato dell'abbazia (nello specifico nuvole di punti). Il dato digitale elaborato ed ottimizzato verrà testato applicando tecniche di ML per l'analisi ed estrazione in automatico di istanze o classi attribuendo al modello digitale un ulteriore livello informativo di valore e di dettaglio. Il focus principale di questa tesi verte sui sistemi supervisionati di ML per classificare nuvole di punti. Vengono illustrati i passaggi necessari per creare un modello addestrato al fine di metterlo successivamente alla prova comprendendo lo stato dell'arte ad oggi dei sistemi di ML supervisionati nell'ambito architettonico ambientale, testandone la facilità di applicazione, l'accessibilità e verificando la validità con opportune metriche del sistema di ML al variare dell'algoritmo d'apprendimento impegnato, della molteplicità dei dati del campione e al mutare delle classi.

Verranno applicati differenti modelli addestrati sia a scala ambientale, guardando alla totalità del complesso abbaziale generale, che architettonica focalizzandosi sui prospetti riguardati la Chiesa dei Santi Pietro e Andrea e altri corpi di fabbrica adiacenti in affaccio sul sagrato, in modo da estrarre dati utili ad una migliore analisi materica e comprensione architettonica dell'oggetto esaminato in maniera automatica e standardizzata, individuando i pro e i contro dei vari sistemi di ML adottati. Infine, verrà fatta una restituzione

architettonica e un'analisi materica dei prospetti riguardanti il sagrato della Chiesa dei Santi Pietro e Andrea.

2. L'abbazia di Novalesa

La Val di Susa si caratterizzava nel Medioevo per la presenza di diverse abbazie, le quali esercitavano controllo e giurisdizione sui territori circostanti e fornivano riparo ai viandanti che dovevano attraversare le Alpi percorrendo la Via Francigena. Queste abbazie non solo erano centri religiosi, ma anche luoghi di cultura e di studio, contribuendo alla diffusione della conoscenza e della fede cristiana in un periodo di grandi trasformazioni sociali e politiche (Baldino 1973).

Esse ricoprivano un ruolo fondamentale nel territorio. Erano gli unici centri di ristoro e sosta per pellegrini e mercanti. Punti nevralgici che fornivano riparo per la notte, viveri per uomini e bestie, stallaggio e sostituzione degli animali da soma: tutte le attività connesse per garantire suddetti servizi erano in mano alle varie congregazioni ecclesiastiche. Le più note oltre all'abbazia della Novalesa erano San Michele della Chiusa e San Giusto di Susa (Ceri 2004).

L'Abbazia di Novalesa è situata in una valle laterale alla Val di Susa, la Val Cenischia. Essa si caratterizza per un ingresso particolarmente stretto, ad imbuto, che tende ad allargarsi aumentando di altitudine (Rossi 1973). La posizione strategica della valle facilitava il controllo dei valichi alpini e delle vie di comunicazione, rendendola uno snodo per i traffici commerciali e i pellegrinaggi. Caratteristici sono i versanti delle montagne, quasi a strapiombo sulla parte pianeggiante della valle, che formano diverse cascate e corsi d'acqua (Rossi 1973). Il complesso sorge alle pendici del Monte Giusalet distaccato dal nucleo centrale del paese situato a una quota di circa 820 m s.l.m. (Rossi 1973). La sua posizione rispetto all'esposizione solare risulta estremamente sfavorevole: questo perché si è pensato in primis di costruire l'abbazia su un rilievo, più in alto rispetto al resto della valle in modo da controllare il territorio e i suoi transiti (Bartolomasi 1998). Nelle immagini 3, 4 e 5 vengono riportati gli estratti degli allestimenti cartografici riguardanti l'abbazia della Novalesa e l'omonimo paese limitrofo.

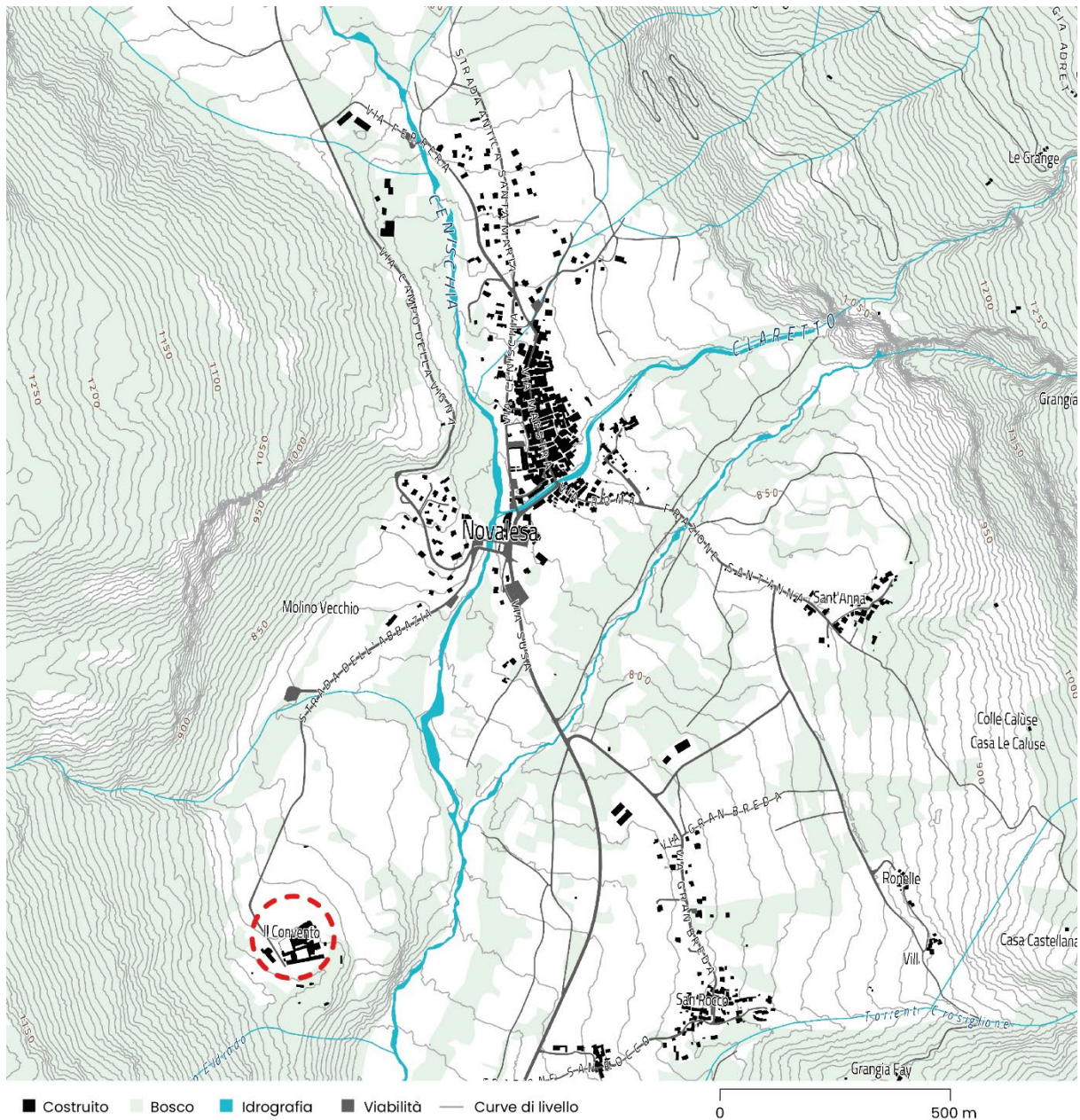


Figura 3 Inquadramento topografico di Novalesa, in rosso l'abbazia (geoportale Regione Piemonte Allestimento cartografico BDTRE 2024).

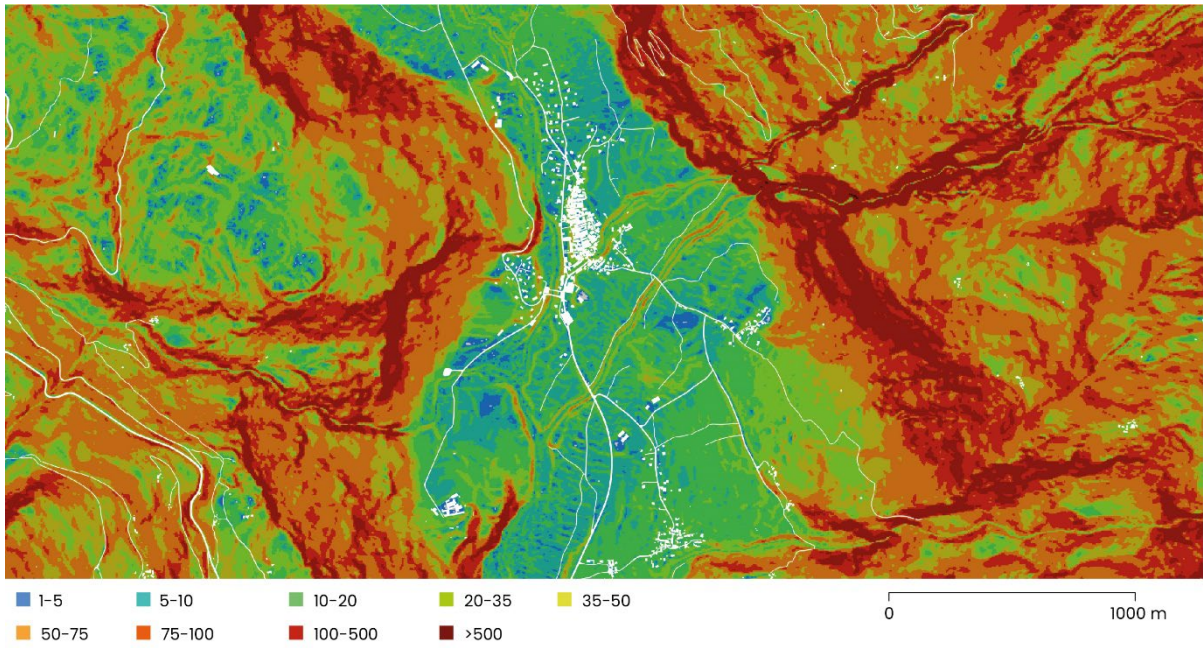


Figura 4 Mappa pendenze percentuali (geoportale Regione Piemonte Allestimento cartografico BDTRE 2024).

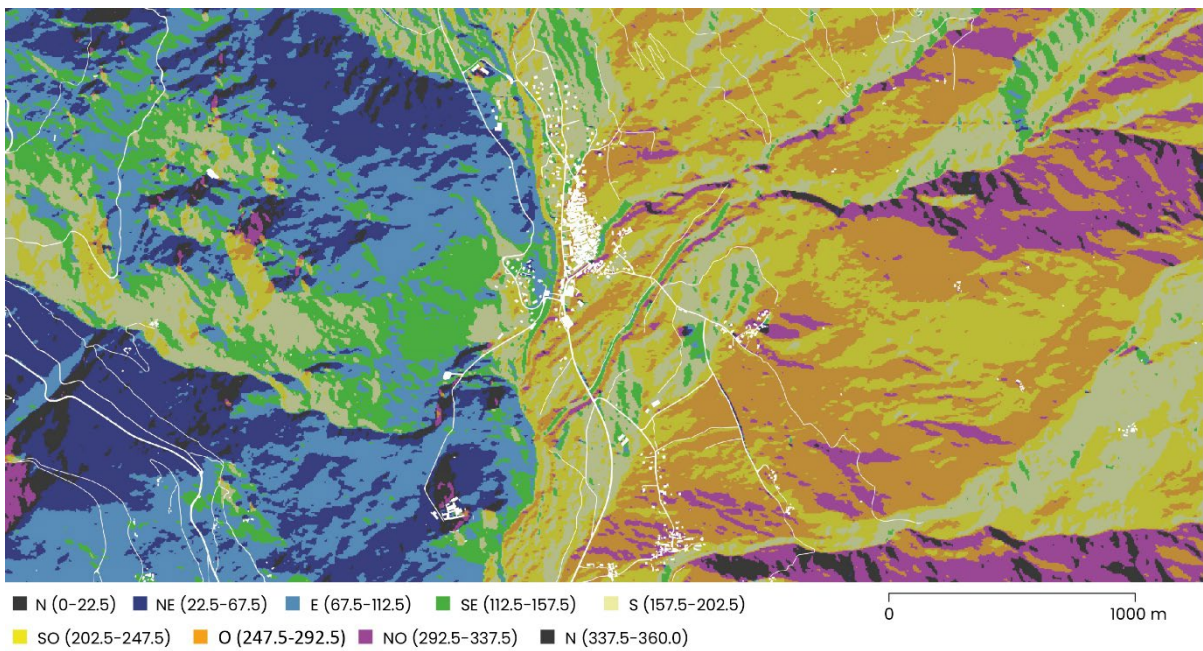


Figura 5 Mappa esposizioni solari (geoportale Regione Piemonte Allestimento cartografico BDTRE 2024).

2.1 Inquadramento storico

L'Abbazia di Novalesa fondata nel 726 d.C. in onore dei Santi Pietro e Andrea è la più antica della Val di Susa, fu voluta dal vescovo Valcuno e dal patrizio Abbone proprietario di vasti territori nelle valli alpine (Savi, Ferrero 1973). Abbone donò alla nuova abbazia i terreni, comprendenti anche la forza lavoro che vi dimorava, sia al di là delle Alpi (si trattava di appezzamenti più ridotti e frammentati), sia sul versante attualmente italiano (costituito da un territorio più esteso e omogeneo). Il tutto è testimoniato da un atto di fondazione ufficiale firmato da Abbone stesso riportato in figura 6 ed oggi conservato presso l'Archivio di Stato di Torino (Sergi 2004, Bartolomasi 1998).

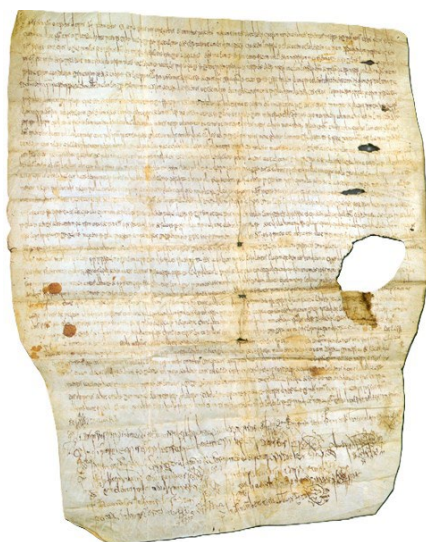


Figura 6 Atto di fondazione dell'abbazia della Novalesa 726 d.C. (Archivio di Stato di Torino).

L'abbazia era posizionata in un punto nevralgico che collegava il passo del Moncenisio con il resto della Val di Susa. A capo della Novalesa venne posto come priore l'abate Godone, il quale adottò la dottrina benedettina che includeva l'obbligo di occuparsi dei viandanti, dei pellegrini e degli infermi e si basava su principi di preghiera e lavoro, sintetizzati nel motto "Ora et labora", prevedendo anche l'istruzione e l'assistenza sociale come parte integrante della vita monastica (Blandino 1973). Di estrema rilevanza doveva essere anche la biblioteca dove i monaci miniavano libri e documenti (Blandino 1973). Nell'atto di fondazione, conservato oggi presso l'Archivio di Stato di Torino, l'abbazia aveva completa giurisdizione sull'intero territorio e sugli immobili che vi insistevano. Inoltre, aveva pieno controllo sulla forza lavoro e sui servi della gleba a disposizione che organizzava e gestiva per l'attività agricola e forestale, nonché sulle questioni religiose e spirituali. Per finire,

l'abbazia controllava e tassava tutti i transiti commerciali che avvenivano attraverso il valico (Blandino 1973). Questa autonomia fu fondamentale per il suo sviluppo economico e culturale, poiché permetteva di gestire le risorse in modo efficiente e indipendente dalle autorità laiche. Il priore ricopriva quindi una carica non solo religiosa, ma anche amministrativa e giuridica, sostenuta sia dal Papa che dai regnanti al di qua e al di là delle Alpi, i quali concessero diversi favori all'abbazia nel corso della storia, come terreni, denaro e potere spirituale assoluto (Bartolomasi 1998). Difatti dalla val Cenischia i possedimenti si allargarono a valle acquistando terreni a Giaglione, Oulx, Bardonecchia e occupando quindi la parte alta della val di Susa. L'abbazia aveva forti legami sia con lo stato pontificio che con le corti nobiliari del periodo come Merovingi, Carolingi e Longobardi: essa aveva quindi un ruolo di grande rilevanza all'interno dello scenario politico del tempo (Cerri 2004).

Il Chronicon Novalicense riportato in figura 7 e conservato presso l'Archivio di Stato di Torino è stato scritto da un monaco benedettino nel XI secolo e ripercorre la storia dell'abbazia (purtroppo in maniera non sempre attendibile) narrando addirittura che Carlo Magno abbia soggiornato presso la Noalesa durante il viaggio per recarsi dal papa Adriano I, anche se non ci sono riscontri a sostegno di ciò (Sergi 2004).

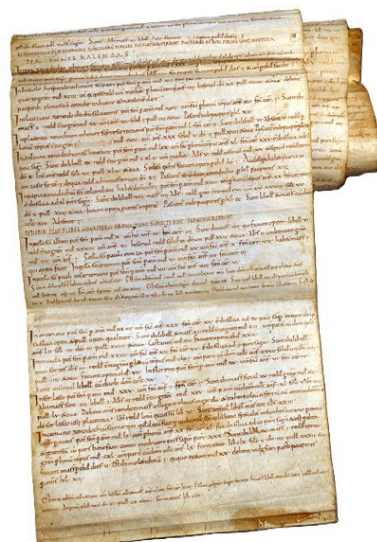


Figura 7 Chronicon Novalicense, composto da 28 fogli cuciti uno di seguito all'altro (Archivio di Stato di Torino).

In età carolingia, l'abbazia raggiunse il suo massimo splendore: nel 827 vi erano oltre 500 monaci (Blandino 1973). Tra questi spiccava per notorietà la figura di Eldrado, a cui venne successivamente dedicata un'intera cappella. L'immagine 8 riporta una porzione della

volta affresca dell'capella dedicata ad Eldrado dove vengono raffigurante alcune scene della vita del santo (Cerri 2004).



Figura 8 Scene della vita di Sant'Eldrado nella capella a lui dedicata (Cerri 2004).

Alla morte del suo predecessore, Eldrado venne nominato priore all'unanimità dai confratelli. In questo periodo storico di massimo splendore i monaci potevano decidere autonomamente la nuova figura che avrebbe guidato la congregazione senza sottostare a imposizioni provenienti dall'esterno della confraternita (Bartolomasi 1998). Tuttavia, con l'aumento delle ricchezze e del potere, l'abbazia incominciò a trascurare le indicazioni della dottrina benedettina, attirando l'attenzione di molti predoni di passaggio nella valle. Da qui iniziò un lungo declino, con la progressiva perdita di monaci, potere e influenza, fino al completo abbandono (Sergi 2004).

Il primo grande colpo venne inferto dai Saraceni che, all'inizio del X secolo, saccheggiarono l'intero complesso e diedero fuoco alla Chiesa SS. Pietro e Andrea. Questo evento segnò una svolta drammatica nella storia dell'abbazia, che vide il suo patrimonio culturale e artistico gravemente compromesso (Blandino 1973). La comunità benedettina che aveva preventivamente abbandonato il monastero prima del saccheggio, tra il 912 e il 925 si disperse: alcuni monaci andarono a Breme in Lomellina dove fondarono un nuovo monastero, altri si rifugiarono a Torino presso la Chiesa di sant'Andrea (oggi corrisponde

all'odierno santuario della Consolata), lasciando incustodito l'intero patrimonio. Da questo momento in poi la sede principale a cui l'abbazia di Novalesa doveva fare riferimento fu quella di Breme (Sergi 2004).

La cacciata dei Saraceni e il ristabilimento dell'ordine nella Val di Susa furono opera del conte Arduino il Glabro, ma i monaci vi fecero ritorno solo un secolo dopo ed in numero molto esiguo; inoltre, i rapporti tra i religiosi e le corti nobiliari del periodo non erano più così cordiali: le donazioni divennero molto esigue, in particolare la stirpe di Arduino che aveva riportato l'ordine nella valle concesse molto poco alla comunità monastica (Bartolomasi 1998). L'abate in carica nel 972 scrisse una missiva al Papa sottolineando le ostilità che vi erano tra il marchesato degli Arduino e l'abbazia di Novalesa (Wataghin, Destefanis 2004). Grazie ai paesani locali, i monaci iniziarono verso la fine del X secolo il restauro e il ripristino dell'abbazia, guidati dal priore Bruningo. Il monaco Bruningo fu nominato priore dalla nuova sede di riferimento a Breme per ristabilire l'ordine e riportare in auge l'antico splendore dell'abbazia. Il restauro comportò non solo la ricostruzione fisica degli edifici, ma anche il recupero delle tradizioni spirituali e culturali (Blandino 1973). Questo intervento permise all'abbazia di risollevarsi parzialmente, riacquistando alcuni dei privilegi perduti, ma senza tornare allo splendore precedente. I lavori di ripristino si protrassero per decenni e furono avviati all'inizio del secolo XI. Il potere spirituale che aveva avuto l'abbazia nei secoli precedenti stava diminuendo e nuovi monasteri stavano assumendo maggiore rilevanza all'interno della Val di Susa: tra questi spiccavano San Michele della Chiusa e San Giusto di Susa come possiamo vedere anche dalla figura 9 (Wataghin, Destefanis 2004).



Figura 9 Carta divisioni ecclesiastiche Val di Susa e Chisone senza data e senza sottoscrizione, scala 1: 115'200 (Archivio di Stato di Torino).

L'abbazia della Novalesa venne completamente ricostruita a spese della sede di riferimento di Breme. Avendo perso il loro ruolo nella valle i monaci novalicensi decisero di concentrare i loro sforzi nel consolidare il potere territoriale nella val Cenischia, nei possedimenti oltralpe (contea di Moriana, bacino Isère, e territori di Gap) e sul passo del Moncenisio, riuscendo ad ottenere nel 1202 il controllo dell'ospizio situato sul valico, il quale disponeva di decime e liquidità monetaria elevata di cui la Novalesa aveva estremo bisogno (Sergi 2004). L'abbazia consolidò i rapporti con i conti Moriana e la casata dei Savoia (Umberto II di Savoia e la figlia Adelaide) i quali erano in contrasto con gli Arduino, cercando in tal modo di ottenere maggiore indipendenza dalla sede di Breme e rafforzando il potere spirituale sui paesi limitrofi come Venaus e Giaglione per garantirsi le dovute entrate (Wataghin, Destefanis 2004). Le corti e le casate che avevano garantito protezione fino a quel momento divennero gradualmente interlocutori più ostili a cui rivolgersi con circospezione dal momento che l'immunità totale non era più garantita (Sergi 2004).

Emersero anche i primi contrasti tra il potere dell'abbazia e la Santa Sede. La massima carica della Novalesa non era più riservata a un monaco appartenente al monastero, ma a una figura esterna, il cardinale Ruffino (1337-1384), il quale si concentrò più sull'amministrazione delle ricchezze e sul controllo del territorio che sugli aspetti spirituali. Anche i successori di Ruffino, sempre esterni al monastero e talvolta non ecclesiastici, adottarono politiche simili, compromettendo ulteriormente il prestigio dell'abbazia. Le figure che si susseguirono facevano parte della famiglia Provana, facoltosa casata aristocratica della val di Susa (Blandino 1973). Questa gestione esterna e spesso poco attenta agli aspetti strettamente religiosi causò una crescente insoddisfazione tra i frati e i fedeli locali, indebolendo ulteriormente la comunità monastica. Ciò comportò un progressivo abbandono da parte dei religiosi, che rimasero in numero ridotto (Blandino 1973). Per ripopolare l'abbazia, vennero accolti monaci cistercensi a partire dal XVI secolo. L'abbazia passò quindi dall'ordine benedettino a quello cistercense nel 1637.

Nel Seicento il controllo dell'abbazia e dei territori annessi passò allo stato sabaudo che non si curò minimamente della sua condizione di degrado (Lunardi 1998). I cistercensi rimasero fino al 1810. Nel 1710 Vittorio Amedeo II incaricò l'architetto Antonio Bertola, al tempo ingegnere e architetto militare di corte, di ripristinare la chiesa che venne totalmente ripensata (Savi 1973). Nel 1810 Napoleone abolì gli ordini religiosi e realizzò la strada carrozzabile che passava per i principali centri della val di Susa, tagliando completamente fuori la val Cenischia. L'abbazia cadde in declino fino al ritorno dei Savoia, che ristabilirono il controllo sul territorio e ripristinarono gli ordini religiosi precedentemente aboliti (Savi, Ferrero 1973). Il ritorno dei Savoia nel 1820 segnò un tentativo di rinascita della Novalesa, ma il contesto politico e sociale era ormai profondamente cambiato rispetto ai secoli precedenti. I frati benedettini, guidati dall'abate Marietti, tornarono all'abbazia, ma il numero di adepti e novizi fu esiguo (Blandino 1973).

La legge Siccardi del 1855 che aboliva le congregazioni religiose e poneva i possedimenti ecclesiastici sotto controllo statale, segnò la fine della Novalesa: tutti i terreni e gli edifici in possesso dell'abbazia vennero venduti; tutti i documenti, i libri e le opere artistiche vennero spostate in altre sedi (Lunardi 1998). A quel tempo vivevano presso il monastero quindici monaci. Mediante una pubblica vendita all'asta nel 1862, l'abbazia divenne prima un centro

idroterapico del dottore Maffoni (gli spazi della chiesa vennero adattati per accogliere un ristorante e spazi termali) e successivamente nel 1884 una colonia per gli studenti del Collegio Nazionale di Torino (Wataghin 2004). Questi adattamenti alterarono significativamente la struttura originaria dell'abbazia, rendendo difficile il recupero del suo valore storico e artistico. Successivamente l'architetto Alfredo d'Andrade studiò il complesso della Novalesa dichiarando che non poteva essere considerato di valore monumentale; pertanto, rimase per lungo tempo in completo abbandono (Cerri 2004).

Nel 1972, l'abbazia fu acquistata dall'amministrazione provinciale di Torino che ne divenne la proprietaria, gestendola ed amministrandola ancora oggi. Il suo restauro è stato portato avanti dalla Provincia di Torino e dalla Soprintendenza del Piemonte. Diverse sono le figure che si sono alternate: ricordiamo l'archeologa Gisella Cantino Wataghin docente presso l'Università degli Studi di Torino e l'architetto Andrea Bruno (Cerri 2004).

Nel 1976 e 1981 si tennero due convegni che facevano il sunto dei restauri compiuti e di ciò che si era riportato alla luce in termini di dati e notizie storiche riguardanti l'abbazia. Oltre alla ricostruzione del suo aspetto originario sono stati costituiti un museo archeologico nel 2009 che mostra al pubblico i reperti rinvenuti dagli scavi e una nuova biblioteca per lo studio e la conservazione dei libri. Negli ultimi anni l'abbazia è tornata ad ospitare una comunità monastica di benedettini che ha ripreso la vita liturgica e di preghiera, nonché le attività agricole e di accoglienza dei pellegrini. Questo ritorno ha segnato una rinascita spirituale e culturale per il complesso (Cerri 2004, Baldino 1973, Uggè 2012). Di seguito riportiamo la linea cronologica con le tappe principali della storia dell'abbazia della Novalesa.

- **726 d.C.** Il patrizio Abbone e il vescovo Valcuno fondano l'abbazia di Novalesa. Viene insediata una comunità monastica benedettina, come priore viene nominato Godone
- **773 d.C.** Il priore Frodoino ospita alla Novalesa l'imperatore Carlo Magno
- **814 d.C.** Viene realizzato l'ospizio del Moncenisio
- **822 d.C.** Eldrado viene nominato priore. Periodo di massimo splendore dell'abbazia
- **912 – 920 d.C.** L'abbazia viene abbandonata preventivamente dai monaci per paura di saccheggi. La comunità si disperde tra Breme e Torino. Breme diventa il punto di riferimento per la comunità benedettina.
- **947 d.C.** Arduino il Glabro ristabilisce l'ordine nella Val di Susa. Fanno ritorno i monaci, ma il potere che esercitano è compromesso.
- **Fine del X sec.** Si reinsedia definitivamente la comunità benedettina guidata dal priore Bruningo. Interventi per risistemare l'intero complesso mediante l'aiuto della forza lavoro locale e fondi provenienti da Breme.
- **983 d.C 1027 d.C.** vengono fondate rispettivamente San Michele della Chiusa e San Giusto di Susa in diretta competizione con l'abbazia di Novalesa.
- **Inizio del XI sec.** L'abbazia della Novalesa consolida il suo potere territoriale sull'ospizio del Moncenisio, Venaus, Giaglione. Consolida i rapporti con casata dei Savoia e dei Moriana staccandosi dalle dipendenze di Breme.
- **Metà del XI sec.** Viene scritto da un monaco il Chronicon Novalicense.
- **1350** Viene nominato nuovo priore il cardinale Ruffino esterno alla comunità benedettina di Novalesa.
- **1480** Per quasi due secoli i priori che si susseguono alla guida dell'abbazia sono esterni alla comunità e fanno tutti parte della famiglia Provana.
- **1637** L'abbazia passa all'ordine cistercense.
- **1710** Vittorio Amedeo II incarica l'architetto Antonio Bertola di ripensare completamente la chiesa dell'abbazia adattandola ai gusti e canoni stilistici del tempo.
- **1810** Napoleone scioglie tutti gli ordini ecclesiastici.
- **1820** I Savoia si riappropriano della Val di Susa: fanno ritorno all'abbazia i Benedettini guidati dall'abate Marinetti, ma il numero di monaci rimane molto esiguo.
- **1855** Legge Siccardi abolisce congregazioni religiose e pone i possedimenti ecclesiastici sotto il controllo statale.
- **1862** L'abbazia viene venduta all'asta al dottor Maffoni che ne fa un centro idroterapico.
- **1884** L'abbazia diventa una colonia per gli studenti del Collegio Nazionale di Torino.
- **1972** La Provincia di Torino acquista l'abbazia della Novalesa di cui è tuttora proprietaria, inserendo una comunità benedettina proveniente da Venezia.
- **1973** Avviata campagna archeologica dell'intero complesso abbaziale ad opera dell'archeologa e docente Gisella Cantino Wataghin.
- **1981** Convegno che rende pubblici i risultati dello scavo archeologico e le ricerche condotte sul complesso.
- **1982** Intervento sulla manica di Santa Lucia.
- **1985 – 1991** intervento di riqualificazione della manica sud con l'inserimento di un laboratorio per il restauro di libri antichi.
- **1995** La chiesa completamente restaurata viene riconsacrata ed aperta al pubblico.
- **1997** Ulteriori lavori sotto la direzione dell'architetto Andrea Bruno per la riqualificazione e usufruibilità di tutti gli spazi dell'abbazia rimasti inagibili.
- **2009** Apertura al pubblico del museo archeologico.
- **2015** stage studentesco Team Direct del Politecnico di Torino per la documentazione metrica del complesso.
- **2026** Celebrazione 1300 anni dalla fondazione.

Figura 10 Cronologia riassuntiva abbazia di Novalesa (Blandino 1973, Patrucco 2016)

2.2 Aspetti architettonici

Per ricostruire i vari periodi storici dell'abbazia nei primi anni Settanta del secolo scorso è stata avviata una intensa campagna archeologica da parte della Provincia di Torino guidata dalla archeologa Gisella Cantino Wataghin. Il complesso della Novalesa si caratterizza per un nucleo centrale di origine e stile preromanico dove si concentrano le principali attività e funzioni dell'abbazia: la chiesa, la mensa, la biblioteca, la foresteria per viandanti e pellegrini, il chiostro e le celle dei monaci (Savi 1973). Il nobile Abbone nell'atto di donazione indicava come figura di progettista della costruzione il vescovo Valcuno. Gli scavi archeologici hanno individuato tre fasi principali di costruzione: una prima e una seconda fase preromanica e la fase romanica. Di seguito l'immagine illustra le varie tappe di edificazione dell'abbazia a seguito degli studi archeologi che sono stati condotti da Gisella Cantino Wataghin (Uggè 2012).

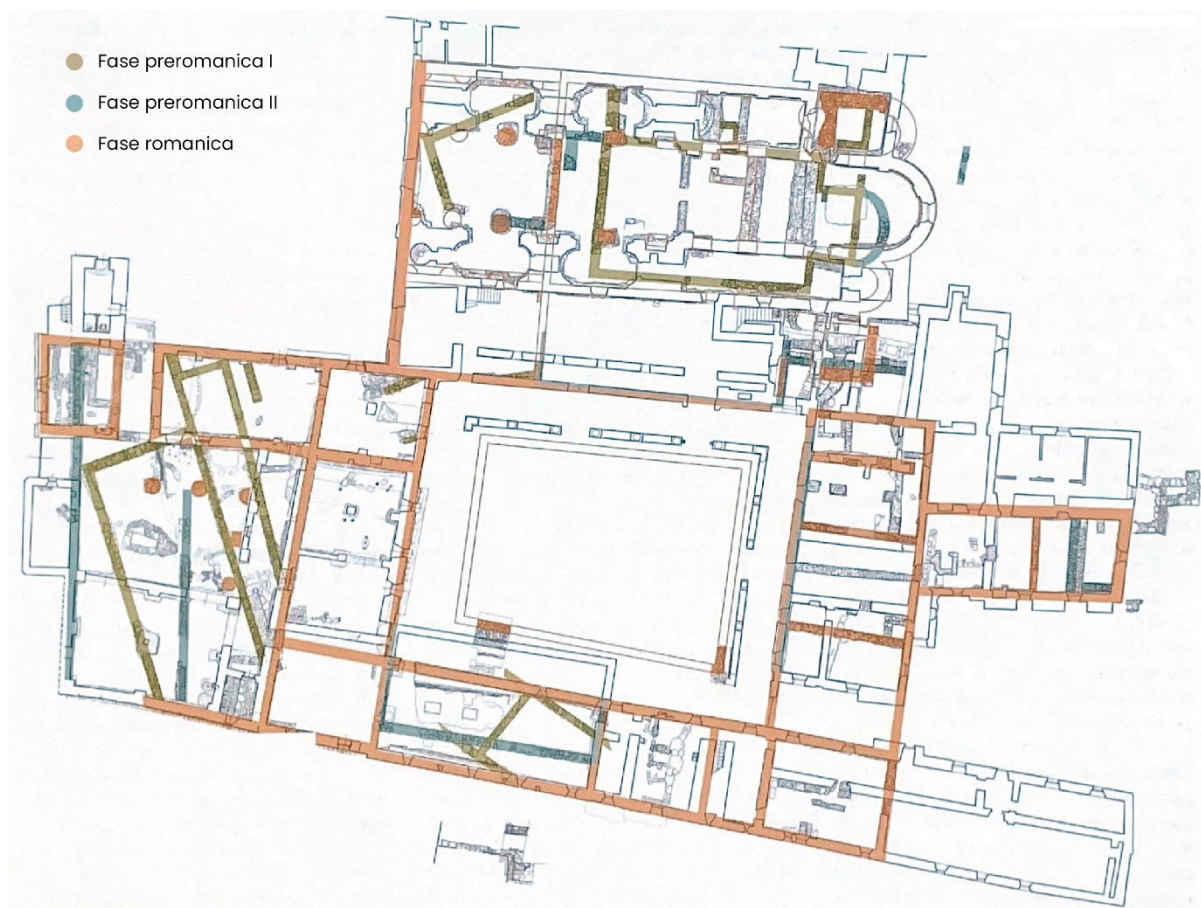


Figura 11 Tavola delle fasi principali di costruzione (Cerri 2004).

La prima e più antica fase preromanica risulta in termini di fondazioni murarie completamente disallineata con gli altri periodi. Al contrario la seconda fase preromanica e quella romanica sono allineate fra di loro e definiscono l'impianto originario dell'abbazia che possiamo vedere ancora oggi (Wataghin 2004). Dagli scavi archeologici rimane ancora un dubbio che non è stato risolto, cioè se prima della fondazione del monastero esistesse già qualcosa in loco. L'atto di donazione redatto da Abbone non riporta nulla sulla presenza di fabbricati. Gli scavi hanno portato alla luce lacerti marmorei e cocciopesto ma non si è riusciti a determinare se siano di architetture precedenti al monastero o materiale di riutilizzo proveniente dalla vicina città di Susa. Abbiamo la certezza che i Romani usavano il passo del Moncenisio per arrivare in Gallia; quindi transitavano per la val Cenischia (Wataghin 1988). Ciò che possiamo immaginarci della prima costruzione nel 724 è un monastero dall'aspetto assai sobrio e semplice con edifici massivi e robusti (Savi 1973). Intorno al territorio dell'abbazia sorgono delle cappelle distaccate dal complesso centrale e costruite successivamente (Santa Maria, San Michele, San Salvatore, Sant'Eldrado). L'abbazia, nel corso dei suoi 1300 anni dalla fondazione, ha subito diverse trasformazioni a seguito di lunghi abbandoni, saccheggi e adattamenti ai vari periodi storici. Ciò che possiamo vedere oggi a livello architettonico è una complessa stratificazione dove si trovano amalgamati fra loro differenti periodi storici. Tali trasformazioni sono testimonianza di vicende complesse e travagliate, ma anche della capacità di adattamento e resilienza della comunità monastica. La campagna archeologica portata avanti negli anni Settanta e successivi dalla Città metropolitana di Torino ha fatto chiarezza sulle fasi che l'intero complesso ha attraversato. Qui riportiamo solo i risultati e le osservazioni ottenute per quanto riguarda il nucleo centrale dell'abbazia, tralasciando le capelle distaccate dal complesso. Della chiesa originale rimangono solo alcuni lacerti. Si trattava di una navata unica con presbiterio quadrangolare e una cappella funeraria sul lato nord (Wataghin 1988). Questi resti forniscono importanti informazioni sull'architettura e sulle pratiche funerarie dell'epoca. Il sagrato, durante l'Alto Medioevo fino al XIV secolo era utilizzato come luogo di inumazione per figure laiche di spicco, mentre i monaci venivano seppelliti nella parte antistante l'abside (Uggè 2012). Successivamente, il sagrato venne adattato per accogliere una serie di attività legate alla vita quotidiana oggi non più visibili. Anche di

quello che doveva essere il convento con i vari corpi di fabbrica originari rimangono poche tracce difficilmente identificabili (Cerri 2004).

Il primo grande intervento che venne apportato alla chiesa da parte di Eldrado fu l'inserimento di un campanile. La costruzione del campanile tra il VIII e IX secolo non solo rappresentava un elemento architettonico di rilievo, ma anche un simbolo del potere e della presenza dell'abbazia nel territorio nel periodo di massimo splendore (Cerri 2004). Di questo campanile non rimane nulla se non le testimonianze storiche riportate nel Chronicon (Wataghin 2004).

All'inizio del IX secolo, la chiesa subì una serie di interventi che ne modificarono l'abside, trasformandola da quadrangolare a semicircolare (Uggè 2012). Con l'arrivo dei Saraceni e il successivo abbandono da parte dei monaci, che fecero ritorno nell'XI secolo, la chiesa venne completamente ripensata dal priore Bruningo: divenne a tre navate con volte a tutto sesto e una copertura a capriate; rispetto a quella preromanica le sue dimensioni aumentarono in lunghezza e sulle navate laterali vennero inserite delle cappelle (Wataghin 2004). Questi ampliamenti riflettevano non solo un'esigenza pratica di maggiore spazio, ma anche una volontà di riaffermare il prestigio dell'abbazia. La chiesa venne divisa in due per delimitare l'accesso al coro da parte dei fedeli e fu ampiamente decorata. Fu realizzato un nuovo campanile in corrispondenza dell'abside. Furono anche risistemati il refettorio, il chiostro ed altri corpi di fabbrica minori (Uggè 2012). Il piano di ricostruzione messo in atto dal monaco architetto Bruningo non sembra seguire delle regole ben precise, innanzitutto perché il cantiere rimase aperto per molti anni e Bruningo non ne vide la fine; in secondo luogo per la messa a terra del progetto furono utilizzati gli allineamenti dei muri principali esistenti traslando all'esterno quelli nuovi da realizzare in modo da effettuare un raddoppio in termini spaziali (Wataghin, Destefanis 2004).

Con l'arrivo dei cistercensi intorno al XIV secolo, gli interventi apportati alla chiesa furono minimi: vennero rimosse alcune cappelle e rifatte alcune decorazioni interne rendendola più sobria e spoglia in accordo con la regola cistercense. Una porzione della chiesa fu dedicata a forno fusorio per la realizzazione delle nuove campane andate perdute in precedenza (Uggè 2012).

La chiesa che possiamo osservare oggi è il totale rifacimento realizzato nel XVII secolo dall'architetto Antonio Bertola e Francesco Gallo su incarico di Vittorio Amedeo II. L'intervento si caratterizzò per l'adattamento a navata unica sulla quale affacciavano quattro cappelle laterali e un profondo presbiterio, il tutto decorato secondo il gusto barocco (Savi 1973). Tra il presbiterio della chiesa e il chiostro venne realizzato un vano per mettere in comunicazione le due parti. Con l'acquisizione da parte dei privati prima come centro termale poi come colonia del Collegio Nazionale di Torino la chiesa venne suddivisa in vani più piccoli per fare spazio alle nuove attività. Tutte queste aggiunte che non avevano alcun rapporto con la funzione originaria dell'edificio religioso furono completamente rimosse durante la campagna archeologica del 1973. Nell'immagine 12 possiamo vedere la campagna archeologica all'interno della Chiesa dei Santi Pietro e Andrea con la rimozione delle manomissioni precedenti e riportando alla luce delle varie fasi storiche che connotano l'abbazia (Wataghin, 2004).



Figura 12 Interno della Chiesa Santi Pietro e Andrea durante la campagna di scavi archeologici (Cerri 2004).

A conclusione della stessa si sono susseguiti per diversi anni vari interventi ad opera sempre della Provincia di Torino (soggetto proprietario) per ricondurre al riuso funzionale dei vari ambienti dell'abbazia (Bruno 2004). Nel 1982 si segnala l'intervento di restauro e consolidamento strutturale sulla manica di Santa Lucia dove vengono collocate le nuove residenze dei monaci. Tra il 1985 e il 1991 si eseguono lavori sulla manica sud per inserire un laboratorio per il restauro di libri antichi (Bruno 2004). Nel 1995 la chiesa ristrutturata è stata

aperta al pubblico e riconsacrata (Bruno 2004). Nel 1997 è stato avviato sotto la guida dell'architetto Andrea Bruno un cantiere per risistemare tutte le ali e i locali che erano ancora inagibili internamente a causa dell'abbandono e degrado, in modo da poter accogliere nuove funzioni future sia per quanto riguarda la vita monastica e religiosa, sia in previsione dell'apertura al pubblico del museo archeologico avvenuta nel 2009 che mette in mostra come è visibile nell'immagine 13 i reperti archeologici rivenuti dagli scavi condotti presso l'abbazia della Novalesa (Bruno 2004).



Figura 13 Museo d'arte religiosa alpina dell'abbazia della Novalesa (Uggè 2012).

3. Il rilievo metrico 3D dell'abbazia di Novalesa

Per rilievo geomatico si intende l'insieme di tutte quelle procedure e metodologie aeree o terrestri necessarie alla generazione di nuvole di punti 3D per la documentazione e l'analisi del patrimonio architettonico. Esse ci permettono di costruire un modello virtuale navigabile del manufatto. La nuvola di punti generata dal rilievo rappresenta l'elemento base di comprensione del complesso abbaziale in tutti i suoi aspetti architettonici e materici, ma le informazioni contenute nella nuvola non sono ancora filtrate e classificate secondo una gerarchia definita (Spanò, Donadio, Chiabrandò 2017). Queste operazioni di classificazione sono prevalentemente demandate ad un operatore umano che le individua mediante interpretazione personale. Il rilievo geomatico ci permette quindi di raccogliere e registrare informazioni in maniera non strutturata e categorizzata. Lo scopo del rilievo dell'abbazia della Novalesa è quello di ottenere una nuvola di punti 3D il più precisa e dettagliata possibile dello stato attuale del complesso cercando di acquisire tutte le informazioni utili per la restituzione grafica alla scala desiderata e per l'analisi architettonica, materica del patrimonio da tutelare e conservare applicando algoritmi d'intelligenza artificiale.

Il rilievo del complesso prevede in primis inquadramento e georeferenziazione mediante l'acquisizione e materializzazione dei vertici topografici. La rete topografica costituisce il primo *layer* di supporto a cui riferire le successive fasi di rilievo. Essa ci permette di esprimere le coordinate oggetto in un sistema di riferimento noto unico evitando la propagazione dell'errore e garantendo l'omogeneità delle misure. Per l'abbazia della Novalesa i vertici topografici sono stati misurati in prevalenza mediante l'impiego di tecniche GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (Patrucco, Chiabrandò, Spanò 2018).

Una volta materializzata e misurata la rete d'inquadramento che deve abbracciare l'edificio passiamo all'acquisizione vera e propria dell'architettura in sé, cioè il rilievo di dettaglio. Mediante le avanzate e consolidate tecniche multi-sensore abbiamo la possibilità di misurare in maniera indiretta milioni di punti in tempi ridotti e a bassa invasività. Nello specifico per la Novalesa sono state adottate fotogrammetria aerea UAS e laser scanner distanziometrico terrestre.

Come vedremo successivamente queste acquisizioni per la generazione di nuvole di punti non vengono fatte in maniera "intelligente": lo strumento infatti misura tutto ciò che è presente in quell'istante senza una logica. Per questo una volta effettuato il rilievo sul campo è necessario procedere ad una elaborazione manuale mediante software oppure si possono addestrare algoritmi d'intelligenza artificiale a compiere tali operazioni.

Per il rilievo di dettaglio sono state applicate due metodologie differenti:

- Fotogrammetria aerea (sensori passivi) con drone: ci permette di lavorare su range ampi potendo acquisire vaste porzioni di territorio e creando nuvole di punti la cui densità e precisione è in funzione della distanza di acquisizione. La nuvola di punti viene generata in maniera indiretta grazie ad algoritmi di *Image Matching* e *Structure from Motion*, avendo a disposizione del medesimo oggetto differenti fotogrammi da punti di vista diversi.

- Laser scanner distanziometrico terrestre (sensori attivi): opera su range più ristretti ottenendo maggiore precisione e una densità della nuvola per superficie più elevata. Si tratta di acquisire tramite impulso laser diretto i vari punti che costituiscono la nuvola.

Con la prima metodologia è stato possibile ottenere una nuvola di punti riguardante l'intero complesso monastico operando su scala ambientale, mentre con la seconda soluzione ci si è avvalsi di una nuvola di punti a scala architettonica dei prospetti riguardanti gli edifici in affaccio sul sagrato e l'ingresso principale della Chiesa dei Santi Pietro e Andrea (Spanò, Donadio, Chiabrando 2017). Mediante l'adozione di queste metodologie è stato possibile acquisire molteplici informazioni geometriche e radiometriche dell'abbazia a differenti scale, integrando dove necessario le informazioni mancanti a causa delle limitazioni a cui sono soggette le due tecniche di misura. Operando mediante drone i dati sono nettamente migliori per gli elementi architettonici paralleli al terreno mentre i prospetti sono carenti: esattamente l'opposto del laser scanner che opera da terra il cui dato è ottimo per i prospetti ma nullo per le coperture.

Le nuvole di punti ottenute e processate contengono sufficienti dati e informazioni per applicare successivamente gli algoritmi di intelligenza artificiale e generare elaborati grafici utili alla comprensione e lettura dell'edificio nei suoi aspetti territoriali, architettonici e materici nella opportuna scala di rappresentazione.

Il rilievo dell'abbazia della Novalesa è stato condotto nel 2015 da parte del *Team Direct (Disaster RECOVERY Team)* del Politecnico di Torino in occasione di uno stage studentesco per mostrare e mettere in pratica differenti tecnologie e metodologie di rilievo (Patrucco, Chiabrandò, Spanò 2018).

3.1 Il rilievo *Global Navigation Satellite System* della rete topografica.

Per rilevare il complesso abbaziale georeferenziandolo in un sistema di riferimento unico dobbiamo partire dalla rete d'inquadramento topografica e successivamente scendere nel dettaglio del manufatto. Il rilievo d'inquadramento, inoltre, ci serve per contenere la propagazione dell'errore. La rete topografica deve quindi avere un grado di precisione superiore rispetto al rilievo di dettaglio (Riggio, Carlucci 2015). Per ottenere questo grado di precisione il rilievo della rete topografica può avvenire mediante stazione totale o GNSS. Quest'ultima tecnologia è stata sviluppata a cavallo tra gli anni Settanta e Ottanta per scopi militari tra USA e URSS. Oggi è ormai ampiamente consolidata e utilizzata in differenti ambiti comuni della vita quotidiana per la geolocalizzazione di un qualsiasi oggetto sulla superficie terrestre. I sistemi GNSS attuali si compongono dei seguenti elementi come schematizzato nell'immagine numero 14:

- La stazione di controllo a terra: verifica la costellazione di satelliti e il loro corretto posizionamento e funzionamento (orbite, misura del tempo, rilevamento di malfunzionamenti)
- Il segmento spaziale orbitante intorno alla Terra composto da una costellazione di satelliti, i quali montano orologi atomici (cesio e rubidio) per una maggiore precisione di misura del tempo ed emettono costantemente un segnale.
- L'utente a terra dotato di un'antenna che capta il segnale emesso dai satelliti.

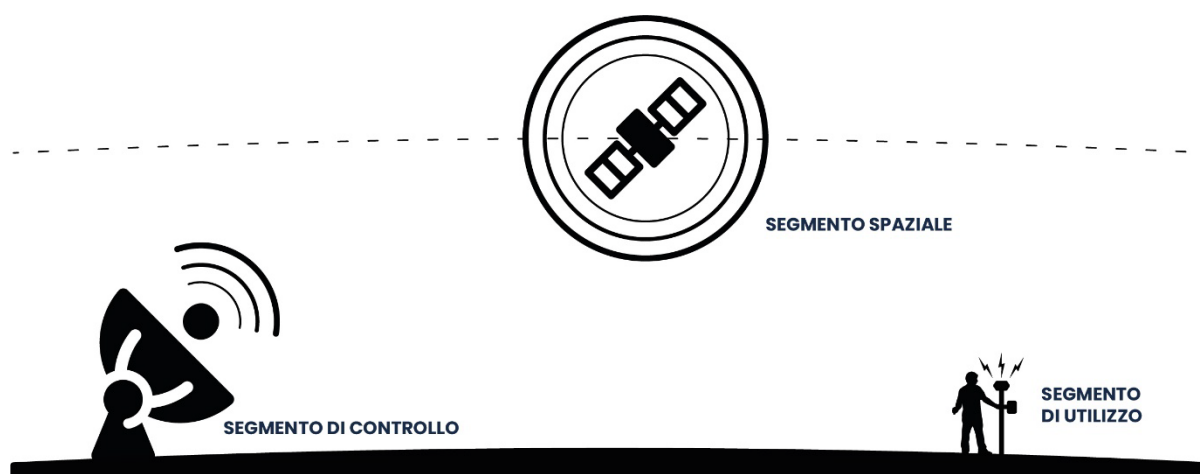


Figura 14 I vari componenti del sistema GNSS

Nel corso del tempo molti paesi hanno sviluppato e completato il proprio sistema GNSS (GPS Stati Uniti, GLONASS Russia, Galileo Europa, BeiDou Cina). Il GPS (*Global Positioning*

System) è quello più impiegato perché il primo ad essere completato con la disponibilità di 24 satelliti orbitanti ed accessibile a soggetti civili (Bertocci, Bini 2021).

Per rilevare una rete topografica possiamo procedere con tre differenti approcci (per il rilievo GNSS in ambito geomatico in genere si opera in maniera statica): posizionamento relativo, differenziale ed assoluto di precisione. Ciò che cambia tra queste metodologie è la strumentazione impiegata (il numero di antenne e il tipo di stazionamento), il grado di precisione che può andare da centimetri a millimetri, il tipo di errore in cui possiamo incorrere e che possiamo minimizzare (errori accidentali, errori sistematici, errori d'orologio, errori effemeridi/orbita, rifrazione troposfera ionosfera, variazione centro di fase dell'antenna, errore riflessione segnale) e il tempo di stazionamento dello strumento sul vertice (Cina 2014).

Il sistema GNSS ci permette di misurare la posizione di un punto incognito sulla superficie terrestre esprimendolo nelle sue coordinate (X, Y, Z) attraverso un'intersezione spaziale distanziometrica tra i segnali sferici emessi da tre differenti satelliti (Cina 2014). Per determinare le coordinate del punto sulla Terra dobbiamo risolvere tre equazioni a tre incognite in modo da calcolare per ogni satellite la distanza che intercorre con l'antenna a terra conoscendo la posizione del satellite nello spazio (X, Y, Z) . Nell'equazione generica riportata all'immagine 15 compare una quarta incognita: il tempo trascorso dall'emissione del segnale alla sua ricezione; perciò, i satelliti montano degli orologi atomici a bordo in modo che la misura del tempo sia il più precisa possibile.

Per determinare la posizione di un punto terrestre l'antenna a terra deve captare il segnale di minimo quattro differenti satelliti come illustrato nell'immagine 16 per risolvere le quattro equazioni con le quattro incognite (X, Y, Z, t) del punto sulla Terra che vogliamo misurare (Cina 2014).

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{\{(X^j(t) - X_i)^2 + (Y^j(t) - Y_i)^2 + (Z^j(t) - Z_i)^2\}}$$

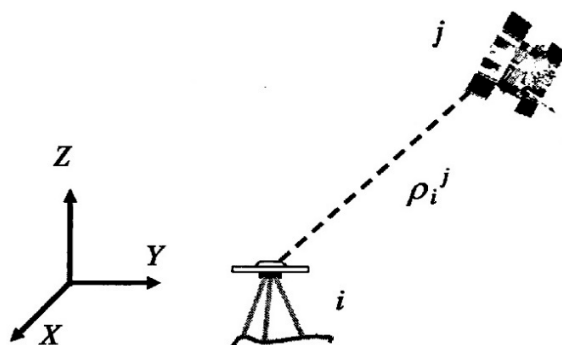


Figura 15 Singola equazione per risolvere la distanza tra satellite e antenna a terra (Cina 2014).

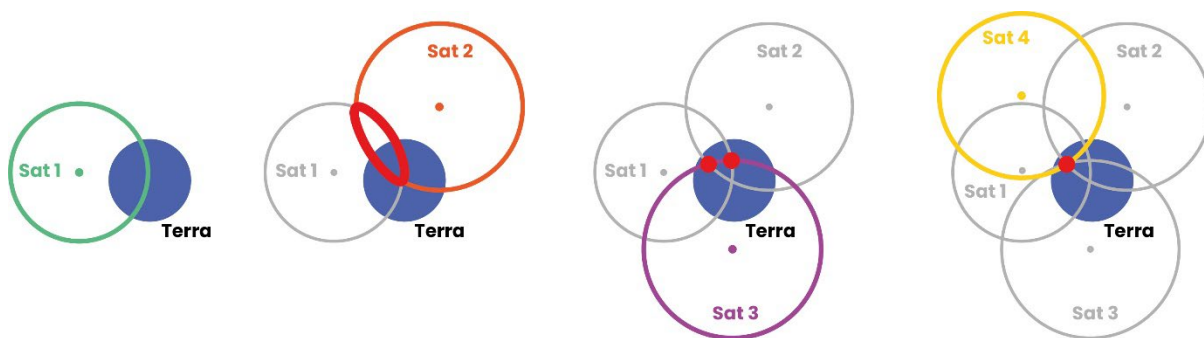


Figura 16 Individuazione punto sulla superficie terrestre mediante 4 satelliti (Spanò 2023).

L'estensione della rete che andiamo a rilevare e materializzare deve ricoprire totalmente l'elemento che stiamo analizzando in maniera uniforme, i vertici della maglia sono collegati a due a due in modo da ottenere triangoli che siano adiacenti tra loro avendo dei lati in comune. La rete può assumere uno sviluppo a catena o maglia/rete, composte entrambe da triangoli uno legato all'altro. In Italia esiste una rete principale di triangolazione (rete IGM Istituto Geografico Militare), la quale viene ulteriormente suddivisa in reti di triangolazioni di raffittimento di vari sotto ordini (reti di raffittimento: catastale, punti fiduciali) (Riggio, Carlucci 2015).

3.2 La rete topografica per il rilievo 3D dell'abbazia di Novalesa

Per georiferire il rilievo di dettaglio dell'architettura e del territorio circostante la Novalesa in un sistema di riferimento noto unico (datum) la prima operazione che dobbiamo compiere è quella di rilevare la rete d'inquadramento topografica. Per il rilievo della rete topografica alla Novalesa si è operato mediante GNSS in modalità statica e posizionamento assoluto appoggiandosi alla costellazione dei satelliti GPS.

I punti della rete rilevati e materializzati alla Novalesa mediante chiodi topografici, picchetti, o riferimenti naturali appartenenti all'architettura stessa (ed effettuando di essi la monografia per la loro rintracciabilità in futuro) verranno utilizzati come vertici di appoggio per le misurazioni successive nel rilievo di dettaglio, potendo unire e orientare tra di loro le varie metodologie in un unico sistema di riferimento.

In totale per il rilievo della rete topografica della Novalesa sono stati misurati 18 vertici con metodologie sia GNSS che stazione totale quando la prima metodologia non lo consentiva a causa di occlusioni che non rendevano visibile la volta celeste. Con l'ausilio della stazione totale e un prisma sono stati misurati nello specifico i punti v15 e v16 a partire dal punto v13 di coordinate note (Patrucco 2016). Dall'immagine 17 qui sotto riportata possiamo vedere che lo sviluppo della rete è estremamente ampio rispetto alle reali necessità della tesi: questo è dovuto al fatto che l'abbazia comprende anche delle cappelle distaccate dal complesso principale, che devono rientrare all'interno di questa rete e che erano oggetto di rilievo della campagna di acquisizione del 2015.



Figura 17 Vertici misurati per la rete topografica (Patrucco 2016).

- 3.2.1 Il sistema di riferimento e il sistema di coordinate

“Il sistema di riferimento o datum è un insieme di misure e di regole per la determinazione della posizione spazio temporale di punti, qualsiasi sia il sistema di coordinate” (Cina 2014).

Ciò che effettuiamo attraverso il datum è definire:

- La superficie di riferimento che meglio approssima la superficie terrestre su cui operiamo (ellissoide: coordinate geografiche o vertici, geoide: quote altimetriche o caposaldi).
- Il sistema di coordinate che utilizziamo in modo da definire per ogni punto della rete rilevato sulla superficie terrestre le sue tre coordinate (i vertici per la rete planimetrica di inquadramento, i caposaldi per la rete altimetrica d'inquadramento).

Le discipline che si occupano di questi aspetti sono la geodesia e la cartografia. La branca della geodesia si occupa di trovare la migliore soluzione che meglio approssima la superficie terrestre. Le più note sono quella del geoide a cui si fa riferimento per gli aspetti altimetrici. Esso è ricavato sulla base di modelli matematici avanzati facendo riferimento alla forza di gravità e alla forza centrifuga generata dal pianeta Terra. L'altra è l'ellissoide a doppia curvatura utilizzato per gli ambiti planimetrici e ricavato per rotazione di un'ellisse attorno al proprio asse. Nella figura 18 vengono rappresentati schematicamente il geoide e l'ellissoide e come essi siano una approssimazione della superficie terrestre.

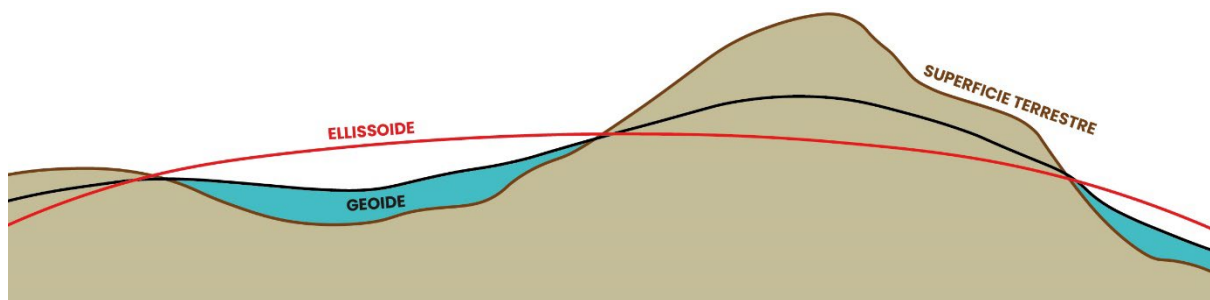


Figura 18 Rappresentazione schematica superficie del geoide ed ellissoide (Tonolo 2020).

Il campo della cartografia si occupa di rappresentare la superficie geodetica su un piano minimizzando le distorsioni che ne risultano. Esistono una serie di passaggi matematici iterativi e di conversione che ci permettono di tramutare un sistema di coordinate geodetiche in uno cartografico (Cina 2014). Nella figura 19 vediamo alcune delle possibili proiezioni della terra su una superficie piana.

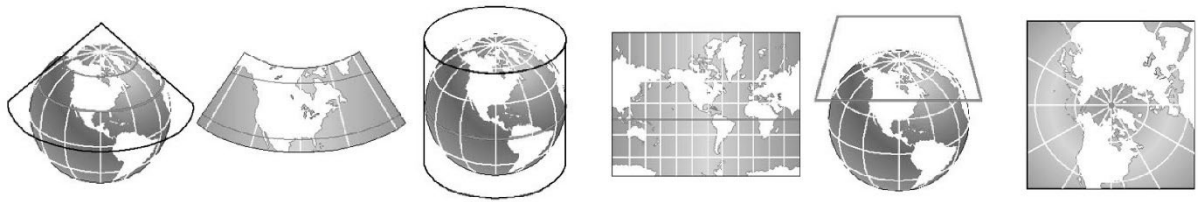


Figura 19 Proiezioni cartografiche: esempi (Cina 2014).

Il sistema di riferimento impiegato dalle orbite dei satelliti GPS rimanda ad una superficie terrestre che possiamo assimilare ad un ellissoide chiamato WGS84 (*World Geodetic System 1984*). Per il calcolo della rete di inquadramento realizzata a Novalesa sono stati impiegati esattamente questo datum geodetico WGS84 ed il sistema di proiezione UTM (*Universal Transverse Mercator coordinate system*). Dal momento che ci si trova nell'Italia nordoccidentale il fuso di riferimento è il 32N.

3.3 Il rilievo topografico dei punti di controllo

In seguito alla misura della rete topografica di inquadramento, è necessario impiegare nuovamente il rilievo topografico per la determinazione delle coordinate 3D dei punti di controllo (punti di appoggio se riferiti al rilievo fotogrammetrico), che saranno utili rispettivamente per ottimizzare l'orientamento fotogrammetrico dei blocchi di immagini e per registrare tra loro le scansioni.

Il rilievo di dettaglio di punti di controllo che supporta le tecniche di rilievo 3D mediante sensori passivi o attivi (metodo fotogrammetrico o laser scanner), consente anche di poter georiferire i risultati delle varie metodologie di rilievo in un sistema unico di coordinate. Per la determinazione dei punti di controllo finalizzati all'orientamento del volo UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) si adotta spesso la tecnica GNSS in modalità RTK (*Real Time Kinematic*), cioè si opera uno stazionamento dell'antenna ricevente montata su palina per uno o pochi minuti sul target fotogrammetrico per ottenere accuratezze della determinazione delle coordinate 3D di ordine centimetrico.

Nella figura 20 possiamo vedere i punti d'appoggio (*marker*) determinati mediante tecnica GNSS con cui effettuare l'orientamento del rilievo fotogrammetrico aereo dell'abbazia.



Figura 20 punti di appoggio all'interno del sagrato dell'abbazia di Novalesa.

È buona norma che la disposizione dei marker sia il più uniforme possibile in base alla estensione dell'area da acquisire.

Per quanto riguarda il rilievo di punti di controllo per registrare le scansioni acquisite mediante TLS (*Terrestrial Laser Scanner*), la tecnica GNSS presenta numerose limitazioni a causa di occlusioni della volta celeste che non permettono all'antenna ricevente di captare il segnale dei satelliti (per via della presenza di alberi, di un tessuto edilizio fitto, superfici riflettenti, campi elettromagnetici) ma anche in quanto tale tecnica non è adatta quando è necessario misurare punti di controllo sui fronti architettonici. Per queste ragioni il rilievo celerimetrico mediante stazione totale è il metodo più consueto e quindi adottato per la determinazione dei punti di controllo all'interno del chiostro della Novalesa dove i fronti sono ravvicinati ed elevati (Patrucco 2016). La stazione totale utilizzata per misurare punti d'appoggio giacenti sui fabbricati consente di collimare punti naturali che possono appartenere all'architettura stessa se essi sono singolari e facilmente riconoscibili, oppure è possibile apporre dei marker a scacchiera: il tutto deve essere documentato con eidotipi per il loro riconoscimento su fotogrammi o nuvole di punti derivate dalle scansioni. La stazione totale può svolgere il compito su indicato della misura di punti di controllo in quanto è composta da goniometri graduati e distanziometro elettronico: essi ci permettono di misurare tre differenti grandezze com'è visibile nell'immagine 21: l'angolo verticale (zenit), l'angolo orizzontale (azimut) e la distanza inclinata (emissione di un impulso elettromagnetico con misurazione del tempo di volo di andata e ritorno dal teodolite) tra stazione totale e punto misurato.

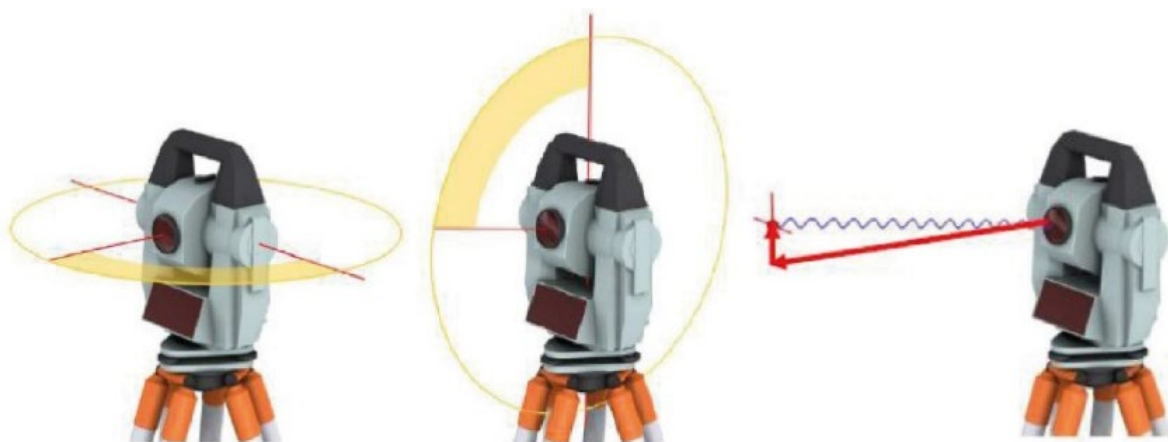


Figura 21 Angoli azimutali, zenitali, distanziometro (Spanò 2023).

Per la corretta misurazione degli angoli lo strumento deve soddisfare tre condizioni: l'asse di rotazione dell'alidada deve essere in verticale (messa in stazione), l'asse di rotazione del cannocchiale deve essere orizzontale, la mira del cannocchiale per la collimazione deve essere perpendicolare all'asse di rotazione dell'alidada come viene riportato nella figura 22. Le coordinate vengono espresse in un sistema polare ma attraverso formule trigonometriche possiamo trasformarle in cartesiane.

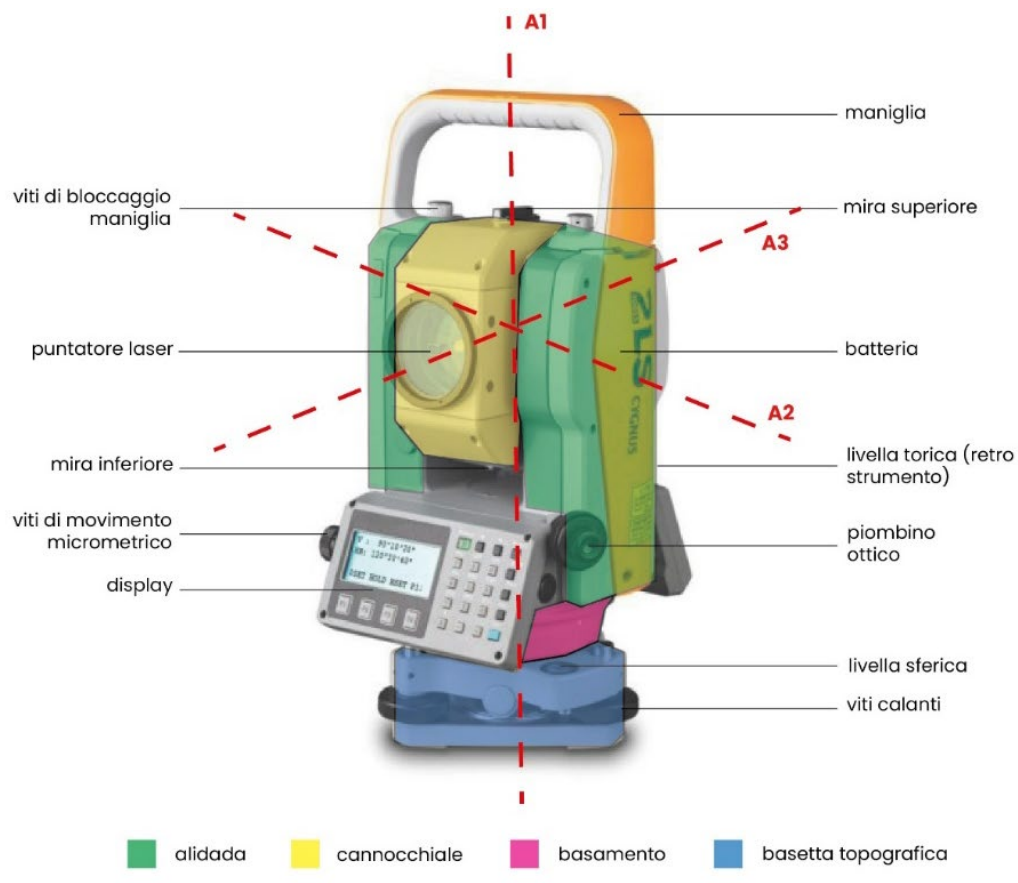


Figura 22 Componenti principali esterni stazione totale (Tonolo 2020).

3.4 Rilievo fotogrammetrico con UAS del complesso abbaziale

- *3.4.1 Principi e processo fotogrammetrico*

Il rilievo fotogrammetrico fa parte delle metodologie per il rilievo di dettaglio. Grazie alla elevata digitalizzazione dei mezzi di acquisizione la sua applicazione ci permette di misurare e documentare il bene architettonico in maniera precisa e dettagliata. I Principi cardine su cui si basa la fotogrammetria sono due: la prospettiva centrale e la visione stereoscopica (binoculare). Questi due aspetti sono ciò che caratterizza la visione umana che permette di percepire attraverso gli occhi la profondità e la collocazione nello spazio degli oggetti che ci circondano. La fotocamera digitale e il suo funzionamento non sono dissimili dall'occhio umano come illustrato nell'immagine 23. Entrambi osservano un oggetto reale, il quale viene proiettato e ribaltato sul piano di proiezione dove si forma l'immagine: i raggi proiettanti passano tutti per il centro di proiezione.

Per l'occhio umano il piano di proiezione è la retina, composta da bastoncelli e coni che vengono sollecitati da onde elettromagnetiche (campo del visibile) provenienti dall'esterno; nella macchina fotografica digitale il piano di proiezione corrisponde al sensore composto da pixel che convertono il segnale di luce in un segnale elettrico (Riggio, Carlucci 2015). In commercio esistono molteplici camere digitali che influenzano la qualità dello scatto e ci permettono di controllare differenti parametri come esposizione, ISO, numero di pixel, risoluzione, camere infrarosse in modo da ottenere differenti dati (Bertocci, Bini 2012). Il centro di proiezione nell'occhio corrisponde al cristallino, mentre per la macchina fotografica sono le lenti situate nell'obiettivo.

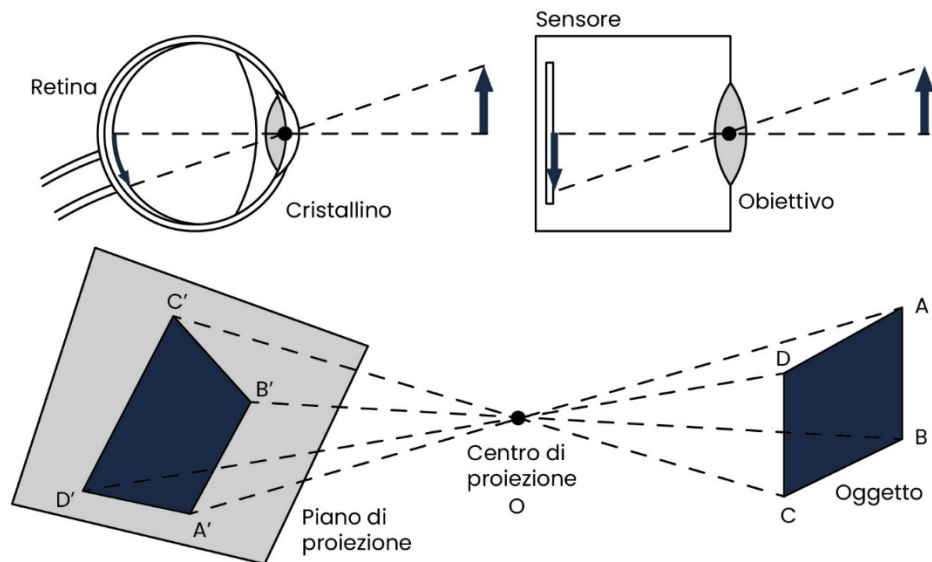


Figura 23 Illustrazione della prospettiva centrale (Riggio, Carlucci 2015).

La prospettiva centrale ci permette di rappresentare su un piano un oggetto tridimensionale, ma ciò non è sufficiente per riuscire a collocare nello spazio l'oggetto: per farlo necessitiamo di una seconda prospettiva centrale del medesimo oggetto acquisita da un punto differente rispetto al precedente (questa viene detta visione stereoscopica). Per trovare il punto dell'oggetto reale nello spazio ricerchiamo sulle acquisizioni i punti immagine medesimi. Tracciando dai rispettivi punti immagine dei due fotogrammi i raggi proiettanti passanti per il centro di proiezione ed estendendo queste rette esse si intersecheranno nel punto reale dell'oggetto come illustrato nella figura 24. Tale spiegazione riassume come in maniera geometrica è possibile trovare la collocazione nello spazio di un punto disponendo di due foto distinte scattate da due punti differenti (Riggio, Carlucci 2015). Questi tre punti (punto immagine, centro di proiezione, punto oggetto) giacciono a livello teorico sulla stessa retta in maniera collineare.

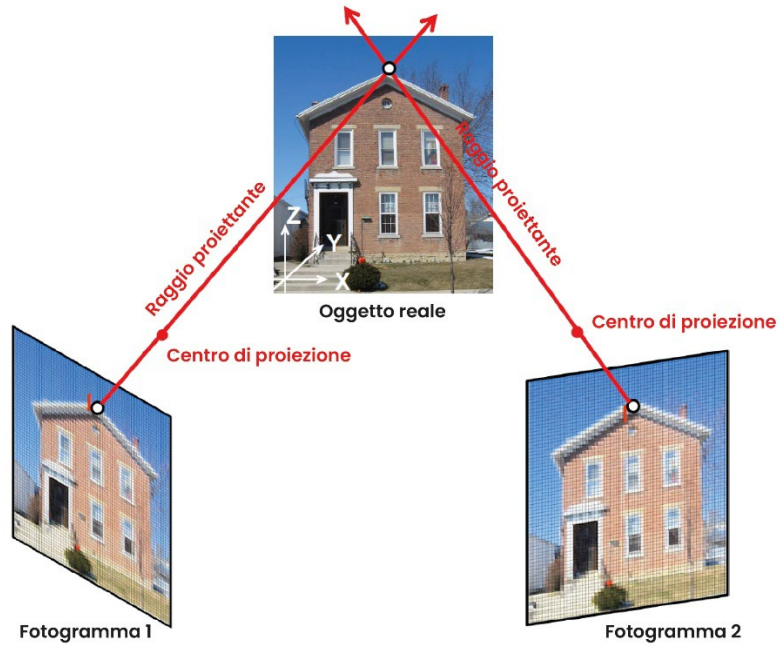


Figura 24 Visione stereoscopica (Tonolo 2020).

Nella realtà ciò non avviene perché abbiamo degli errori sistematici e accidentali dovuti alle caratteristiche ottico meccaniche del dispositivo fotografico, (obiettivo, sistema di lenti, distanza della focale, sensore, diaframma) i quali deformano la prospettiva centrale nei suoi raggi proiettanti, centro di presa e punto immagine: per correggere questi errori abbiamo due possibilità: o il produttore fornisce i dati di calibrazione della camera, oppure il software a nostra disposizione riesce a ricavarli indirettamente. Nella tabella 25 possiamo vedere gli errori sulla camera applicata all'abbazia e la loro correzione effettuata dal software (Bertocci, Bini 2012).

ILCE- 5100, E 20 mm F2.8 (20 mm)										
977 images										
Type	Resolution	Focal Length			Pixel Size					
Frame	6000 x 4000	20 mm			4 x 4 μm					
	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	5244.03	0.023	1.00	0.06	-0.55	-0.17	0.17	-0.11	0.05	-0.20
Cx	-46.4106	0.022		1.00	-0.05	0.03	-0.04	0.04	0.83	-0.03
Cy	-6.6021	0.023			1.00	-0.05	0.01	-0.04	-0.06	0.56
K1	-0.15483	1.5e-0.5				1.00	-0.96	0.91	0.01	-0.07
K2	0.133403	6.9e-0.5					1.00	-0.98	-0.02	0.01
K3	0.0196197	9.5e-0.5						1.00	0.02	-0.02
P1	0.000492303	9.8e-0.7							1.00	-0.05
P2	-0.00032421	8.8e-0.7								1.00

Figura 25 Dati di calibrazione della camera montata sul drone ricavati in maniera indiretta dal software.

Per determinare in maniera analitica i punti nello spazio dell'oggetto reale mediante uno o più fotogrammi applichiamo le equazioni di collinearità come riportate nella figura 26.

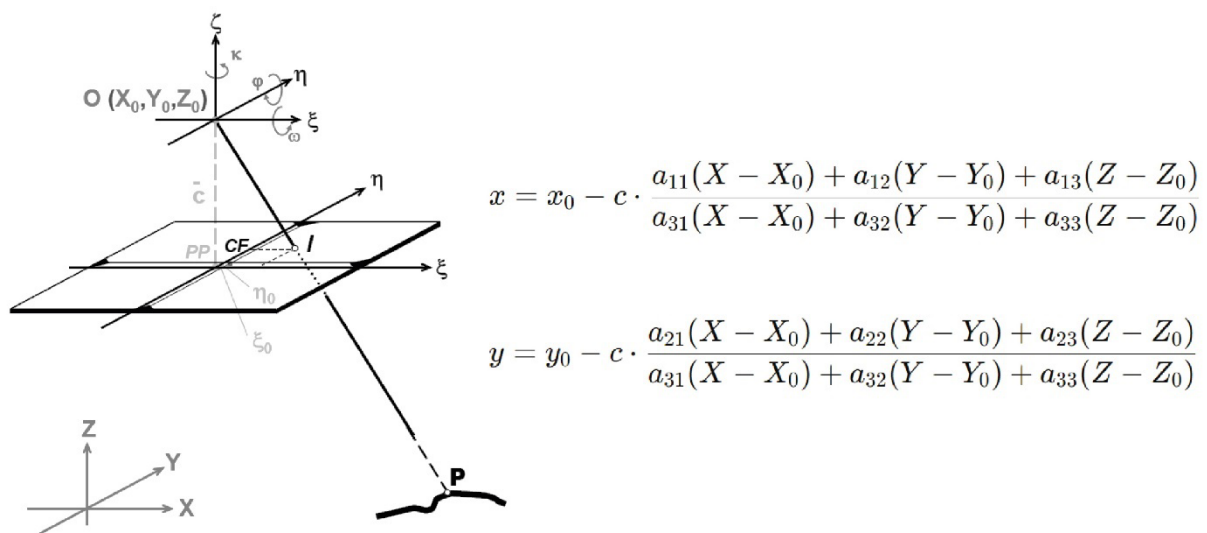


Figura 26 Equazioni di collinearità (Spanò 2023).

All'interno dell'equazione troviamo i fattori di orientamento interno (definiscono il sistema di riferimento all'interno di ogni immagine, in modo da ricostruire la proiezione centrale e i suoi raggi proiettanti tenendo conto delle distorsioni dovute alla calibrazione della camera), esterno relativo o assoluto. In base al sistema di riferimento ogni camera viene orientata nello spazio, la differenza tra relativo ed assoluto sta nel fatto che nel primo il sistema di riferimento usato è locale; in quello assoluto si utilizzano dei vertici topografici misurati in un sistema di coordinate noto, potendo rototraslare e scalare il modello digitale (Bertocci, Bini 2012).

Ad oggi queste operazioni di orientamento dei vari fotogrammi ed il riconoscimento di punti omologhi tra loro nelle varie foto scattate viene fatto totalmente in automatico grazie a tecniche ed algoritmi di *computer vision* riducendo le operazioni da parte dell'operatore un tempo svolte manualmente. Per l'intero blocco di foto della campagna di acquisizione mediante software fotogrammetrici di *computer vision* è possibile effettuare gli orientamenti interno, esterno relativo e il riconoscimento di punti immagine comuni (punti omologhi/di legame/*tie points* per la restituzione della nuvola di punti) in maniera automatica.

Gli algoritmi su cui si basa la *computer vision* sono due ed operano in questo ordine:

- L'algoritmo di *Image Matching* si occupa di trovare all'interno del blocco di foto quelle che presentano caratteristiche geometriche riconoscibili in modo da correlare una presa all'altra. L'algoritmo deve individuare il punto omologo dell'oggetto reale, riconoscendo punti uguali su due o più distinti fotogrammi. La ricerca può avvenire in tre modi differenti: RM (*Relational-Matching*), ricerca di correlazioni tra le varie immagini sulla base di caratteristiche spaziali, topologiche o radiometriche, per area ABM (*Area-Based Matching*), confrontando aree che hanno picchi e radiometria simili, oppure FBM (*Feature-Based Matching*), cioè una ricerca fatta per linee o punti di immagini successive tra loro simili (Chiabrando, Costamagna, Spanò 2013).

- La SfM (*Structure From Motion*) si occupa nello specifico della parte di orientamento interno ed esterno delle varie prese, stima e calcola la nuvola rada e densa. La ricerca dei punti omologhi può essere facilitata mediante l'impiego della geometria epipolare. L'applicazione della geometria epipolare ci permette di ricostruire le intersezioni dei raggi proiettanti delle varie foto individuate precedentemente con l'*image matching* generando la nuvola di punti. La condizione fondamentale è che i due fotogrammi siano orientati e normalizzati sullo stesso piano: in questo modo la FBM può limitare la ricerca dei punti omologhi su una retta detta retta epipolare (Chiabrando, Costamagna, Spanò 2013).

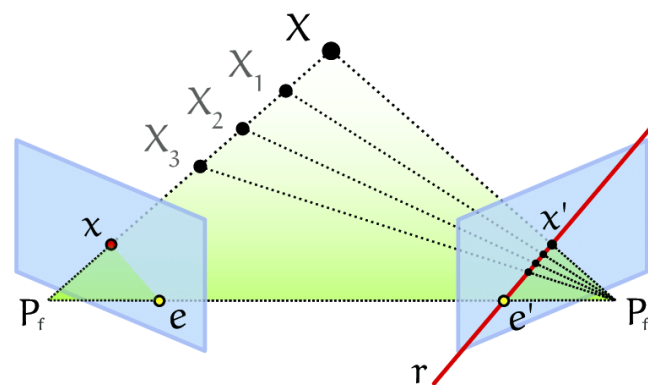


Figura 27 Geometria epipolare (Tonolo 2020).

L'orientamento esterno assoluto deve essere fatto manualmente riconoscendo ogni punto (di coordinate note espresse in un sistema di riferimento) su un numero sufficiente di fotogrammi: chiamiamo questi punti di appoggio topografico GCP (*Ground Control Points*). I GCP devono essere disposti in maniera uniforme intorno all'oggetto in analisi. Durante la fase di riconoscimento e allineamento escludiamo dei GCP: questi punti che non sono stati

utilizzati per georeferire il modello tridimensionale vengono detti CP (*Check Point*) e ci permettono di valutare l'errore commesso e l'accuratezza del modello digitale estratto. Nella tabella 28 riportiamo gli errori ottenuti a valle della elaborazione per i GCP e CP riguardante il rilievo dell'abbazia della Novalesa, i quali sono nell'ordine del centimetro più che ottimali per le successive analisi.

GCP (Ground Control Points).					
Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
19	1.63156	1.63695	2.95111	2.31119	3.74842

CP (Check Point)					
Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
8	1.30199	1.58234	1.81524	2.04941	2.73753

Figura 28 Report sugli errori finali ottenuti dalla elaborazione riguardante la nuvola di punti a scala ambientale dell'abbazia della Novalesa.

Il *software* che impieghiamo, oltre a fornirci dei modelli digitali 3D come nuvole di punti o *mesh/mesh texturizzate*, ci permette di estrarre modelli 2D con valore aggiunto come ortofotomosaici (raddrizzamento differenziale) e DEM (*Digital Elevation Model*). Il DEM ci fornisce informazioni sull'elevazione altimetrica e si divide in DTM (*Digital Terrain Model*) che tiene conto solo del terreno e DSM (*Digital Surface Model*) che tiene conto sia della superficie del terreno che degli oggetti che insistono su di esso come edifici e vegetazione. Gli ortofotomosaici ci restituiscono una proiezione ortogonale dell'oggetto composta da un mosaico di foto differenti identificate come piane e combinate tra loro dal software.

- *3.4.2 Fotogrammetria con Unmanned Aerial Vehicle applicata all'abbazia della Novalesa*

La fotogrammetria può essere applicata da terra oppure per via aerea (tramite aerei o droni). Le due soluzioni vengono utilizzate in base all'estensione dell'oggetto che stiamo rilevando. Nell'ambito architettonico si fa ampio utilizzo sia di quella da terra, sia tramite UAV a bassa – media quota di volo. Si tratta di velivoli civili di piccole dimensioni ad ala fissa (quota di volo indicativa tra i 100-200 metri) o multi-rotori (quota di volo indicativa tra i 10-80 metri) che seguono un piano di volo preimpostato scattando foto del medesimo oggetto da varie angolazioni. La macchina fotografica può essere integrata nel drone oppure montata a parte in base alla risoluzione e qualità del fotogramma ricercata. Per generare la nuvola di punti è quindi fondamentale disporre di una serie di fotogrammi dell'edificio scattati da angolazioni differenti. È altresì fondamentale pianificare un numero sufficiente di scatti in modo da garantire il corretto ricoprimento tra un fotogramma e l'altro durante il volo.

Per ottenere la nuvola di punti a scala ambientale del complesso della Novalesa si è ricorso alla fotogrammetria aerea tramite ausilio di drone, la quale permette di ricavare informazioni a piccola scala dato che operiamo con un range di acquisizione molto elevato. Il rilievo condotto nel 2015 prevedeva l'impiego in combinazione di due droni: uno ad ala fissa che opera a quote altimetriche elevate scattando fotogrammi di aree molto vaste, e uno multi-rotore che opera a quote inferiori. Per le analisi condotte su questa tesi i fotogrammi scattati dal drone multi-rotore sono sufficienti ad inquadrare, ricoprire ed estrarre la nuvola di nostro interesse riguardante la Chiesa dei Santi Pietro e Andrea e i corpi di fabbrica principali del monastero (Patrucco, Chiabrando, Spanò 2018).

Per quanto riguarda la parte di fotogrammetria aerea a bassa quota, è stato utilizzato all'abbazia della Novalesa un esacottero con una Sony Ilce-5100 montata a bordo: caratteristiche tecniche del sensore 23.3 mm x 15.5 mm, distanza tra sensore e focale 20 mm. Il drone ha effettuato una serie di strisciate in modo da coprire il complesso abbaziale principale. In totale, secondo il piano di volo, sono state scattate 977 foto ad una quota di 55 metri circa con una dimensione per ogni fotogramma di 6000 x 4000 pixel e una risoluzione a terra del pixel di 1 cm. Le fotografie sono state scattate sia in direzione nadirale

al terreno che trasversale; in questo modo si sono ottenute maggiori informazioni per quanto riguarda i prospetti degli edifici. È stato fondamentale durante la pianificazione del volo effettuare delle strisciate in modo che longitudinalmente ogni fotogramma avesse un ricoprimento di minimo il 60% e trasversale del 30%. Nella figura 29 riportiamo il drone multirotore impiegato ed il piano di volo eseguito con le relative strisciate e gli scatti effettuati. Ulteriore accortezza in fase di acquisizione è quella di lavorare con una focale fissa (Patrucco 2016). Per la geolocalizzazione della nuvola di punti sono stati disposti in fase di rilievo dei *marker* a terra (punti d'appoggio) i quali sono stati misurati con tecniche GNSS e successivamente riconosciuti manualmente per la rototraslazione del modello digitale. I punti di controllo sono stati misurati con metodologia GNSS. In totale per l'orientamento sono stati utilizzati 27 punti (19 GCP, 8 CP). È buona norma che la disposizione dei marker sia il più uniforme possibile in base alla estensione dell'area da acquisire.

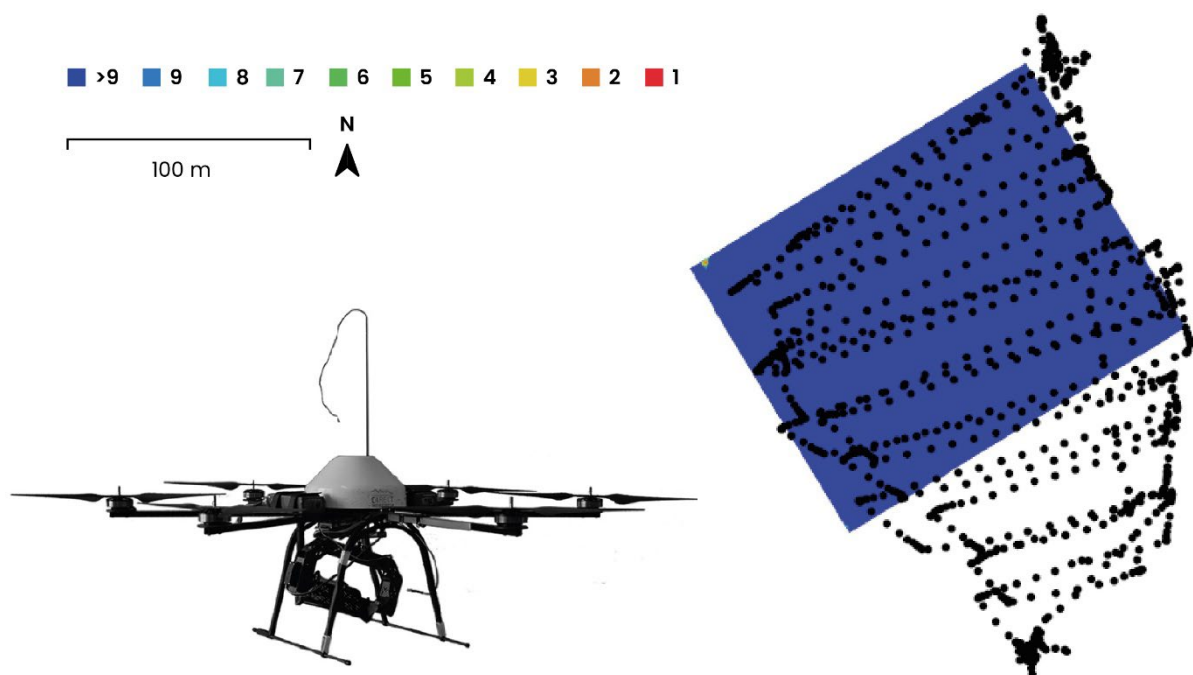


Figura 29 Posizione centri di presa dei vari fotogrammi, ricoprimento dell'area fotografata. Fonte software di fotogrammetria. Esacottero impiegato all'abbazia della Novalesa (Patrucco Chiabrando Spanò 2018).

Negli ultimi anni grazie alla digitalizzazione la fotogrammetria e la sua applicazione sono diventati un sistema estremamente affidabile, preciso, veloce, accessibile, economico, competitivo e soprattutto automatizzato: dall'acquisizione mediante macchine fotografiche digitali fino all'elaborazione con calcolatori. Essi hanno sostituito

completamente le soluzioni analogiche ed il tipo di elaborati estraibili (Riggio, Carlucci 2015).

Ad oggi tramite algoritmi dedicati che operano in maniera analitica e secondo dei principi geometrici spaziali (*Image Matching* e *Structure From Motion*) è possibile orientare i fotogrammi ed estrarre prodotti metrici 3D (nuvole di punti) e 2D (ortofoto e DSM) in maniera completamente automatica. Alla figura 30 i prodotti metrici 2D dell'abbazia della Novalesa ottenuti tramite software.

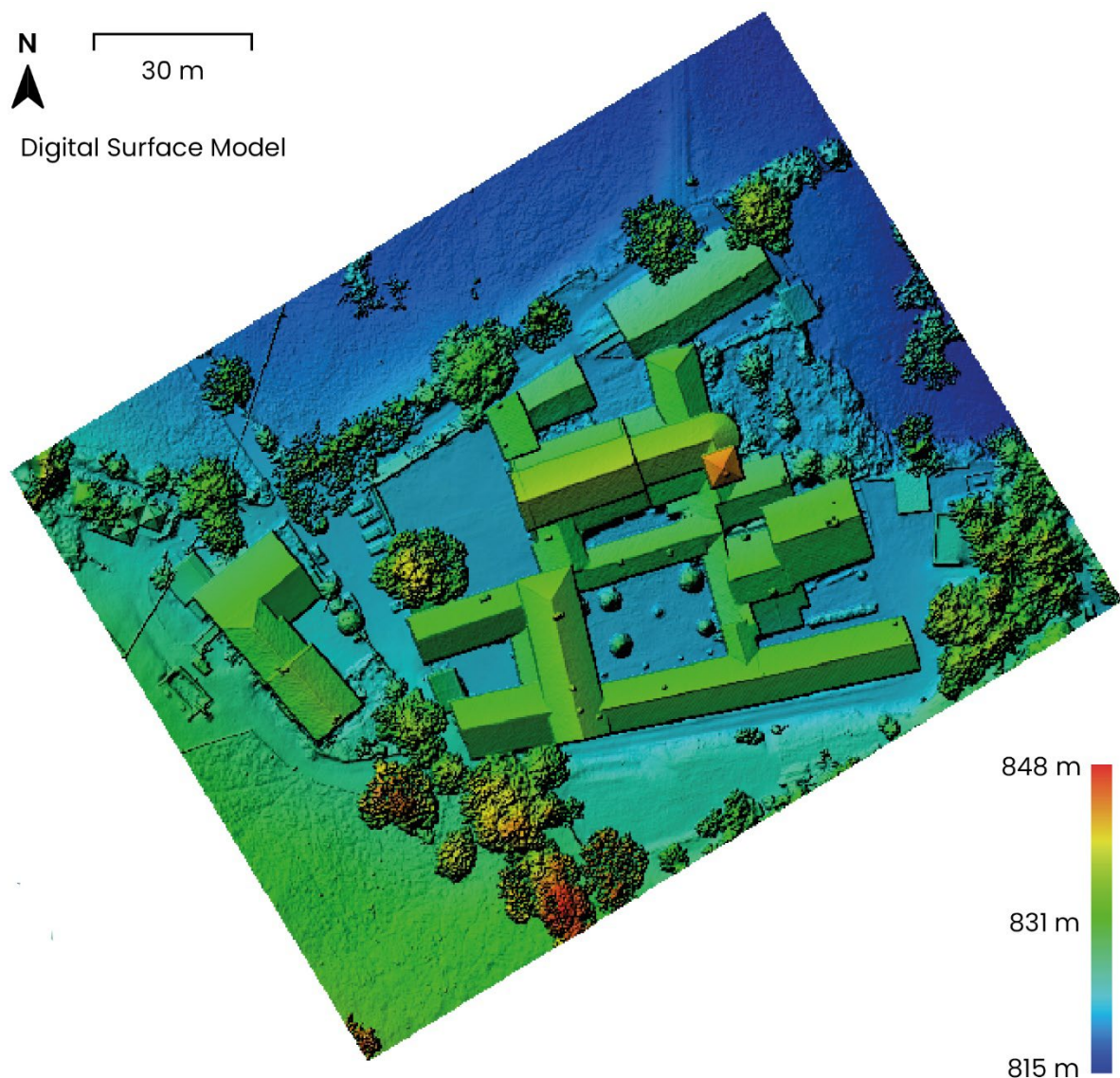




Figura 30 DSM in alto e ortofoto in basso ottenuti per l'abbazia della Novalesa.

3.5 Rilievo laser scanner distanziometrico terrestre dei fronti architettonici della Chiesa Santi Pietro e Andrea

- 3.5.1 Funzionamento e caratteristiche del laser scanner terrestre

Il laser scanner terrestre è un apparecchio elettro-ottico motorizzato che opera sull'angolo verticale a 270° (la porzione mancante è dovuta al treppiede) e sull'angolo orizzontale a 360°. Si tratta di un sensore attivo *range-based* (attivo perché misura in maniera diretta la distanza, *range-based* perché non può andare oltre una certa portata/distanza limite dello strumento), cioè attraverso un impulso elettromagnetico acquisisce decine di migliaia di punti al secondo: questo porta ad una elevata automazione e riduzione dei tempi ottenendo un modello tridimensionale (nuvola di punti) che possiamo considerare come l'elemento di congiunzione tra l'oggetto reale e l'elemento solido 3D (*mesh*) (Riggio, Carlucci 2015). Come riportato in figura 31 il fascio laser emesso lungo una direzione verticale viene mosso da uno specchio rotante in rapido movimento deviando il raggio laser, nel mentre tutto lo strumento gira su se stesso di 360°, ogni qualvolta è stato completato un cerchio verticale di 270° (Romina 2018).

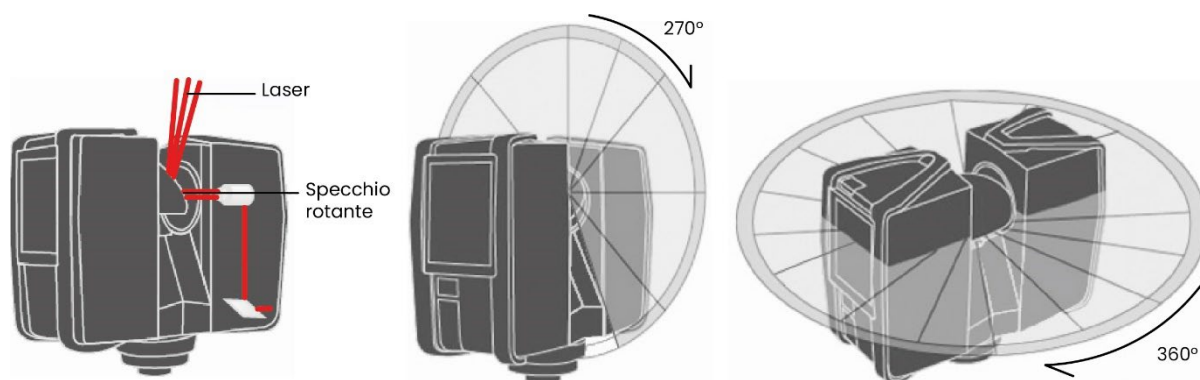


Figura 31 Schema laser scanner distanziometrico (Tonolo 2020).

Il raggio laser che parte dallo strumento arriva sulla superficie dell'oggetto viene riflesso e ritorna alla stazione totale. In commercio ne esistono di diverse tipologie che assolvono a compiti differenti. Abbiamo i laser scanner triangolatori (precisione tra ± 0.1 e ± 0.2 mm range tra ± 25 e ± 150 cm): essi vengono usati per rilievi ad alta precisione che riguardano oggetti di non elevata dimensione; in genere non vengono utilizzati in ambito architettonico

ma per documentare reperti archeologici o simili. Per oggetti con elevate estensioni abbiamo due tipologie:

- Il laser scanner basati sul tempo di volo (precisione tra ± 3 e ± 4 mm range tra ± 25 e ± 50 m) hanno un range ridotto e una precisione maggiore rispetto ai laser scanner a differenza di fase (precisione tra ± 5 e ± 10 mm range che arriva fino a 100 m), ma i tempi di acquisizione sono più lunghi (De Sanctis 2019). Lo scanner TOF (*Time Of Flight*) emette l'impulso e calcola il tempo che impiega il laser a ritornare al centro strumentale.

- Il laser scanner a differenza di fase (*Phase Shift*) emette un'onda continua misurando la differenza tra l'onda emessa e ricevuta per riflessione (ci troviamo nello spettro elettromagnetico per cui parliamo di onde). Ciò permette di ridurre i tempi di acquisizione delle diverse scansioni a scapito della precisione e accuratezza (Riggio, Carlucci 2015). Nella figura 32 possiamo vedere la differenza di come lavorano le due tipologie di laser scanner terrestre.

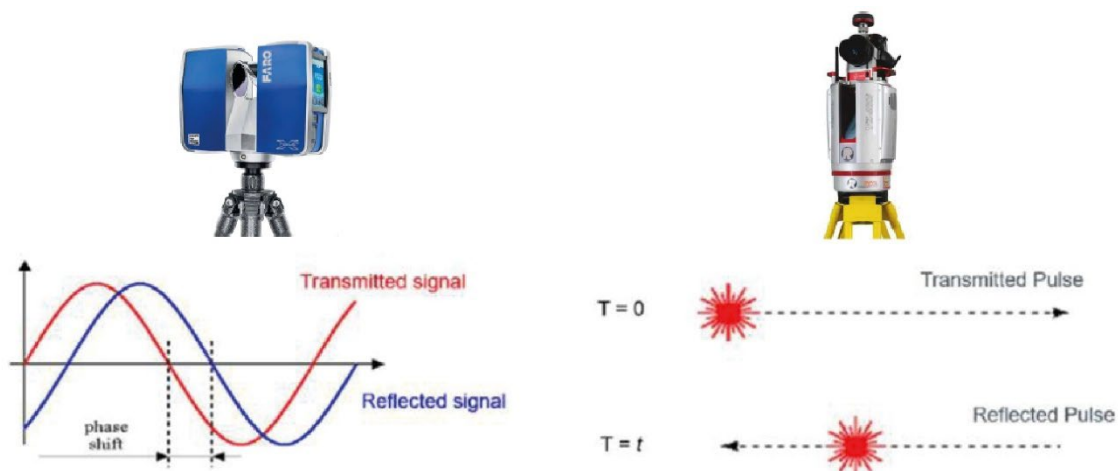


Figura 32 laser scanner Phase Shift e laser scanner TOF (Spanò 2023).

Per valutare la qualità di una scansione dobbiamo guardare a tre parametri fondamentali:

- La risoluzione definita attraverso il passo minimo di campionamento, cioè la densità di punti che costituiscono la nuvola.
- L'accuratezza definita come la variazione che si presenta al ripetersi della medesima misura (errori sistematici).
- La precisione, cioè il massimo grado di convergenza che riusciamo a ottenere tra la misura effettuata e la misura reale presunta.

Questi valori sono influenzati dall'ambiente esterno su cui operiamo e le caratteristiche fisiche superficiali dell'oggetto rilevato (rugosità del materiale, indice di rifrazione, indice di riflessione, contrasti cromatici, opaco, trasparente, traslucido) causando nella nuvola di punti errori, aberrazioni, rumore, *outlier* (De Sanctis 2019). Al termine della scansione otteniamo una nuvola di punti con varie gradazioni di grigio. Se vogliamo ottenere anche un dato radiometrico dell'oggetto, il laser scanner può montare al suo interno una camera che ci permette di acquisire per ogni punto scansionato il suo valore RGB. Si tratta in genere di camere a bassa risoluzione ad obiettivo fisso su cui è impossibile agire definendo l'esposizione, la gamma cromatica o altri parametri dell'acquisizione (Bertocci, Bini 2012).

In genere per rilevare un oggetto mediante laser scanner una sola scansione non è sufficiente, ma servono più scansioni del medesimo. Con una sola scansione c'è il rischio che la presenza di eventuali occlusioni esterne dovute a forme articolate e complesse dell'oggetto in rilievo (aggetti, rientranze di aperture, lesene, decorazioni) possano creare delle ombre nell'elemento rilevato venendo così a mancare una porzione di dato. Per fare ciò effettuiamo più scansioni per aggirare il problema. Naturalmente questo non è sempre fattibile (con il laser scanner in genere operiamo alla quota del terreno): dobbiamo quindi integrare con altre tecniche come la fotogrammetria aerea mediante drone per ottenere il nostro modello digitale completo (Bertocci, Bini 2012).

- *3.5.2 Applicazione del laser scanner terrestre nel sagrato dell'abbazia di Novalesa*

Per il rilievo condotto nel 2015 il laser scanner è stato impiegato nelle corti e nel chiostro interni dell'abbazia. Mediante la tecnologia laser scanner distanziometrico terrestre è stato possibile rilevare in maniera diretta i prospetti dei vari fabbricati in affaccio sul sagrato, incluso il prospetto d'ingresso della Chiesa dei Santi Pietro e Andrea. A differenza del metodo fotogrammetrico il laser scanner è stato impiegato per l'acquisizione a scala architettonica operando su range di acquisizione minori rispetto a quelli fotogrammetrici. Se la fotogrammetria ci permette di acquisire vaste aree territoriali con il laser scanner distanziometrico possiamo rilevare con maggior accuratezza i dettagli architettonici della porzione relativa al sagrato dell'abbazia. Quando applicheremo gli algoritmi d'intelligenza artificiale per la classificazione ciò ci permetterà di individuare e provare a computare un

numero maggiori di classi che ad una scala troppo piccola (fotogrammetria aerea) non sono stati acquisiti. Come per il rilievo fotogrammetrico è fondamentale pianificare le varie scansioni in modo da avere il corretto ricoprimento ed apporre un numero sufficiente di *marker* (punti d'appoggio) per la georeferenziazione delle varie scansioni. Le scansioni hanno tutte un proprio sistema di riferimento che è quello del centro strumentale al momento della stazione. Come per la fotogrammetria l'unica operazione manuale riguarda la georeferenziazione della nuvola mediante il riconoscimento dei punti di controllo. L'allineamento viene fatto totalmente in automatico grazie ad algoritmi ICP (*Iterative Closest Point*). Per l'abbazia della Novalesa è stato utilizzato un FARO Focus 3D S120 con fotocamera a colori coassiale, la velocità operativa è di 976'000 punti al secondo, un range di misurazione da 0.6 metri a 120 metri, un'accuratezza strumentale di ± 2 mm alla distanza di 10m. Sono stati materializzati sul sagrato dell'abbazia mediante *marker* a scacchiera e misurati 26 punti diversi uniformemente distribuiti sui vari prospetti. (Patrucco, Chiabrando, Spanò 2018).

- *3.5.3 Registrazione delle scansioni*

La fase di registrazione delle nuvole avviene mediante software dedicati. Il primo allineamento delle scansioni avviene in maniera grossolana-manuale attraverso il riconoscimento di punti singoli o *marker* a scacchiera (in alternativa sferici se vogliamo fare un riconoscimento automatico) apposti durante la fase di rilievo. È fondamentale che tra una scansione e l'altra vi siano minimo tre punti di legame in comune riconoscibili su entrambe le scansioni (Riggio, Carlucci 2015). Inoltre, i *markers* non devono essere allineati e complanari tra loro: ciò deve essere attentamente valutato in fase di rilievo in modo da avere i target disposti in maniera più articolata possibile. Questo significa che le scansioni per essere collegate fra loro devono avere un ricoprimento comune in genere di circa il 60%. Se i punti che utilizziamo per l'allineamento durante il rilievo sul campo sono stati misurati con le tecniche topografiche, questo ci permette di rototraslare e georeferenziare le scansioni in un sistema di coordinate (WGS 84/UTM 32N) (Bertocci, Bini 2012). Fatto questo primo allineamento passiamo ad un miglioramento di esso mediante algoritmo *surface matching* ICP il quale in maniera iterativa cerca di allineare per forma le varie scansioni al fine di minimizzare lo scarto tra una scansione e l'altra. A conclusione dell'elaborazione

otteniamo una nuvola di punti, la quale può essere ulteriormente migliorata rimuovendo in maniera manuale o automatica rumore, *outlier* o aberrazioni. Nella figura 33 possiamo vedere prima le varie scansioni ognuna in un suo sistema di riferimento locale e successivamente la nuvola del sagrato dell'abbazia della Novalesa composta dalle varie scansioni allineate tra loro.



Figura 33 Scansioni non allineate a sinistra, nuvola di punti unica georeferenziata/ottimizzata a destra.

Di seguito nella tabella 34 riportiamo gli errori tra le varie scansioni allineate a valle della elaborazione mediante software.

Gruppo/Scansioni	Gruppo/Scansioni	Medio (mm)	<4 mm (%)	Sovrapposizione	Punti utilizzati
X014	X013	17.038	12.8	75.3	40708
X012	X011	12.63	14.1	91	47351
X013	X012	9.431	24.4	86	36938
X015	X014	6.196	38.3	84.1	44724
X011	X010	5.873	37.3	90.4	51186
Statistiche complessive					
Medio	10.2334	mm			
<4 mm	25.5	%			

Figura 34 Tabella con errori finali sulle varie scansioni allineate.

4. I sistemi di Machine Learning

Avendo ottenuto ed elaborato le varie nuvole di punti il dato grezzo in uscita non è strutturato secondo una gerarchia precisa e coerente. Il dato digitale è quindi di difficile interpretazione e la sua segmentazione in classi è estremamente dispendiosa e articolata se fatta in maniera manuale. L'obiettivo è riuscire ad istruire un algoritmo d'intelligenza artificiale che riconosca in maniera autonoma gli elementi architettonici e materici che connotano il prospetto della Chiesa dei santi Pietro e Andrea. A scala ambientale si applicano soluzioni combinate di algoritmi d'intelligenza artificiale e geometrici per distinguere tra costruito, terreno e vegetazione. Nello specifico impiegheremo algoritmi di ML appartenenti al vasto mondo dell'intelligenza artificiale.

Definiamo un sistema di machine learning come un modello matematico composto da algoritmi che formano un sistema addestrato secondo regole apprese autonomamente, in grado di riconoscere schemi e relazioni nel dataset in modo da prendere decisioni ed effettuare previsioni su dati incogniti non strutturati per estrarre ed attribuire un valore aggiunto ad essi (Raschka 2016). Possiamo dividere i sistemi di ML in tre grandi famiglie in base alla tipologia di apprendimento: con supervisione, per rafforzamento, senza supervisione.

- Sistemi supervisionati: il modello viene addestrato su un dataset già classificato ed etichettato: in genere si tratta di classificatori ML che devono associare un'etichetta ad un dato senza un'istanza. Le classi utilizzate hanno valore discreto finito e servono a dividere il dataset non strutturato in gruppi. I classificatori possono essere binari o multi-classe. Per classificare le varie nuvole di punti applicheremo algoritmi di ML esclusivamente supervisionati: ciò comporta che dovremo definire noi le classi d'interesse. Questa situazione è quella adottata per il caso studio dell'abbazia di Novalesa, cioè le classi utili da identificare sulla nuvola di punti sono state studiate e selezionate in base a casi studio analoghi. L'algoritmo d'intelligenza artificiale dovrà imparare a riconoscerle sul caso specifico le varie categorie di classi (architettoniche e materiche). Nel caso studio dell'abbazia di Novalesa sia a scala architettonica che ambientale sono stati applicati solo sistemi di ML supervisionati: ciò che cambia tra un sistema e l'altro è il tipo di algoritmo sviluppato o impiegato (Cappellazzo, Patrucco, Sammartano, Baldo, Spanò 2024).

- Sistemi per rafforzamento: prevedono che il modello addestrato venga costantemente aggiornato raccogliendo o fornendo nuove informazioni, le quali non sono strutturate o etichettate. Il modello di apprendimento ha la possibilità di acquisire ed esplorare costantemente nuovi dati dall'ambiente migliorando le sue prestazioni. Possiamo definire il sistema di ML come agente, cioè al variare delle condizioni esterne muta anche il sistema di ML. All'interno di essi è inserita una funzione di ricompensa nel caso in cui il compito sia portato a termine con successo. Spetta a noi definire le condizioni per cui l'esito è positivo o negativo. Il sistema viene spinto a trovare azioni che massimizzano la ricompensa al variare delle condizioni circostanti in un *trial-and-error* continuo (Raschka 2016).

Nella figura 35 sono riportati schematicamente il flusso di lavoro per generare un modello predittivo classificatore supervisionato e un sistema ML di rafforzamento *trial-and-error* ciclico.

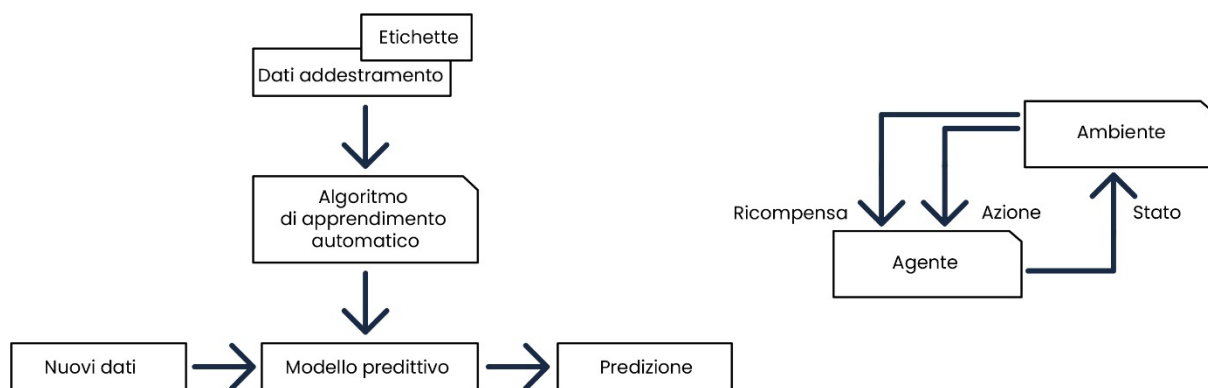


Figura 35 Schema ML supervisionato a sinistra e di rafforzamento a destra (Raschka 2016).

- Sistemi non supervisionati: essi non sono addestrati su un dataset con delle etichette già predefinite e non è prevista neanche una funzione di ricompensa. Spetta al sistema di ML riconoscere all'interno del dataset a struttura ignota una ricorrenza o logica all'interno dei dati in modo da dividerli in gruppi. Questa operazione di suddivisione dei dati in classi non precedentemente identificate viene detta di *clustering*. Essa viene fatta in base ad una divisione logica per similitudine dei dati tra loro. I sistemi di ML non supervisionati vengono applicati in un dataset dove è presente un elevato numero di dati e di essi è difficile individuare una struttura o una logica in maniera immediata. Possono essere usati per semplificare dataset che sono particolarmente complicati in modo da ridurre ridondanze e rumore (Raschka 2016).

4.1 Il sistema ML supervisionato applicato all'abbazia della Novalesa

Il flusso di lavoro per ottenere un modello addestrato supervisionato da applicare sui prospetti del sagrato dell'abbazia si compone delle seguenti fasi:

- Fase di pre-elaborazione e ottimizzazione: in essa dobbiamo definire le classi, fornire il dataset di addestramento (*training*) e il dataset di test (*evaluation*). I due dataset in genere hanno un rapporto tra loro in termini di ampiezza e varietà che si aggira tra l'80% per il training e l'20% per il dataset di *evaluation*. Entrambi i dataset devono essere ottimizzati e filtrati in modo da ottenere un campione che sia il più uniforme ed omogeneo possibile, evitando ridondanze e rumore nel dato. Questa fase è estremamente importante perché condiziona le fasi successive di apprendimento del sistema di ML (Cappellazzo, Patrucco, Spanò 2024). Si tratterà di scegliere dalla nuvola di punti principale delle porzioni significative contenenti tutte le classi di interesse per l'addestramento e la valutazione dell'algoritmo d'intelligenza artificiale impiegato.

- Fase di apprendimento: in questa fase applichiamo l'algoritmo realizzato da noi o usando quello di terze parti per addestrare il modello sulla base del dataset di training precedentemente elaborato.

- Fase di valutazione: ottenuto il modello addestrato dobbiamo valutare la *performance* e l'efficacia dello stesso applicandolo sul dataset di *evaluation*, attribuendo ad un dato non strutturato le istanze che abbiamo precedentemente scelto. Il dataset di *evaluation* classificato mediante modello addestrato viene confrontato con un dataset detto *ground truth* (si tratta di un dataset la cui classificazione è stata eseguita manualmente e che viene assunto come affidabile e di confronto). L'efficacia del modello addestrato viene verificata mediante la matrice di confusione ed altre metriche (come descritto nel paragrafo 4.5). Se il risultato ottenuto non è soddisfacente si ritorna alle fasi precedenti modificando la pre-elaborazione o variando l'algoritmo di ML impiegato fino all'ottenimento di un risultato accettabile e validato tramite matrice di confusione e metriche.

- Fase di utilizzo e applicazione: verificata l'attendibilità del modello addestrato esso può essere applicato per predizioni su nuovi dataset non ancora classificati (Cappellazzo, Patrucco, Spanò 2024). Avendo ricavato il modello addestrato che funziona correttamente

esso viene applicato sull'intera nuvola di punti riguardante il sagrato della Chiesa dei Santi Pietro e Andrea ottenendo la nuvola classificata per elementi architettonici e materici. Nell'immagine 36 possiamo vedere uno schema riassuntivo del flusso di lavoro per generare un modello addestrato diviso nelle varie sotto operazione necessarie per ogni fase.

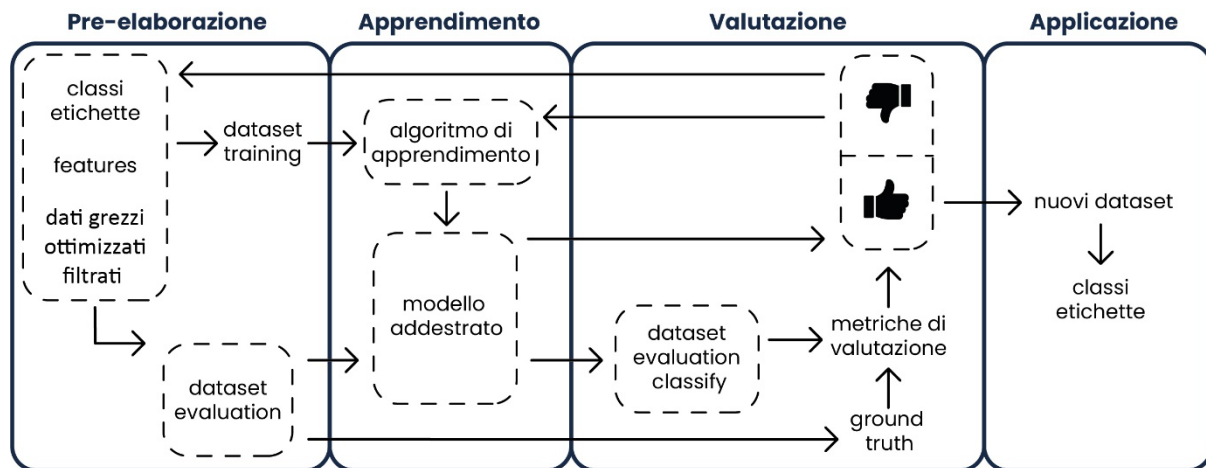


Figura 36 Schema flusso di lavoro ML supervisionato (Cappellazzo, Patrucco, Sammartano, Baldo, Spanò 2024).

Per quanto riguarda la scala ambientale il flusso di lavoro per l'applicazione dei vari algoritmi è semplificato sia dal fatto che utilizziamo in questo caso degli algoritmi che si basano su *features* geometriche, sia dal fatto che le classi e l'apprendimento per la formazione del modello addestrato sono stati portati avanti dagli sviluppatori che ci forniscono un algoritmo d'intelligenza artificiale già pronto per essere impiegato. Questi metodi non richiedono specifiche competenze per quanto riguarda programmazione e struttura di codice, dal momento che sono stati implementati in piattaforme *software*, e questo rappresenta un vantaggio da una prospettiva *user-oriented*. Tuttavia, ovviamente, tali soluzioni sono caratterizzate da una minore flessibilità. Inoltre, talvolta questi sistemi possono rappresentare una soluzione *black box*, e questo fa sì che non sempre sia possibile comprenderne appieno i principi di funzionamento. Tutto ciò è vantaggioso ma va a discapito della libertà e accessibilità del funzionamento che vi sta dietro.

4.2 Pre-elaborazione e ottimizzazione del dataset

Prima di procedere con l'addestramento del modello predittivo è fondamentale elaborare ed ottimizzare il dataset migliorando così le prestazioni di apprendimento dell'algoritmo. Le operazioni di ottimizzazione del dataset in genere si dividono nei seguenti punti:

- Individuazione dei dati che compongono il dataset: possono essere numerici (interi o decimali), oppure categorici (nominali o ordinali). Questi ultimi devono essere trasformati in numerici per un apprendimento semplificato dell'algoritmo.
- Rimozione di rumore, aberrazioni, ridondanze o dati parziali-mancanti (ciò può essere eseguito sia manualmente o con sistemi di ML).
- Identificazione delle istanze e caratteristiche per la definizione e codifica delle classi in valori interi.
- Partizione del dataset totale in sottogruppi distinti di *training* ed *evaluation* con elaborazione manuale del dataset *ground truth* per la valutazione del modello addestrato (Cappellazzo, Patrucco, Spanò 2024).

Mediante le varie metodologie di rilievo abbiamo ottenuto delle nuvole di punti dotate di informazioni radiometriche dell'abbazia (di cui prendiamo in considerazione una porzione significativa comprendente il fronte della Chiesa dei Santi Pietro e Andrea) composte da punti nello spazio visualizzabili tridimensionalmente. Possiamo rappresentare il nostro dataset anche in forma matriciale dove a ogni *array* corrisponde un punto ed esso viene descritto mediante le seguenti caratteristiche disposte in colonna:

- Dati spaziali: coordinate dei punti (X, Y, Z) riferite a un sistema noto (nel caso specifico, il sistema di riferimento internazionale WGS84/32N). Queste possono assumere qualsiasi valore all'interno di un intervallo compreso tra due estremi e includere numeri frazionari o decimali.
- Valore radiometrico (R, G, B) di ciascun punto: assumono solo valori distinti e separati, spesso si tratta di numeri interi, senza possibilità di frazioni o decimali.
- Le normali di un punto in uno spazio tridimensionale (N_x, N_y, N_z): possono assumere qualsiasi valore all'interno di un intervallo. Per calcolare la normale di un punto si considera il gruppo di punti vicini e si determina il piano che li rappresenta al meglio. La normale è il

vettore perpendicolare a questo piano, definito rispetto al sistema di riferimento, e viene calcolata punto per punto dal software.

Questi valori numerici sono le caratteristiche (*features*) descrittive del dataset che il modello addestrato apprende per attribuire ad ogni *array* un'istanza (classe). Ogni feature rappresenta una variabile rilevante per il problema da risolvere. In un dataset è cruciale disporre di *features* significative per migliorare l'efficacia del modello. Le *features* possono essere intrinseche del dataset oppure possono essere calcolate in aggiunta ulteriori *features* partendo da quelle a disposizione (Grilli, Farella Torresani, Remondino 2019).

Nel primo tentativo di addestramento dell'algoritmo sono state utilizzate le *features* disponibili di default ($X, Y, Z, R, G, B, N_x, N_y, N_z$), ma i risultati non erano soddisfacenti. La nuvola di punti è stata arricchita di informazioni utili all'apprendimento con il calcolo di una nuova *feature* che vedremo successivamente. Nella figura 37 sono riportate due diverse rappresentazioni della stessa nuvola di punti: la prima mostra la visualizzazione attraverso software dedicati, utile per un operatore umano; la seconda rappresenta il modo in cui il calcolatore elabora questi dati, organizzandoli in una struttura tabellare, dove ogni riga corrisponde un punto descritto dai valori $X, Y, Z, R, G, B, N_x, N_y, N_z$.



X	Y	Z	R	G	B	N_x	N_y	N_z
343536.606	5004797.673	823.926	126	129	135	0.9317	0.3615	-0.0350
343530.849	5004795.340	826.052	128	120	95	0.2570	-0.9663	-0.0133
343535.094	5004801.679	823.879	137	125	113	0.9427	0.3335	0.0113
343531.974	5004810.663	820.937	71	71	71	0.9249	0.2759	-0.2616
343536.220	5004798.626	824.984	117	110	116	0.8984	0.4364	0.0500
343533.104	5004807.358	827.643	126	134	141	0.9511	0.3088	0.0012
343532.277	5004810.471	828.360	153	132	107	0.9494	0.3140	-0.0087
343529.602	5004795.001	824.044	135	118	100	0.2564	-0.9665	0.0084
343532.491	5004810.413	831.302	101	89	97	0.9289	-0.2128	0.3031
343533.349	5004809.971	835.670	74	74	73	0.7537	-0.2471	0.6090
343536.203	5004798.568	821.732	120	118	127	0.9705	0.2411	-0.0059
343532.475	5004809.724	821.379	72	67	78	0.9449	0.3274	0.0012
343535.316	5004806.633	829.078	128	122	113	0.4779	0.2993	-0.8258
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Figura 37 Le due differenti visualizzazioni di una nuvola di punti e le features che la connotano (visualizzazione 3D della nuvola e valori in tabella).

Le due metodologie di rilievo impiegate precedentemente per l'ottenimento di modelli digitali 3D (nuvole di punti), cioè il rilievo fotogrammetrico da UAV e laser scanning terrestre, come visto, presentano delle limitazioni, per questo vengono integrate fra di loro.

Mediante fotogrammetria con UAS abbiamo estratto delle ottime informazioni per quanto riguarda gli aspetti generali a piccola scala (terreno, coperture, vegetazione), ma il dato dal punto di vista dei prospetti non è ottimale, d'altro canto con le metodologie TLS abbiamo elaborato delle ottime informazioni per i prospetti, mentre per le coperture risultano mancanti. Per l'applicazione a scala architettonica si sono usati i dati UAS e TLS in combinazione. A scala ambientale sono risultati sufficienti i dati del UAS. Nella figura 38 riportiamo le due nuvole di punti ottenute con le due differenti tecniche precedentemente descritte non ancora pre-elaborate.





Figura 38 Nuvola ottenuta tramite metodo fotogrammetrico dell'abbazia della Novalesa (in alto) e nuvola ottenuta mediante laser scanner distanziometrico terrestre della porzione riguardante il sagrato e prospetto principale della Chiesa Santi Pietro e Andrea (in basso).

- 4.2.1 Pre-elaborazione a scala architettonica

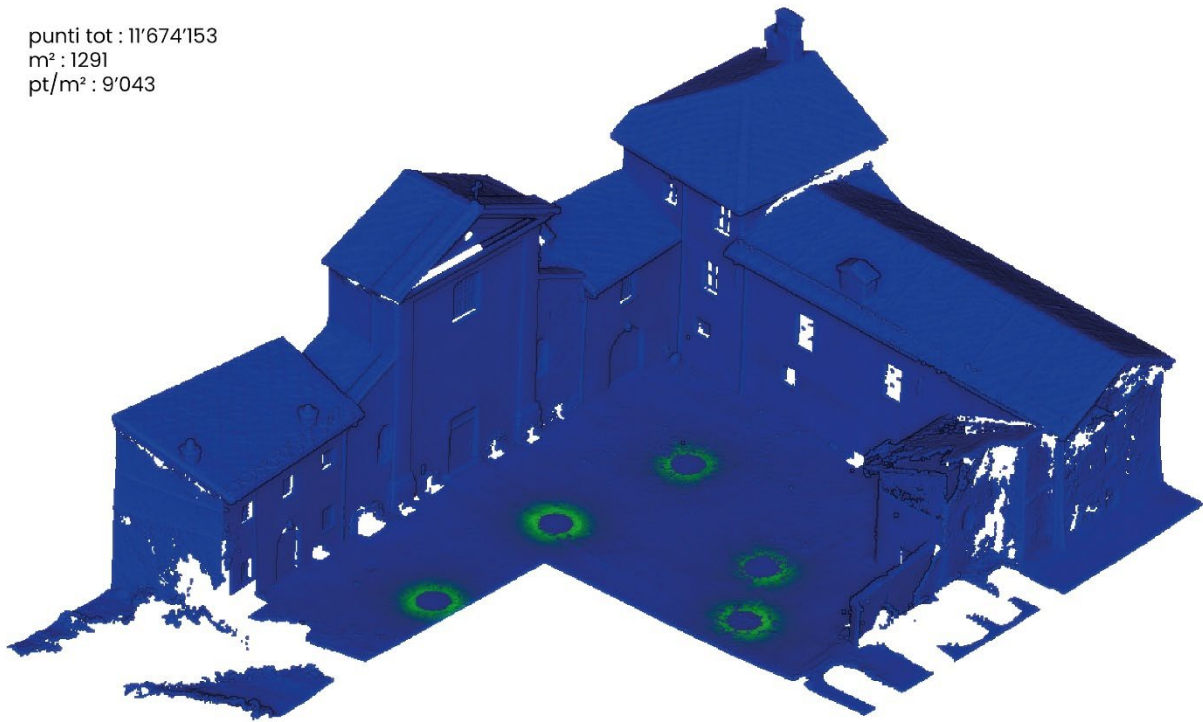
Per la pre-elaborazione del dataset a scala architettonica si è selezionato un campione di nuvola come indicato in figura 39. Entrambe le nuvole UAS e TLS (unite tra loro) sono state filtrate mediante software per ridurre rumore e rimuovere gli *outlier*. Manualmente sono stati rimossi oggetti ed elementi che non era nel nostro interesse classificare e far apprendere all'algoritmo (es. vasi, fioriere, pali del telefono, cavi, vegetazione).



Figura 39 Unione nuvole UAS e TLS con filtraggio del rumore e rimozione delle aberrazioni. L'immagine rappresenta inoltre la selezione della porzione del sagrato individuata per lo studio.

Dal momento che i due dataset derivati dai metodi TLS e UAV sono caratterizzati da una densità differente, al fine di ottenere una distribuzione di punti omogenea e uniforme, si è proceduto sotto-campionando la nuvola di punti complessiva. Questo contribuisce inoltre a rendere la computazione meno gravosa per il calcolatore. Alla figura 40 riportiamo il risultato ottenuto a valle del sotto-campionamento per uniformare la densità finale come riportato dalla distribuzione gaussiana. La nuvola si compone di 11'674'153 punti e per ogni m² abbiamo 9'043 punti.

punti tot : 11'674'153
m² : 1291
pt/m² : 9'043



Gauss: mean = 190.949890 / std.dev. = 203.816040 [3417 classes]

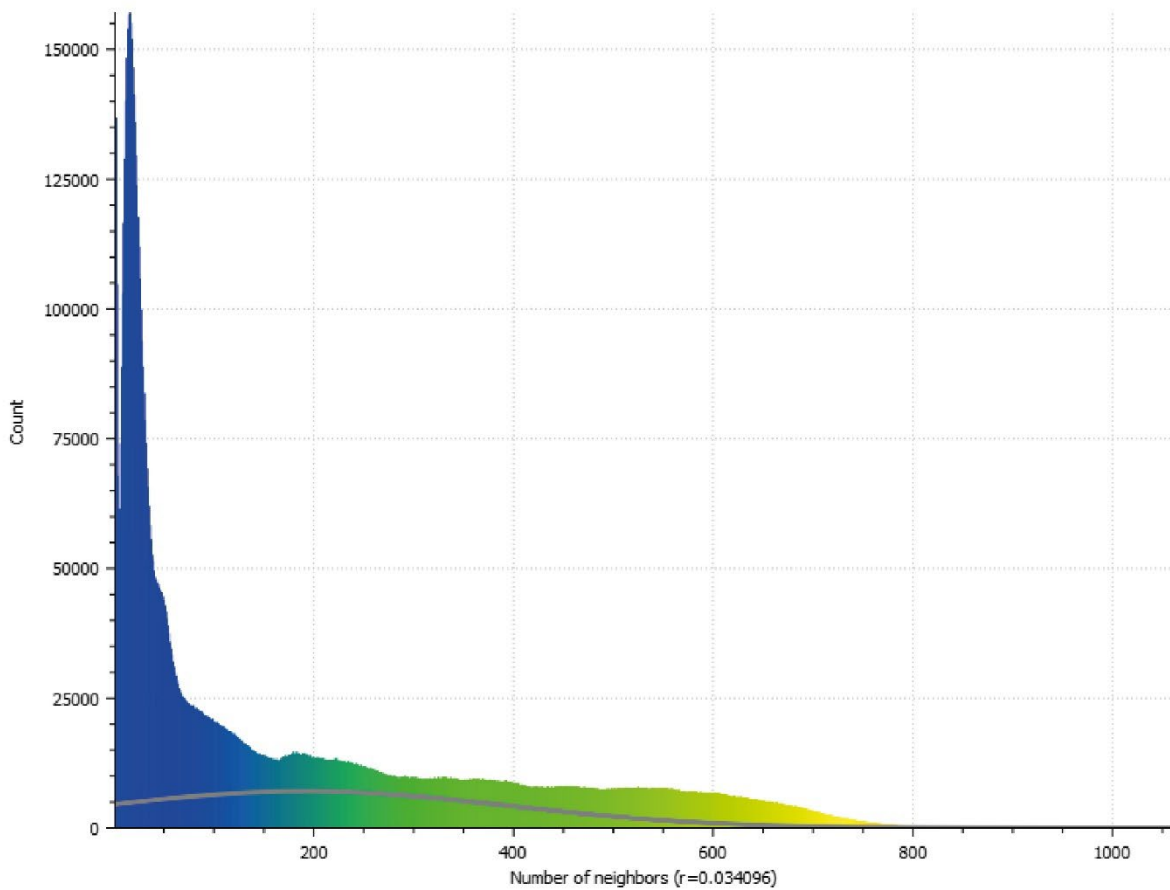


Figura 40 Sotto campionamento e distribuzione gaussiana di frequenza della densità della porzione oggetto di studio del sagrato. (number of neighbours $r=0.034096$).

Com'è visibile dalla figura 41 sotto riportata il dataset pronto è stato diviso in due porzioni: di addestramento e di test (manualmente per la porzione di test è stato elaborato il *ground truth*). Dal momento che il caso studio è estremamente ridotto, le proporzioni 80% di *training* 20% di *evaluation* non sono state rispettate. La porzione di *training* rappresenta il 26% del totale con 3'076'503 punti mentre la porzione di *evaluation* si compone di 2'924'486 punti, cioè il 25% del totale. Esse sono equamente bilanciate per numero di punti.

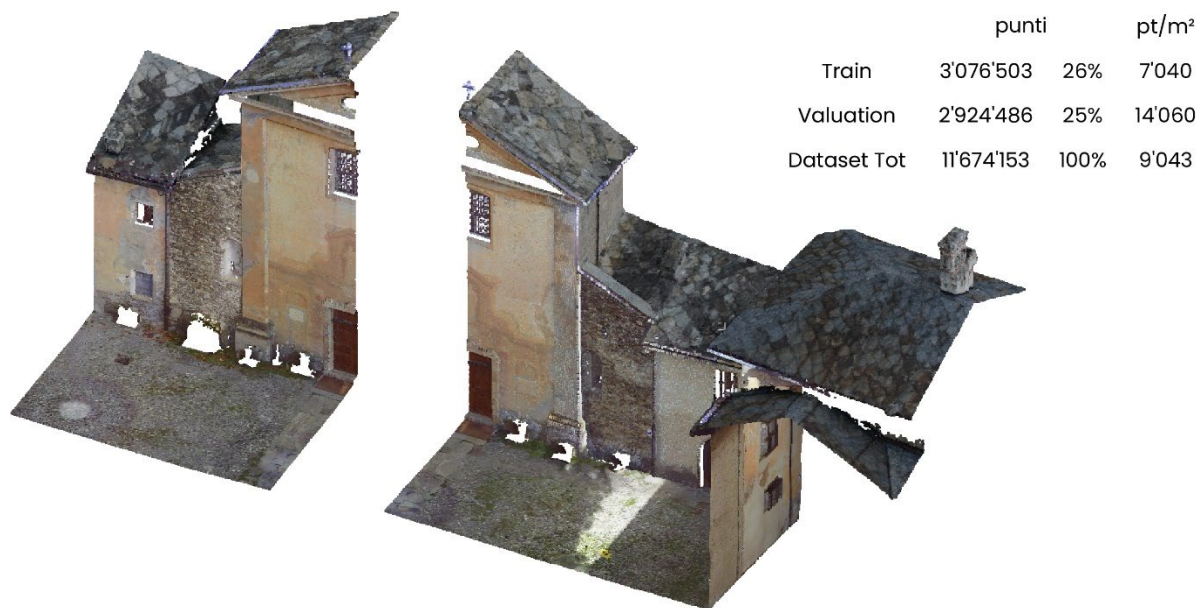


Figura 41 Divisione della nuvola di punti riguardante il prospetto della Chiesa dei Santi Pietro e Andrea nelle due distinte porzioni di training a sinistra e di evaluation a destra.

La parte di addestramento è stata divisa nelle istanze che si sono ritenute caratteristiche e che delineano gli aspetti architettonici e materici del prospetto, associando ad ogni classe uno *scalar-field* (campo scalare espresso sotto forma di colori) differente.

Le classi che il modello addestrato deve apprendere fanno riferimento al riconoscimento degli elementi architettonici o relativi ai materiali. Nei prospetti del sagrato si è deciso di fare alcuni test aumentando durante le differenti sperimentazioni il numero di classi e la loro complessità. Di seguito si riportano le classificazioni adottate:

- Una classificazione semplificata composta da tre etichette: terreno, elementi verticali, coperture.
- Una prova di classificazione che fa riferimento agli elementi architettonici universalmente riconosciuti adottati anche dalla ricerca di: Matrone, Lingua, Pierdicca, Malinverni, Paolanti, Grilli, Remondino, Murtiyoso, Landes: *A benchmark for large-scale heritage point cloud*

semantic segmentation, 2020. Nello studio menzionato, l'obiettivo era quello di ottimizzare i tempi di modellazione parametrica a partire da nuvole classificate; quindi sono state prese in considerazione le famiglie parametriche presenti negli ambienti BIM e la relativa codifica mediante standard IFC. In totale sono state identificate sette classi: *molding, floor, door-window, wall, stair, roof, other*.

- Una prova di classificazione che valuta le istanze architettoniche che connotano il prospetto fatta in maniera personale. In totale sono state identificate dodici classi: terreno, bucatore-infissi, lesene, trabeazione, timpano, cornici, tetto, comignolo, monofora cieca, muro, grondaie-pluviali, scale.

- Una prova di classificazione che valuta gli aspetti materici che compongono il prospetto fatta in maniera personale. In totale sono state identificate dieci classi: pietrisco, selciato, pietra da decoro, grondaie pluviali in rame, intonaco, paramento murario in pietra, affreschi, infissi lignei, puntoni lignei, copertura in lose.

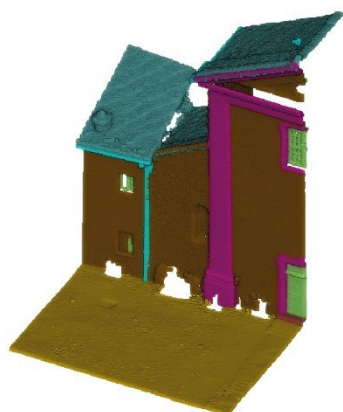
Le seguenti immagini della figura 42 illustrano i dataset pre-classificati manualmente per l'addestramento, riportando la percentuale d'incidenza di ogni classe sul totale dei 3'076'503 punti riguardante la nuvola di *training*.

Classificazione a 3 istanze



	Classi	pt	pt %
0	suolo	2'205'995	71.70%
2	elementi verticali	823'017	26.75%
1	coperture	47'491	1.54%

Classificazione seguendo l'esempio ArCHdataset



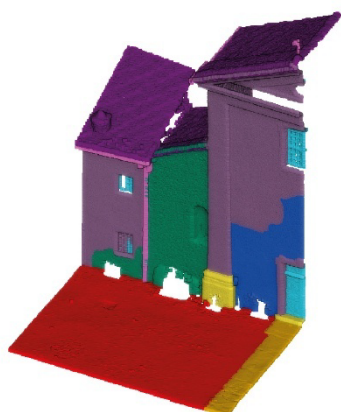
	Classi	pt	pt %
1	floor	2'205'899	71.69%
3	wall	564'521	18.35%
0	molding	190'167	6.18%
2	door window	55'725	1.81%
5	roof	40'995	1.33%
6	other	15'265	0.50%
4	stair	4'238	0.14%

Classificazione per caratteristiche architettoniche



	Classi	pt	pt %
0	terreno	2'205'525	71.61%
9	muro	540'855	17.56%
2	lesene	113'636	3.69%
5	cornici	61'740	2.00%
1	bucature infissi	55'425	1.80%
6	tetto	40'754	1.32%
10	grondaie pluviali	15'293	0.50%
3	trabeazione	14'250	0.46%
8	monofora cieca	13'828	0.45%
4	timpano	10'587	0.34%
11	scale	7'342	0.24%
7	comignolo	735	0.02%

Classificazione per materiali



	Classi	pt	pt %
0	pietrisco	1'862'924	60.56%
4	intonaco	406'346	13.21%
1	selciato	342'244	11.13%
5	paramento murario in pietra	170'715	5.55%
6	affreschi	145'819	4.74%
7	infissi lignei	55'526	1.81%
2	pietra da decoro	35'911	1.17%
9	copertura in lose	32'493	1.06%
3	grondaie pluviali in rame	15'377	0.50%
8	puntoni lignei	8'689	0.28%

Figura 42 Distribuzione delle istanze del dataset di training partendo dall'alto: 3 classi, ArCHdataset, elementi architettonici, materiali.

- 4.2.2 Pre-elaborazione a scala ambientale

Per la pre-elaborazione del dataset a scala ambientale si sono utilizzati solo i dati ricavati mediante UAS. Come per la pre-elaborazione a scala architettonica anche in questo caso si è provveduto a filtrare e pulire le nuvole per rimuovere *outlier* ed elementi non significativi che rappresenterebbero rumore per i modelli pre-addestrati (es. vasi, fioriere, pali del telefono e cavi, automobili). La nuvola è stata classificata manualmente per avere il *ground truth* di confronto. In questo caso non si sono definite delle istanze perché i modelli addestrati presentavano già delle classi proprie definite dagli sviluppatori (costruito, vegetazione, terreno, *unclassify*). Si è deciso di testare i modelli già addestrati effettuando una serie di prove con diversi sotto campionamenti della densità della nuvola di punti (*sub-sampling* a 0.2 e 0.1 m) verificando se al variare della densità del dataset il modello addestrato ne beneficiava o ne risentiva in modo negativo. Nella tabella 43 riportiamo i valori caratteristici delle varie elaborazioni: la nuvola originale si compone di 102'233'962 punti con 4'900 punti per ogni m². Per i due sotto campionamenti casuali a 0.1 m e a 0.2 m la nuvola si compone rispettivamente di 2'610'214 punti con 125 pts. per m², e di 684'801 punti con 33 pts. per m².

sotto campionamento	punti	pts/m ²
Nuvola originale	102'233'962	4'900
sotto cam. a 0.1 m	2'610'214	125
sotto cam. a 0.2 m	684'801	33

Figura 43 Numero di punti per le varie soluzioni di sotto campionamento della nuvola fotogrammetrica con UAS.

Nella figura 44 riportiamo la nuvola ottenuta mediante metodo fotogrammetrico con UAS rimuovendo *outlier* e oggetti che non è nel nostro interesse classificare. A sinistra è visibile la nuova originale estremamente più densa mentre a destra troviamo la nuvola sotto campionata a 0.2 m con una densità di punti inferiore.

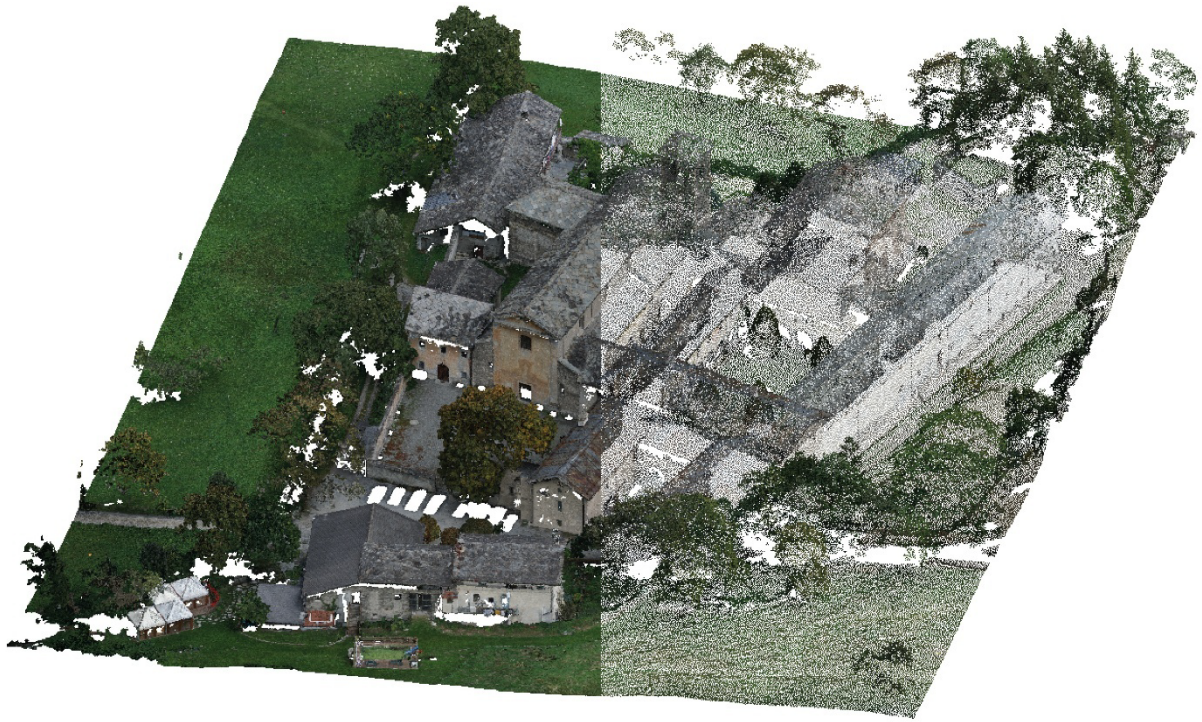


Figura 44 a sinistra nuvola originale a destra nuvola sotto campionata a 0.2 m.

4.3 Gli algoritmi d'apprendimento

Il principio di funzionamento di qualsiasi sistema di ML riguarda l'algoritmo di apprendimento. La sua scelta è fondamentale perché ognuno ha le sue specificità: non esiste un algoritmo univoco che funzioni in assoluto su ogni caso che gli viene sottoposto (banalmente non esiste un dataset uguale all'altro), per questo non è detto che un algoritmo che funziona bene su un determinato dataset funzioni altrettanto bene su un altro: si tratta sempre di ottimizzare e adattare l'algoritmo alle caratteristiche e necessità del proprio dataset (Raschka 2016). Le nuvole di punti che vengono sottoposte all'algoritmo d'intelligenza artificiale devono presentare delle classi simili tra loro: è impensabile applicare un algoritmo addestrato su un patrimonio architettonico storico per classificare una nuvola relativa ad una architettura contemporanea. Il patrimonio storico architettonico inoltre è di per sé estremamente disomogeneo e articolato sia per scelte formali stilistiche che per matericità. È necessario quindi fare diversi test con differenti soluzioni in modo da trovare quella migliore che ci permetta di ottenere il modello addestrato ottimale.

Uno dei grossi problemi su cui si concentrano gli studi riguarda proprio la generalizzazione del sistema di ML per poterlo replicare anche su dataset incogniti differenti dal dataset di addestramento. Una delle criticità maggiori è rappresentato dall'*over-fitting*: con questo termine viene indicato il comportamento di un modello addestrato che ha appreso in maniera troppo rigida il dataset di *training* non riuscendo più a generalizzare su altri dataset incogniti e vanificando tutti gli aspetti di automazione e replicabilità.

Online si possono trovare diverse *communities* di studiosi e ricercatori che condividono algoritmi di ML totalmente *open-source* studiati per svolgere differenti compiti. Con i mezzi a disposizione oggi è possibile creare il proprio algoritmo anche senza avere competenze di programmazione, ma interrogando sistemi LLM (*Large Language Model*) è possibile generare codici in maniera semi-indipendente.

Nell'ambito dei linguaggi di programmazione per il ML il più utilizzato è *Python* (il quale verrà impiegato anche in questa tesi), che dispone di una ricca libreria *open-source* costantemente aggiornata dalla sua *community* (*NumPy*, *scikit-learn*, *pandas*, *matplotlib*) dedicata alla manipolazione, estrazione, visualizzazione dei dati e algoritmi d'intelligenza

artificiale ed apprendimento. La più significativa tra queste librerie è *scikit-learn* che dispone di una vasta gamma di algoritmi per l'addestramento di classificatori, dai semplici algoritmi binari lineari ai più complessi ed articolati algoritmi non lineari e multi-classe: il *Perceptron* di Frank Rosenblatt, *Adaline (ADaptive Linear NEuron)* di Bernard Widrow, l'algoritmo a regressione logica, SVM (*Support Vector Machine*), SVM kernel, kNN (*k-nearest neighbor classifier*), *Gradient Boosting*, *Neural Network*, ad albero decisionale, RF (*Random Forest*). Di tutti gli algoritmi qui citati quelli maggiormente applicati sono: *Neural Network*, sistemi ad albero decisionale e, in particolare RF che è una derivazione di questi sistemi (Cappellazzo, Patrucco, Sammartano, Baldo, Spanò 2024).

- 4.3.1 *Gli algoritmi Random Forest*

Per spiegare il funzionamento logico di un algoritmo RF incominciamo a illustrare l'algoritmo ad albero decisionale, componente base del sistema RF. Fornendo all'algoritmo ad albero decisionale il dataset di addestramento, l'algoritmo deve rispondere a delle domande. La prima domanda viene detta radice e serve a separare il dataset in un primo gruppo-classe, in successione l'algoritmo dovrà rispondere ad altre domande a cascata, dividendo così ulteriormente il dataset. Viene a formarsi una struttura ad albero composta da tanti rami e foglie quante sono le domande. Ogni interrogativo divide il dataset in gruppi in base alle classi. Pertanto, è fondamentale per la computazione impostare una profondità massima a cui l'albero può arrivare, altrimenti il processo iterativo di domanda e risposta porterebbe ad un albero troppo profondo con una divisione eccessiva del dataset con confini decisionali che diventano sempre più complicati e articolati con il rischio di *overfitting* (Raschka 2016). Nella figura 45 riportiamo schematicamente un albero decisionale con le varie componenti e successioni logiche precedentemente descritte.

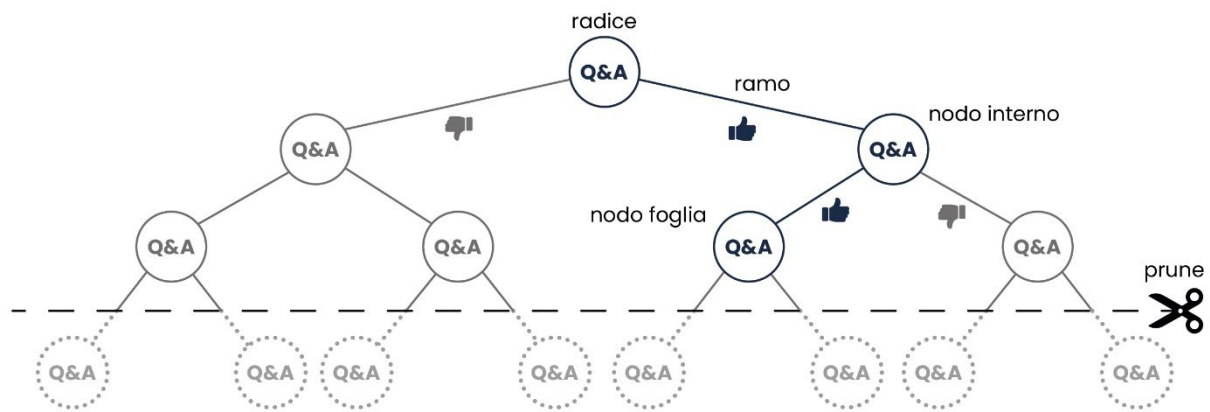


Figura 45 Algoritmo ad albero decisionale (Raschka 2016).

I modelli RF sono diffusamente utilizzati grazie alla loro adattabilità al variare del dataset ed alla loro scalabilità (il sistema non perde di qualità all'aumentare o diminuire della numerosità del dataset). I sistemi RF sono l'unione di più alberi decisionali, in modo da connettere più sistemi deboli tra loro costruendo un modello robusto, riducendo così gli errori e i problemi di *over-fitting*. Se nell'algoritmo decisionale definivamo la profondità dell'albero, nel sistema RF definiamo il numero di rami che i vari alberi devono avere. All'aumentare del numero di alberi aumenta anche il tempo di computazione, ma migliorano le prestazioni del modello addestrato (Grilli, Farella Torresani, Remondino 2019).

Possiamo dividere il funzionamento di un algoritmo RF in quattro passaggi. Il primo detto di *bootstrap* consiste nel selezionare dal dataset una serie di istanze in maniera casuale formando un sottoinsieme del dataset principale. Questo sotto campionamento costituisce un singolo albero decisionale. L'operazione di *bootstrap* viene ripetuta più volte formando più alberi uno diverso dall'altro. Ciò fa sì che ogni albero operi in maniera indipendente riducendo il rischio di correlazione tra gli alberi e di *over-fitting* nel modello finale. Ogni albero alla fine dà la sua previsione: conteggiando tra i vari alberi la soluzione di previsione che si presenta con maggiore frequenza, questa definirà la classe associata a quel dato (Grilli, Farella Torresani, Remondino 2019). Nella figura 46 riportiamo schematicamente le fasi precedentemente accennate per la generazione di un modello addestrato tramite algoritmo RF.

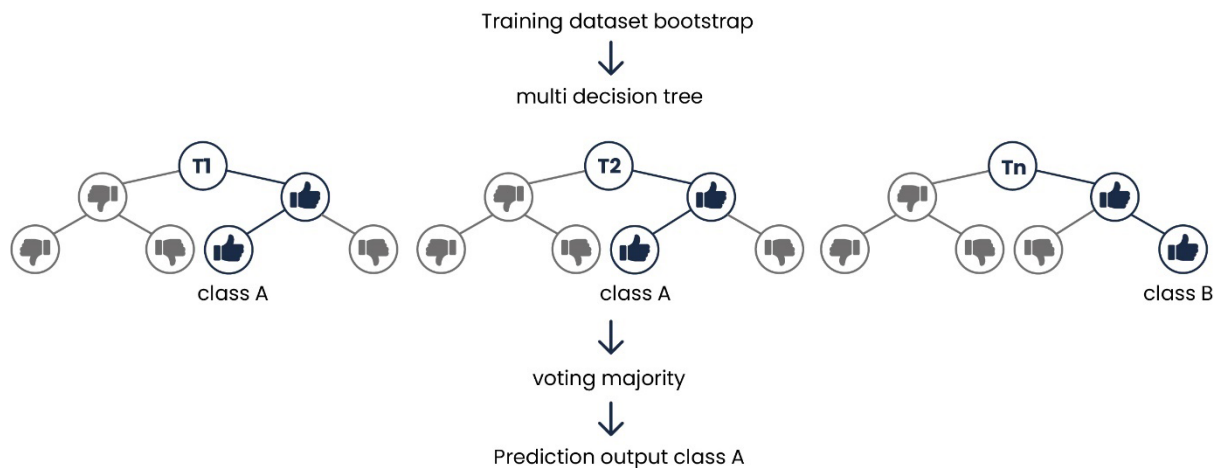
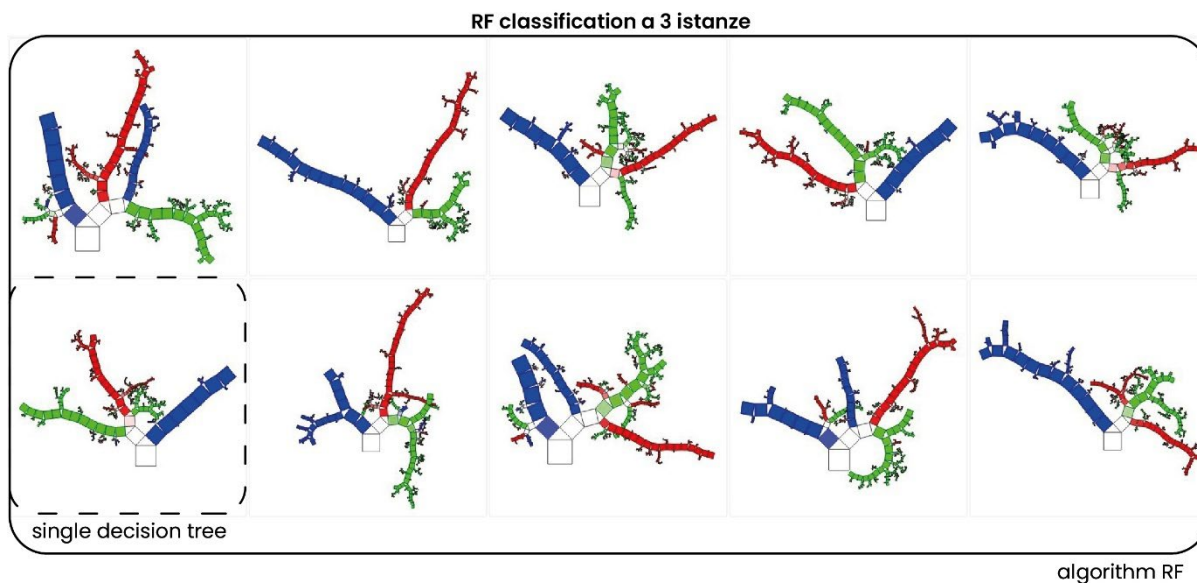
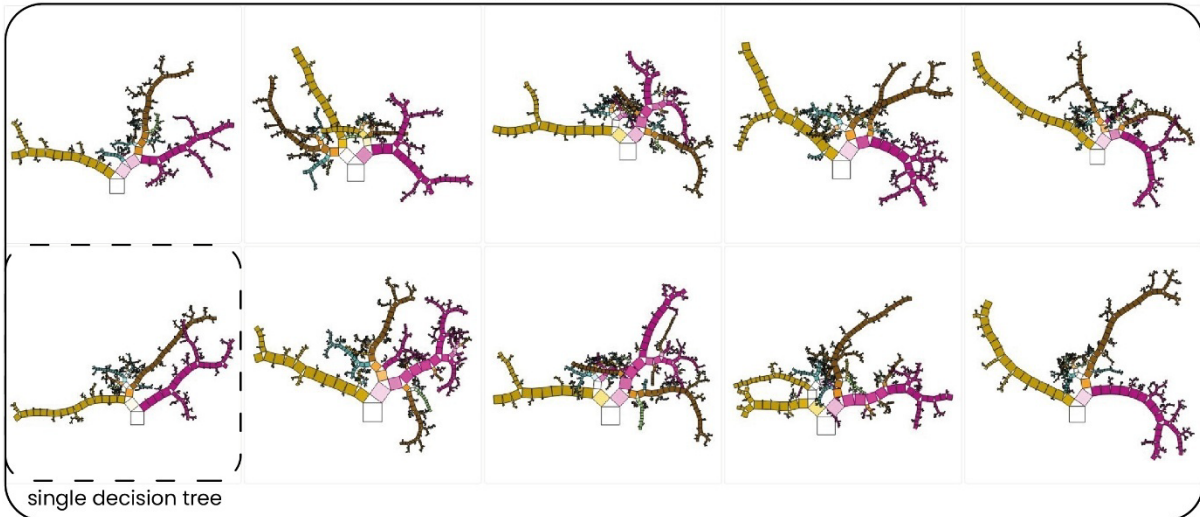


Figura 46 Schema algoritmo RF (Raschka 2016).

Nella figura 47 possiamo vedere i singoli alberi decisionali che formano uniti tra loro il sistema RF per le varie classificazioni di prova che si sono effettuate sul prospetto della Chiesa dei Santi Pietro e Andrea dell'abbazia della Novalesa. Questa rappresentazione detta a *Pythagoras trees* dei singoli alberi decisionali è stata ottenuta grazie al software *Orange Data Mining*.

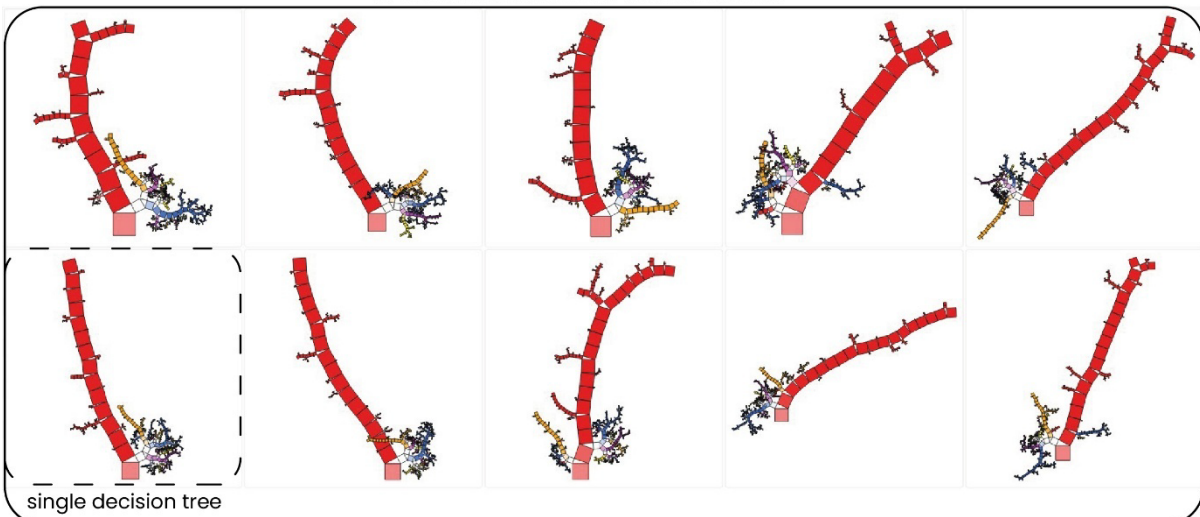


RF classification sulla base delle istanze ArCHdataset



algorithm RF

RF classification istanze architettoniche



algorithm RF

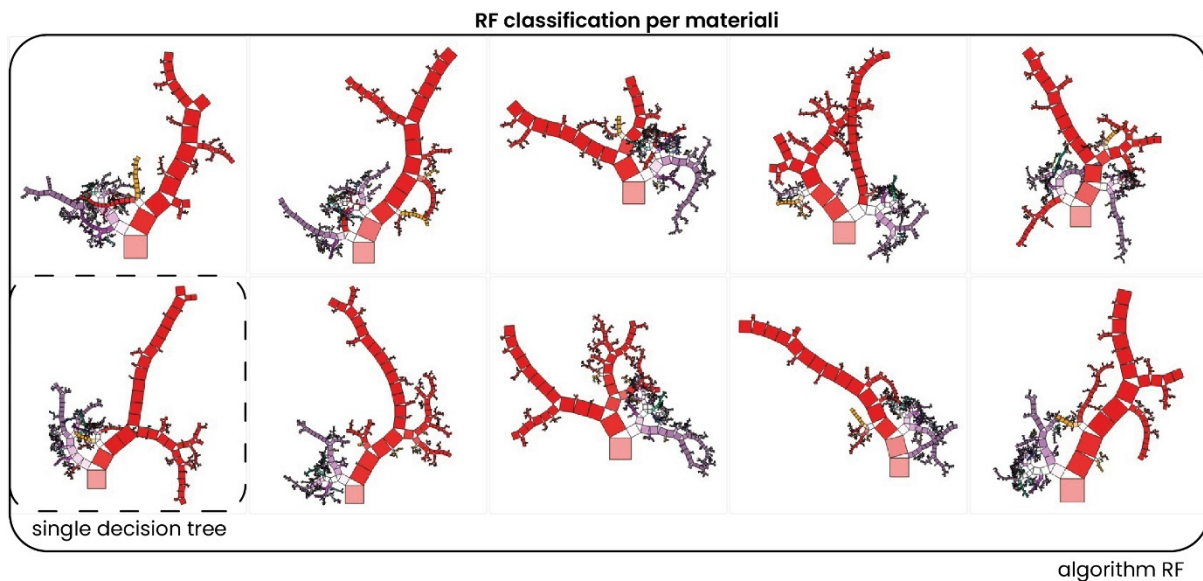


Figura 47 Rappresentazione grafica mediante Pythagoras trees dei singoli alberi decisionali che compongono il sistema RF impiegato per le varie classificazioni. Elaborazioni ottenute con Orange Data Mining.

Sul caso studio dell'abbazia della Novalesa lavorando sugli aspetti architettonici e materici dei prospetti della Chiesa dei Santi Pietro e Andrea sono stati adottati i seguenti algoritmi RF:

- Il primo algoritmo RF chiamato RF4PCC (*Random Forest 4 Point Cloud Classification*) è stato sviluppato dal gruppo di ricerca 3DOM-FBK (*3D Optical Metrology-Foundation Bruno Kessler*) con sede a Trento che si occupa in ambito accademico della acquisizione, generazione e classificazione di nuvole di punti per il patrimonio architettonico. Nello specifico è stato applicato un algoritmo RF sviluppato dai ricercatori Eleonora Grilli, Fabio Remondino, Alessandro Torresani. Si tratta di un algoritmo basato su linguaggio *Python* completamente *open-source*.

- *Orange Data Mining*: si tratta di un *software open-source* pensato per la modifica e manipolazione di dataset di varia natura. Integra al suo interno una sezione dedicata ad algoritmi d'intelligenza artificiale dove troviamo: RF, *Neural Network*, kNN, *Gradient boosting*, *Decision tree*, *Logistic regression*, SVM. Mediante questo software è stato possibile applicare differenti algoritmi d'intelligenza artificiale per le varie classificazioni che si è deciso di testare. Come è possibile vedere dalla tabella 48 gli algoritmi che mostrano le migliori *performance* anche al variare delle istanze sono il RF e il *Neural Network*. Dato che per la tesi ci si è concentrati sugli algoritmi RF, si è deciso di utilizzare il risultato ottenuto con quest'ultimo, per poi confrontarlo con gli altri algoritmi d'intelligenza artificiale RF (RF4PCC

ed LLM). Nella tabella di seguito riportiamo le varie metriche di *performance* dei vari algoritmi d'intelligenza artificiale.

Classificazione a 3 istanze				
Model	CA	F1	Prec	Recall
Neural Network	0.999	0.999	0.999	0.999
RF	0.998	0.998	0.998	0.998
kNN	0.997	0.997	0.997	0.997
Gradient Boosting	0.997	0.997	0.997	0.997
Decision Tree	0.994	0.994	0.994	0.994
Logistic Regression	0.993	0.993	0.993	0.993
SVM	0.927	0.925	0.928	0.927

Classificazione adottando le istanze ArCHdataset				
Model	CA	F1	Prec	Recall
RF	0.997	0.997	0.997	0.997
Neural Network	0.996	0.996	0.996	0.996
kNN	0.99	0.99	0.99	0.99
Decision Tree	0.988	0.988	0.988	0.988
Gradient Boosting	0.987	0.989	0.992	0.987
Logistic Regression	0.969	0.967	0.966	0.969
SVM	0.891	0.891	0.897	0.891

Classificazione per elementi architettonici				
Model	CA	F1	Prec	Recall
RF	0.999	0.999	0.999	0.999
Neural Network	0.998	0.998	0.998	0.998
Decision Tree	0.997	0.997	0.997	0.997
kNN	0.994	0.994	0.994	0.994
Gradient Boosting	0.987	0.99	0.994	0.987
SVM	0.966	0.966	0.969	0.966
Logistic Regression	0.95	0.944	0.946	0.95

Classificazione per materiali				
Model	CA	F1	Prec	Recall
RF	0.998	0.998	0.998	0.998
Neural Network	0.997	0.997	0.997	0.997
Gradient Boosting	0.995	0.995	0.995	0.995
Decision Tree	0.992	0.992	0.992	0.992
kNN	0.99	0.99	0.99	0.99
SVM	0.95	0.953	0.96	0.95
Logistic Regression	0.941	0.936	0.934	0.941

Figura 48 Metriche per la valutazione di vari algoritmi d'intelligenza artificiale sui test di classificazione. Gli algoritmi sono disposti in tabella da quello con le performance migliori al peggiore. Dati ottenuti grazie al software Orange Data Mining.

Un ulteriore vantaggio dell'utilizzo del software *Orange Data Mining* è la possibilità di manipolare il dataset e applicare algoritmi di intelligenza artificiale senza la necessità di competenze di programmazione. Questo è reso possibile dal fatto che il software offre un ambiente di programmazione basato su VPL (*Visual Programming Language*). Come illustrato nell'immagine 49, la programmazione avviene tramite blocchi anziché tramite la scrittura di codice.

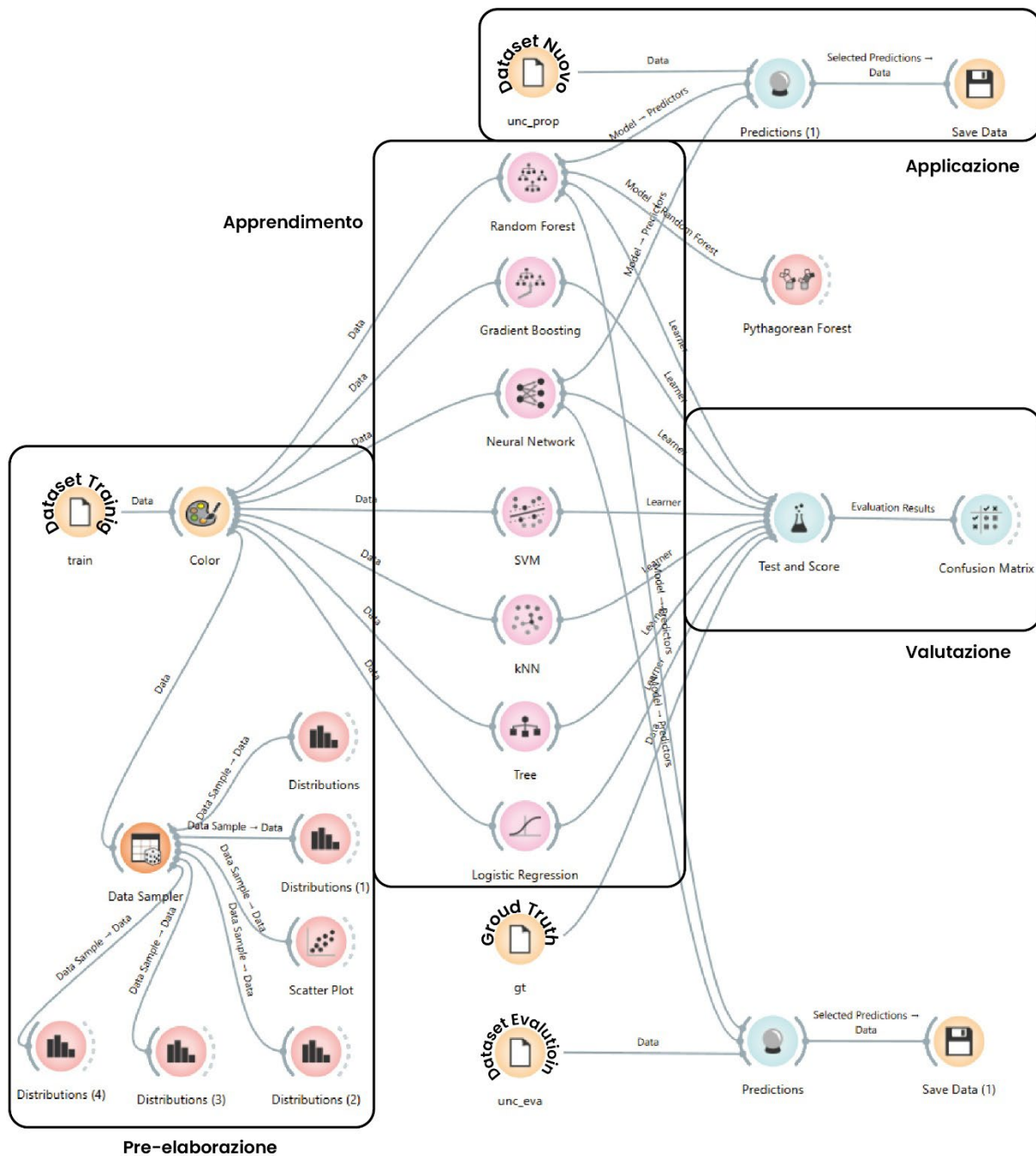


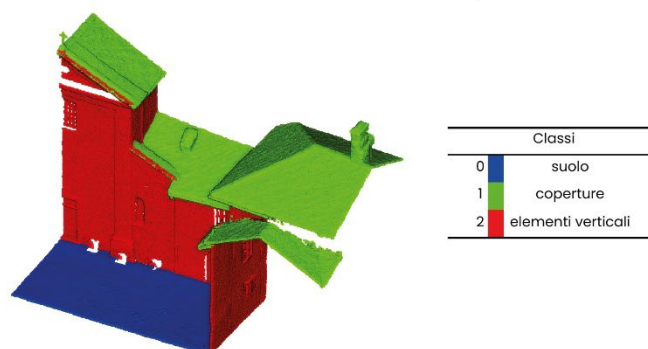
Figura 49 Schermata illustrativa di Orange Data Mining per la realizzazione di un algoritmo d'intelligenza artificiale mediante programmazione a blocchi.

- Infine si è cercato di generare in maniera semiautonomo un algoritmo RF mediante l'ausilio di sistemi LLM. Si è richiesto ad un LLM di scrivere un algoritmo di ML di tipo RF, sottolineando le caratteristiche dei vari dataset (*training, evaluation, groud truth*) e come essi erano composti e strutturati in colonne ed il loro significato, specificando che il dataset da classificare era una nuvola di punti riguardante un bene architettonico a cui erano già state attribuite delle classi le quali dovevano essere apprese e successivamente applicate ad un dataset incognito non ancora classificato.

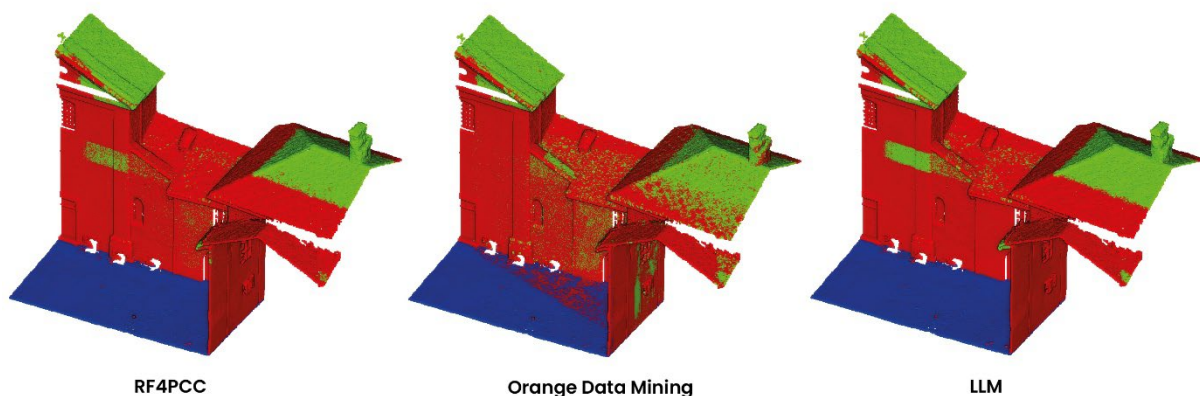
Possiamo vedere questo modo di scrivere algoritmi d'intelligenza artificiale come un modo semplificato di scrivere codici informatici complessi in formato testuale a patto di seguire una logica e fornire comandi ben precisi al sistema LLM. Il codice generato tramite LLM è disponibile su GitHub (https://github.com/LeoR89756/random-forest-point-cloud-classify/blob/main/RF_point_cloud_classify.py).

I tre algoritmi RF applicati (RF4PCC, *Orange Data Mining* e quello generato mediante LLM) hanno fornito sul dataset di test (*evaluation*) il riconoscimento delle varie istanze precedentemente accennate, potendo successivamente applicare il modello addestrato ottenuto sul dataset riguardante l'intero prospetto del sagrato. Come è possibile visualizzare dai risultati riportati nell'immagine 50 i vari algoritmi RF restituiscono degli esiti molto simili tra loro ma estremamente rumorosi ed incoerenti rispetto al *ground truth* dataset.

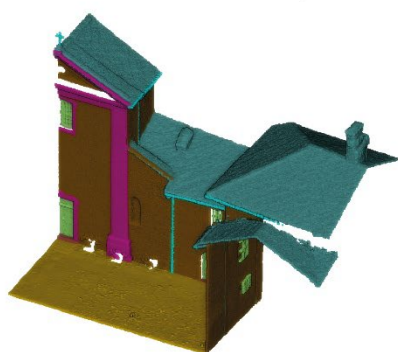
Classificazione manuale (Ground truth) a 3 istanze



Classificazione tramite i tre algoritmi RF impiegati

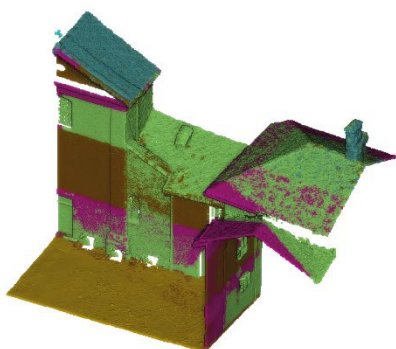


Classificazione manuale (Ground truth) istanze ArCHdataset

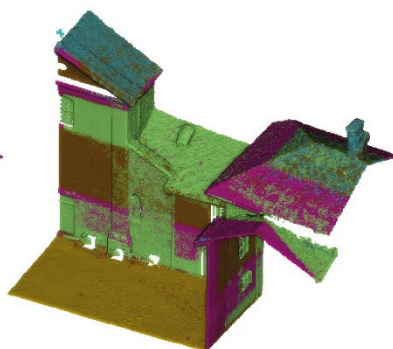


Classi	
0	molding
1	floor
2	door window
3	wall
4	stair
5	roof
6	other

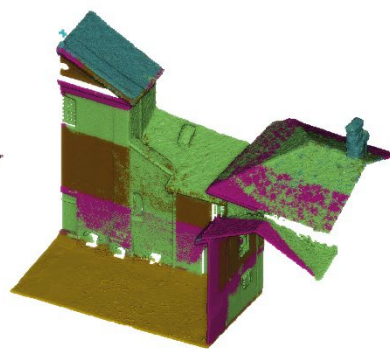
Classificazione tramite i tre algoritmi RF impiegati



RF4PCC

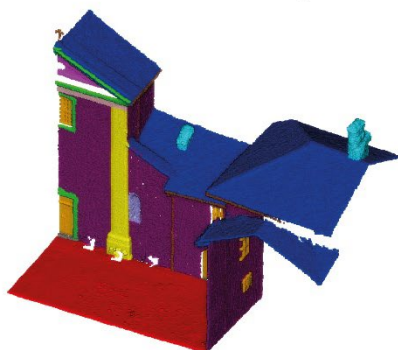


Orange Data Mining



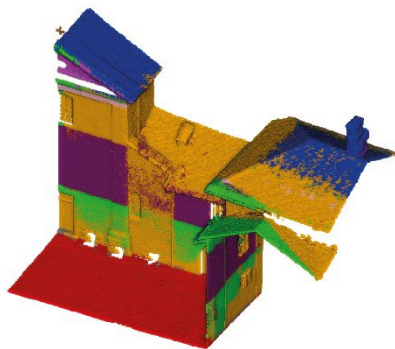
LLM

Classificazione manuale (Ground truth) istanze architettoniche

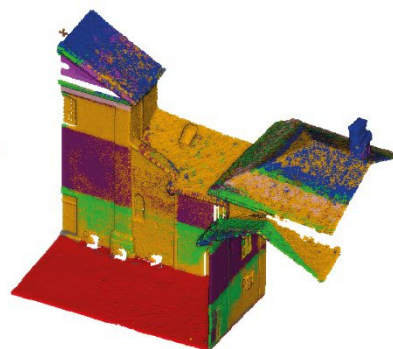


Classi	
0	terreno
1	bucature infissi
2	lesene
3	trabeazione
4	timpano
5	cornici
6	tetto
7	comignolo
8	monofora cieca
9	muro
10	grondaie pluviali
11	scale

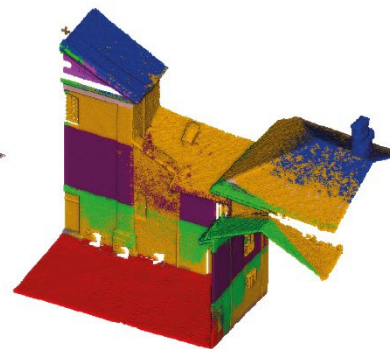
Classificazione tramite i tre algoritmi RF impiegati



RF4PCC



Orange Data Mining



LLM

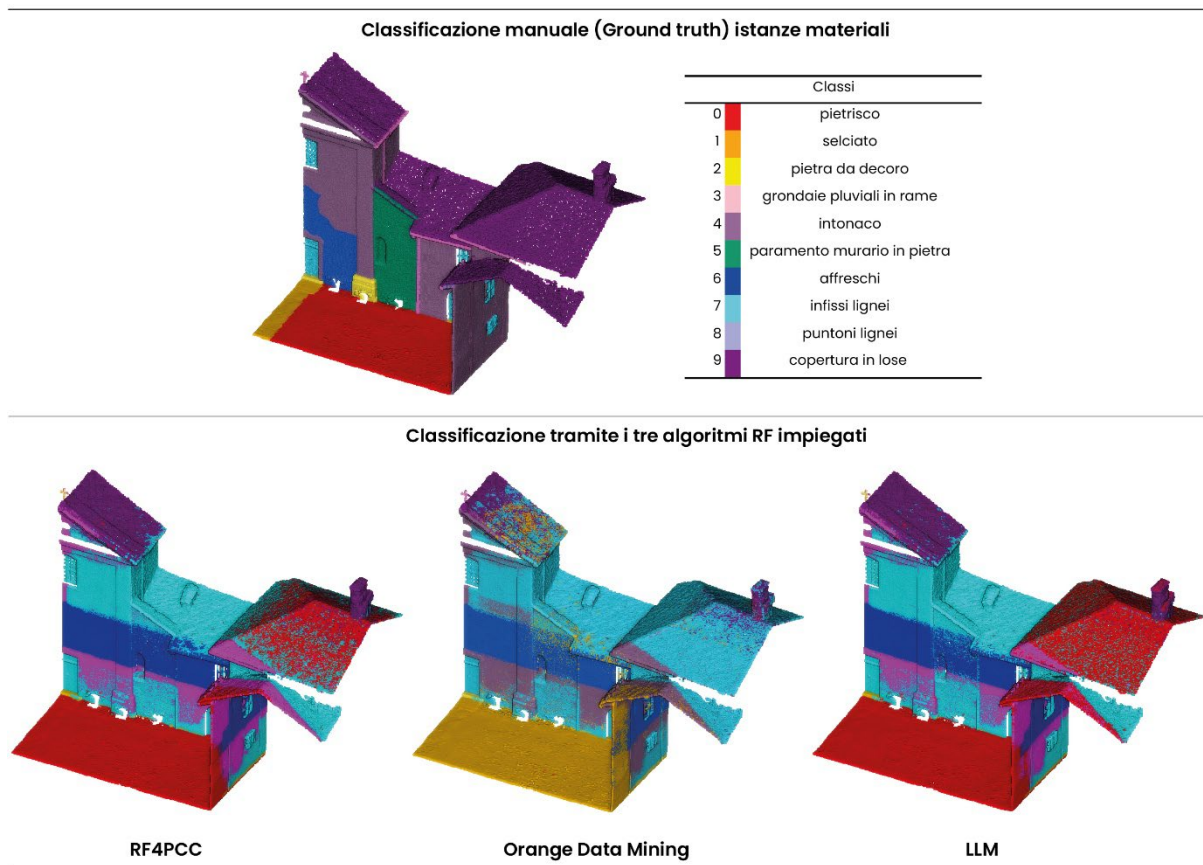


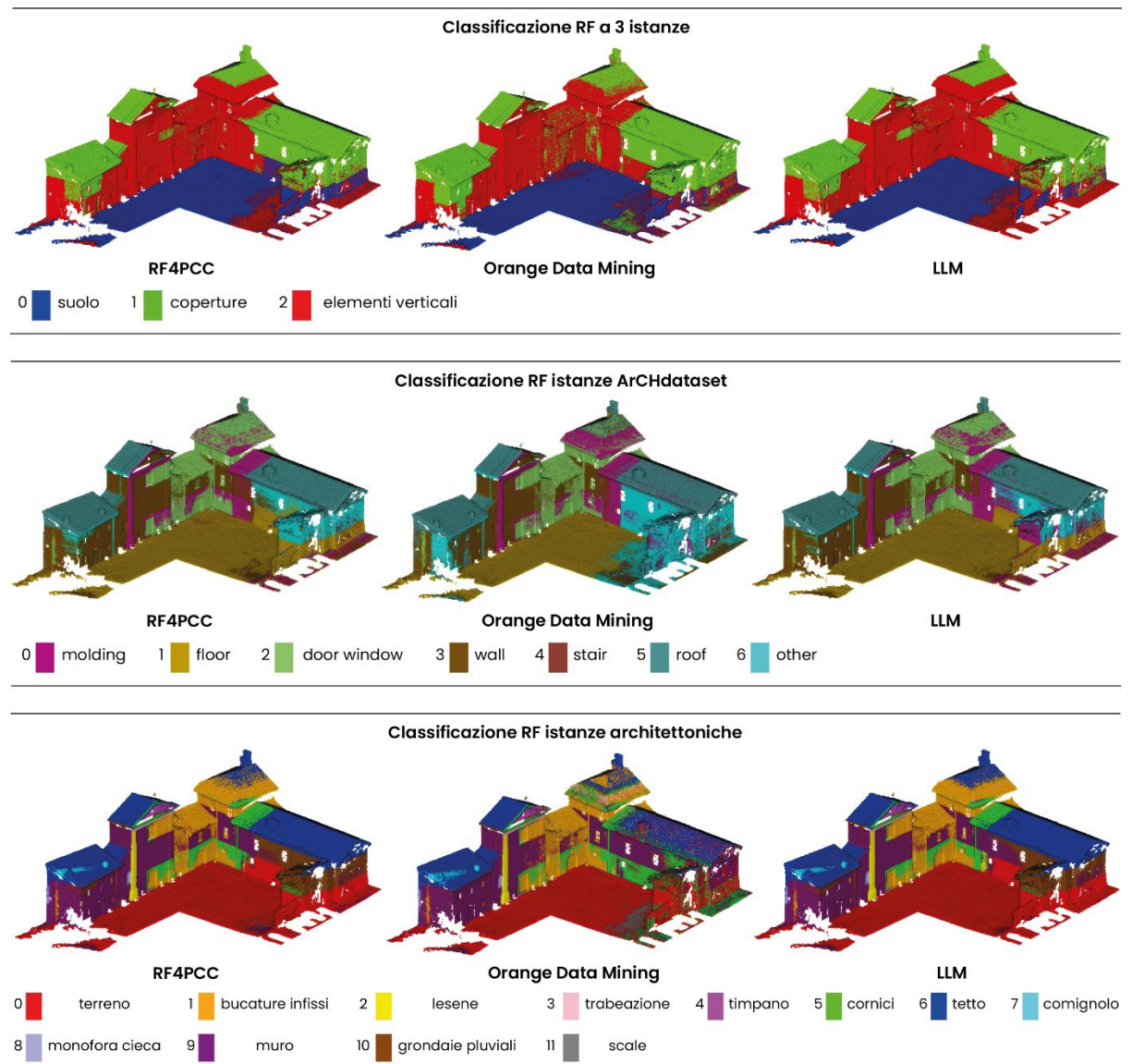
Figura 50 Le varie porzioni di test con le differenti prove di classificazione ottenute applicando i vari algoritmi Random Forest.

Questi risultati ottenuti con i vari algoritmi RF sono chiaramente errati: ciò è dovuto alla scarsa significatività delle *features*. Come è visibile nella tabella 51 i valori sono molto bassi e le *features* di maggior rilevanza sono quelle riguardanti le coordinate X e Z, le quali non sono sufficienti a descrivere efficacemente le classi e, di conseguenza, il sistema di ML fatica a trovare una correlazione tra *features* e classi. Di seguito al paragrafo 4.4 vedremo come migliorare il risultato inserendo una nuova *feature* generata artificialmente. Come verrà descritto successivamente, questo migliorerà l'efficacia dell'addestramento a discapito, però, della replicabilità e della *generalization capability* del modello.

Feature importance									
	X	Y	Z	R	G	B	Nx	Ny	Nz
3 Class	0.2708	0.0145	0.3549	0.0258	0.0036	0.0015	0.1231	0.0151	0.1907
ArCHdataset	0.2828	0.0908	0.3073	0.0339	0.0216	0.0140	0.0924	0.0158	0.1415
Elementi architettonici	0.2757	0.0959	0.3168	0.0323	0.0198	0.0143	0.0926	0.0151	0.1376
Materili	0.2137	0.2108	0.3409	0.0374	0.0229	0.0181	0.0543	0.0097	0.0921

Figura 51 Features importance ricavati tramite algoritmo RF4PCC.

Nella figura 52 sono stati applicati i vari modelli addestrati ottenuti grazie agli algoritmi d'intelligenza artificiale RF utilizzandoli sull'intero prospetto del sagrato. Come era prevedibile già dai dataset ottenuti per la porzione di *evaluation* il risultato non è corretto poiché presenta eccessivo rumore e le classi predette presentano una *performance* molto bassa.



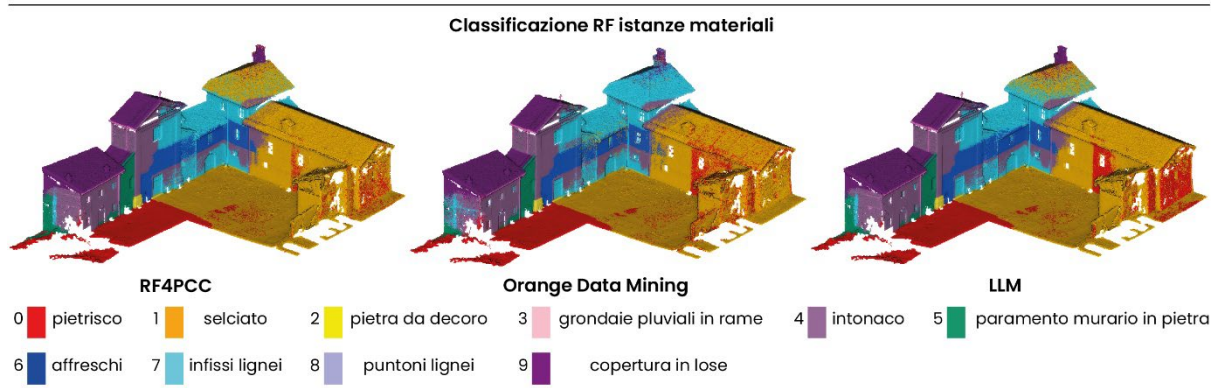


Figura 52 Applicazione del modello addestrato sull'intero dataset per i vari test di classificazione.

- 4.3.2 *Algoritmo basato su features geometriche e software classificatore.*

Per la classificazione del modello digitale a scala ambientale si sono utilizzate due soluzioni differenti applicandole sul dataset ottenuto tramite metodo fotogrammetrico UAS. Una soluzione vede l'impiego dell'algoritmo basato su filtri geometrici sviluppato dal professore Martin Isenburg (LAStools 2024). L'altra soluzione impiega un modello addestrato ML per la classificazione di nuvole di punti integrato in un software fotogrammetrico di elevata diffusione.

Mediante il primo metodo è possibile classificare le nuvole di punti in maniera automatica in quattro istanze differenti: terreno, vegetazione, costruito (tetti), *unclassify*. A questo scopo impiegheremo tre algoritmi che svolgono tre differenti funzioni: *lasground*, *lasheight* e *lasclassify*. Tutti e tre sono algoritmi basati su *features* geometriche che non si avvalgono dell'intelligenza artificiale. Dobbiamo imputare agli algoritmi mediante l'interfaccia del software una serie di parametri che ne determinano la precisione, l'aggressività e l'iterazione del calcolo (LAStools 2024).

1. Con *lasground* si definiscono i punti della nuvola che appartengono al terreno, attraverso il software dobbiamo imputare il tipo di terreno su cui operiamo (*archaeology*, *wilderness*, *nature*, *town*, *city*, *metro*) e la precisione (*default*, *fine*, *extra-fine*, e *ultra-fine*). Avendo definito questi parametri la nuvola viene divisa in un grigliato uniforme. La dimensione delle singole celle varia in base al tipo di terreno che impostiamo: per gli ambienti naturali si usa un passo di 5 metri, mentre per gli ambienti urbanizzati il passo varia tra i 10 e i 50 metri. Una volta avviata la computazione l'algoritmo per ogni cella analizza i punti più bassi in base alla loro quota altimetrica. I punti selezionati vengono uniti tra loro generando un TIN (*Triangulated Irregular Network*), una superficie solida provvisoria composta da nodi collegati tra loro per formare un reticolo di triangoli. Sulla *mesh* creata vengono applicati una serie di filtri geometrici:

- filtro deviazione standard: calcola la deviazione standard per ogni punto rispetto al triangolo, escludendo quelli con deviazione troppo alta dalla classificazione del terreno.
- filtro dei picchi: rimuove i picchi anomali (*spike*) che si discostano eccessivamente dal terreno.

- filtro *bulge*: valuta se la superficie del triangolo TIN si discosta dai punti, utile per comprendere se un punto appartiene al terreno.

Tali filtri ci servono per affinare la selezione dei punti rientranti nella classe del terreno. (LAsTools 2024). Alla fine si ottiene una nuvola come è visibile dall'immagine 53 dove abbiamo identificato i punti corrispondenti al terreno e non.

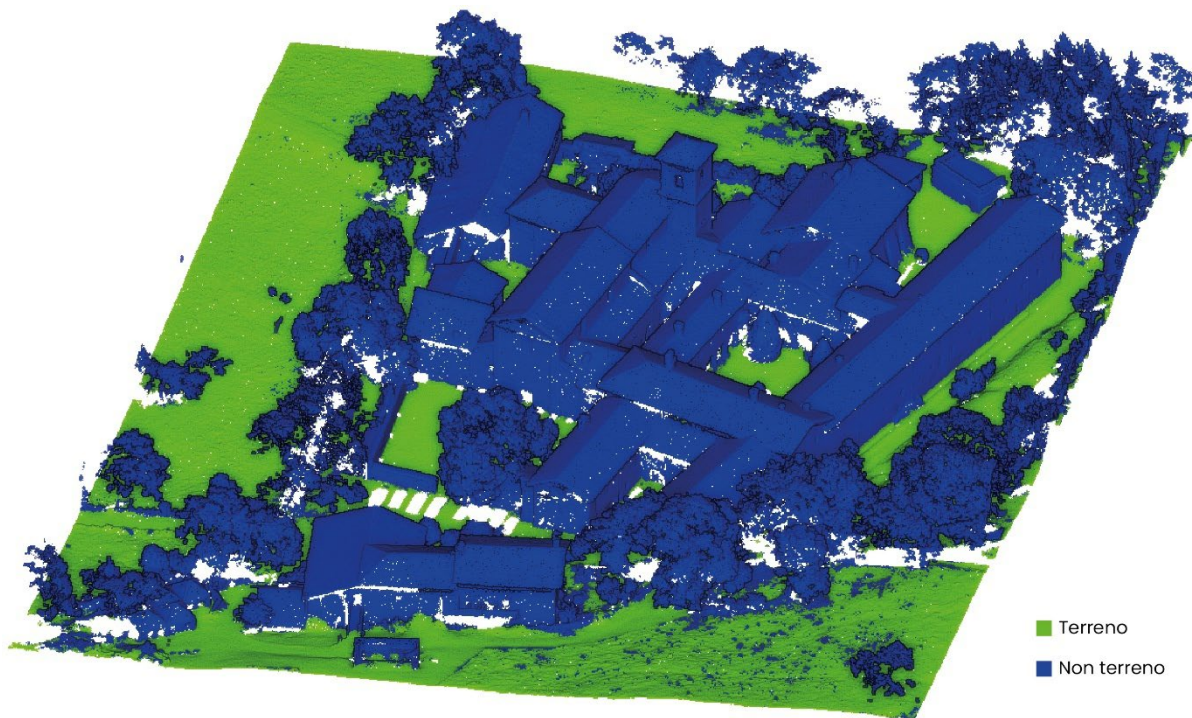


Figura 53 Test della nuvola UAV dell'abbazia di Novalesa per l'individuazione dei punti appartenenti al suolo utilizzando lasground di LAsTools.

2. Sui punti che non sono stati classificati procediamo con l'applicazione dell'algoritmo successivo (*lasheight*), attribuendo ad essi una distanza altimetrica rispetto al terreno. È fondamentale che il modello digitale abbia coordinate non geocentriche (altitudine non espressa a partire dal centro della terra), ma coordinate altimetriche espresse rispetto a un piano di riferimento locale (es. livello medio del mare, UTM). La distanza tra terreno e punto viene espressa con una scala radiometrica di colori associata a quel punto come possiamo vedere dalla immagine 54 riportata sotto. (LAsTools 2024).

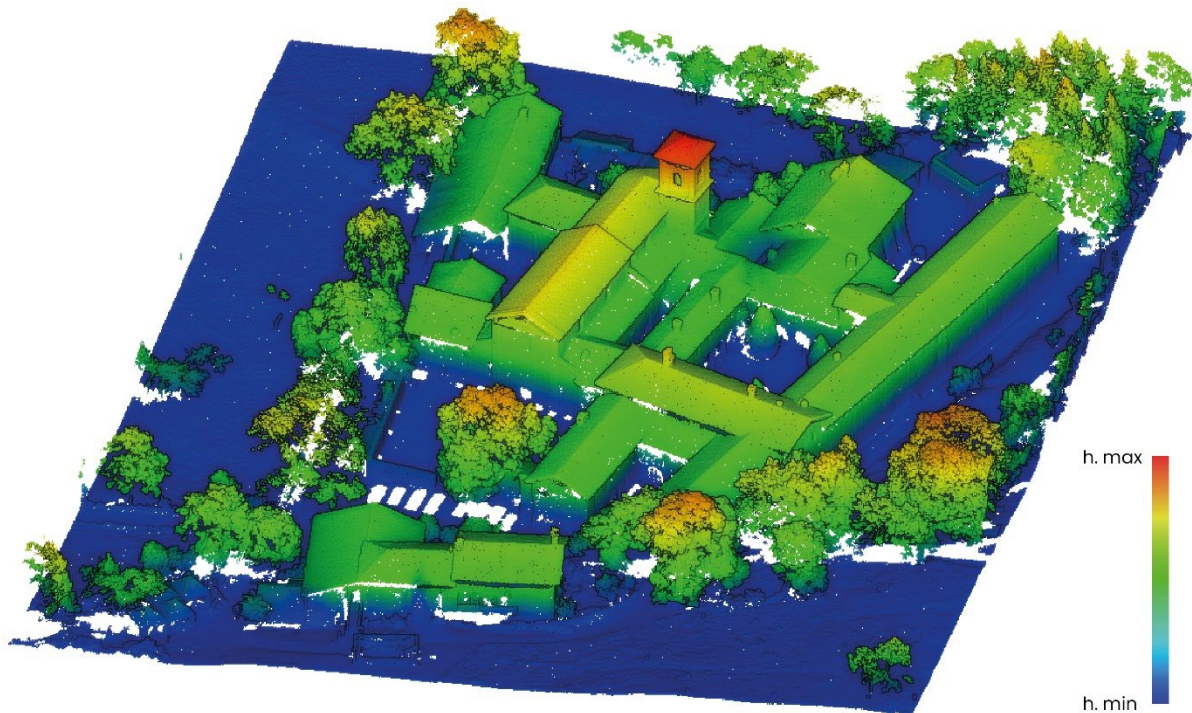


Figura 54 Computazione altezze dei punti della nuvola UAV dell'abbazia della Novalesa individuati come non appartenenti al terreno utilizzando *lasheight* di LAStools.

3. Applichiamo l'ultimo algoritmo (*lasclassify*) che ci permette di estrarre le istanze del costruito (l'algoritmo è pensato per riconoscere come costruito solo i tetti) e della vegetazione. Per distinguere fra queste due classi l'algoritmo fa un'analisi per area valutando per i punti selezionati la rumorosità e la rugosità del dato. In genere la vegetazione presenta una elevata rumorosità mentre i tetti essendo elementi planari, più o meno inclinati sono a bassa rugosità. (LAStools 2024).

Nell'immagine 55 possiamo vedere come la nuvola è stata divisa nelle seguenti classi: terreno, costruito, vegetazione e *unclassify*. L'unica criticità risiede nel fatto che nella classe costruito rientrano solo i tetti, rimangono esclusi tutti i prospetti degli edifici che ricadono nell'istanza *unclassify* e che l'algoritmo *lasclassify* non è in grado di riconoscere.

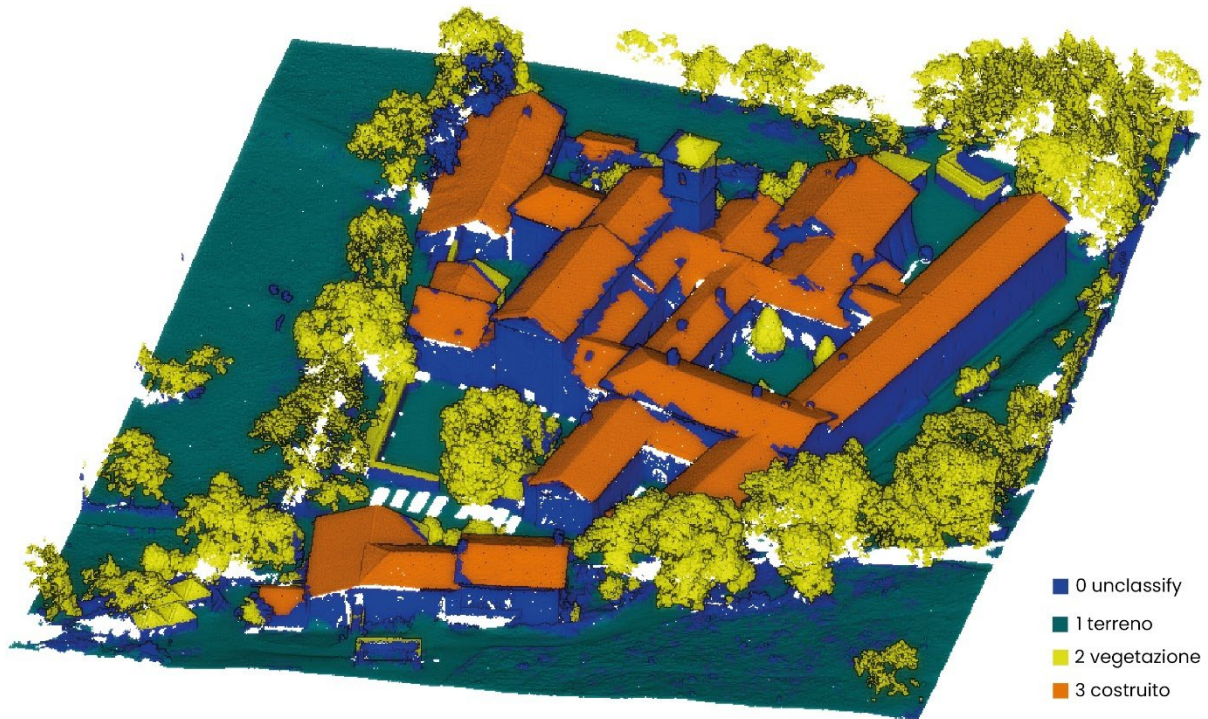
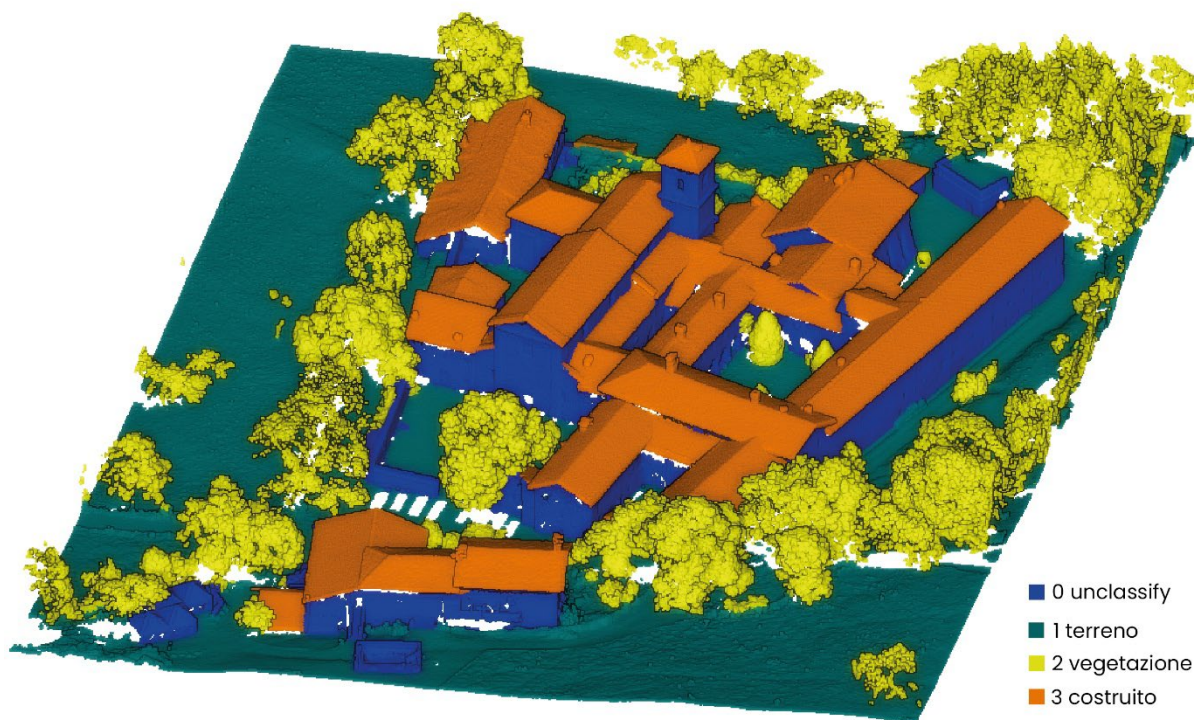


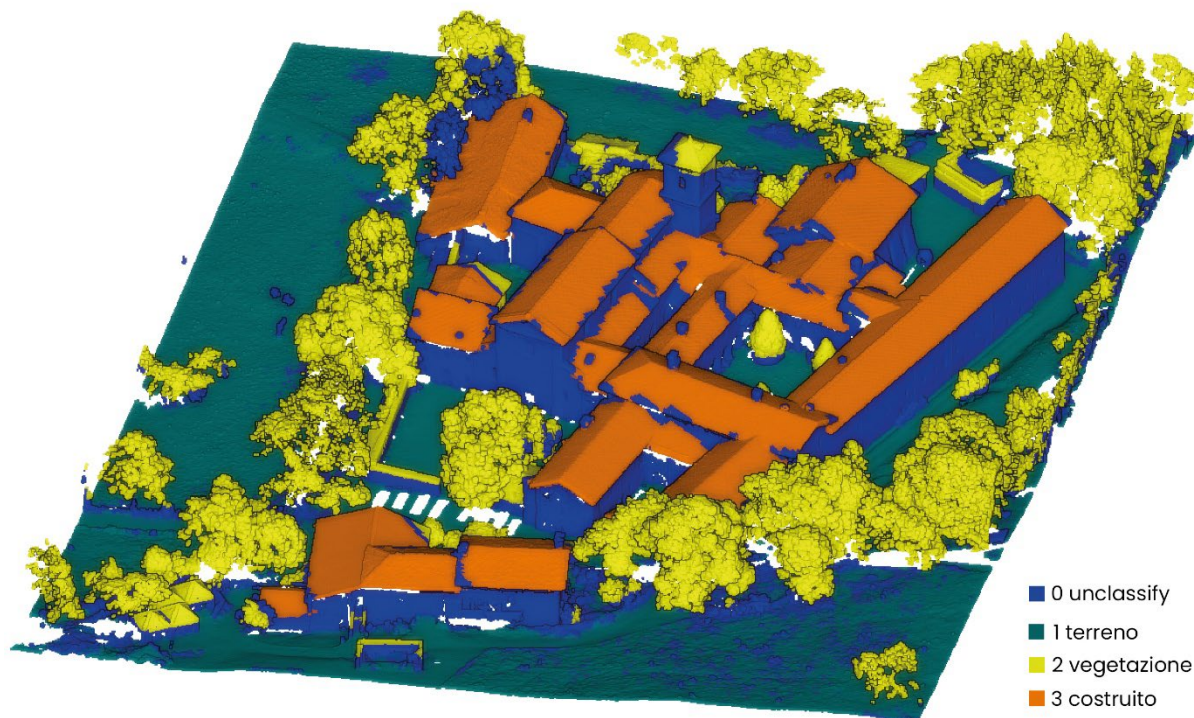
Figura 55 Test della nuvola UAV dell'abbazia di Novalesa per l'individuazione dei punti appartenenti alle varie classi utilizzando lasclassify di LAStools.

Gli algoritmi di Martin Isenburg si basano su regole geometriche deterministiche ben precise: senza l'applicazione di un algoritmo d'intelligenza artificiale e l'addestramento di un modello, ciò li rende ottimi per casi a bassa complessità operando in tempi brevi. Perdono però di efficacia se il dataset diventa troppo articolato a causa della rigidità delle *features* geometriche su cui si basano gli algoritmi. Applicando questa soluzione *open-source* sul complesso abbaziale della Novalesa con differenti sotto campionamenti del dataset il risultato è molto soddisfacente per tutte le casistiche come è visibile dall'immagine 56.

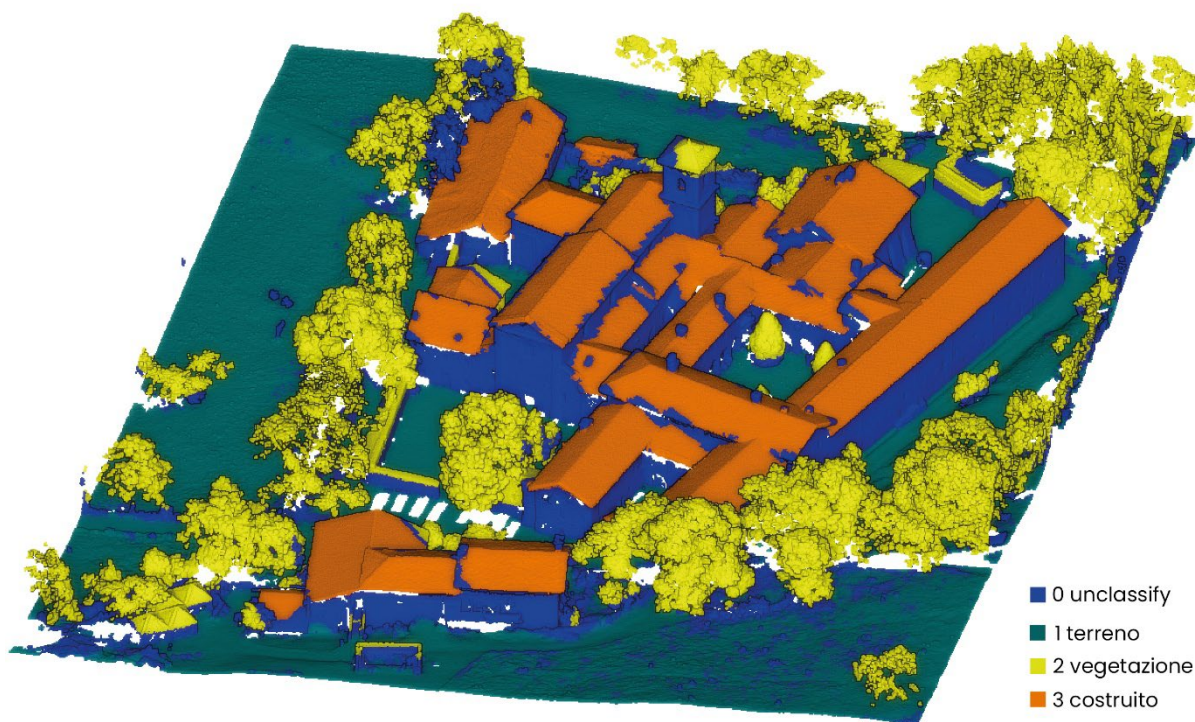
Ground truth



Classificazione LAStools su nuvola non sotto campionata



Classificazione LAStools su nuvola sotto campionata a 0.1 m



Classificazione LAStools su nuvola sotto campionata a 0.2 m

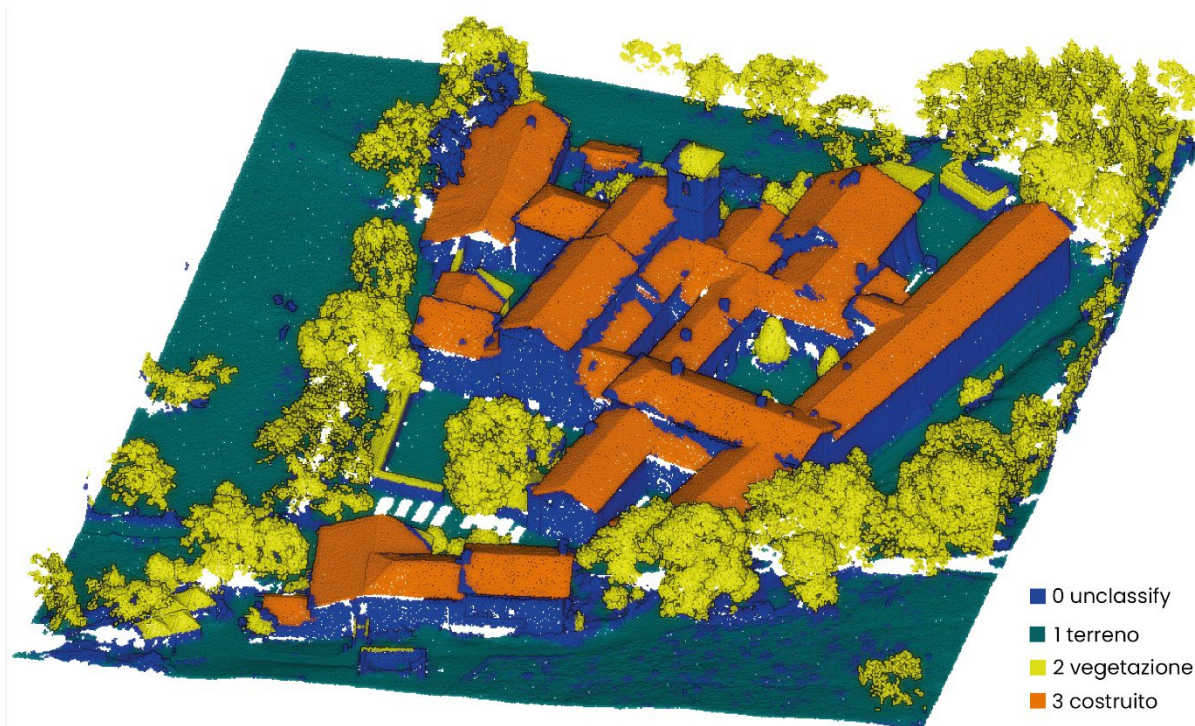
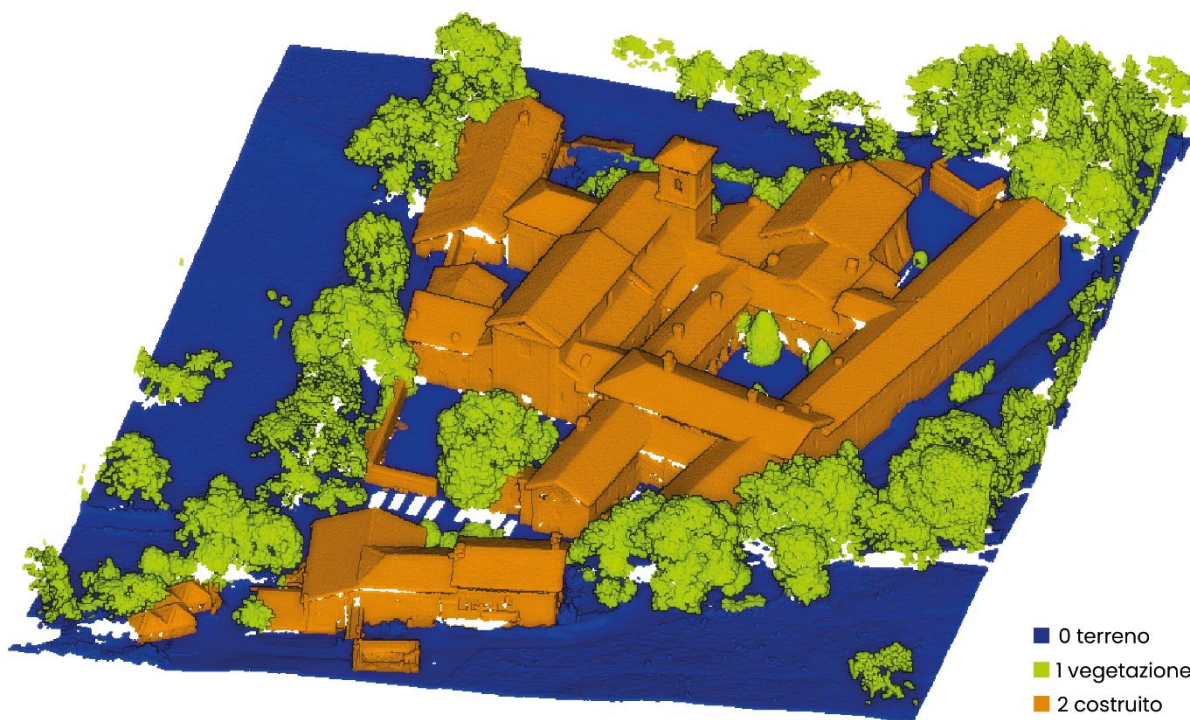


Figura 56 Classificazione nuvola UAS dell'abbazia della Novalesa ai vari sotto campionamenti mediante algoritmi LAStools.

Per il secondo metodo viene applicato un *software* (non *open-source*) di fotogrammetria denominato *Metashape* con una sezione dedicata alla classificazione di nuvole di punti. Il *software* combina due differenti soluzioni per estrarre le istanze di terreno, costruito,

vegetazione. Sono applicati due algoritmi differenti, uno basato su filtri geometrici, l'altro di ML. Quello geometrico viene impiegato per estrarre i punti della nuvola appartenenti al terreno: il suo funzionamento non è dissimile da quello visto in precedenza per l'algoritmo LAStools. Il modello digitale viene diviso in celle di dimensioni regolari (in base alla tipologia di terreno scelto). Di ogni cella vengono identificati i punti più bassi, essi vengono uniti tra loro formando una superficie solida composta da triangoli (TIN). L'algoritmo procede applicando filtri geometrici (*Max angle, Max distance, Max terrain slope, Cell size, Erosion radius, Return number*) includendo nuovi punti all'interno dell'etichetta terreno. Per attribuire un'istanza ai punti non ancora classificati viene impiegato un modello addestrato integrato nel *software* istruito su un ampio dataset (*Metashape* non rilascia informazioni sull'algoritmo di apprendimento impiegato) per determinare i punti appartenenti al costruito e alla vegetazione. L'unico vantaggio riscontrato nell'applicazione di questa soluzione rispetto a quella precedente sta nel fatto di poter classifica oltre ai tetti come costruito anche le murature verticali. Il software viene testato su differenti sotto campionamenti del dataset. Nell'immagine 57 riportiamo il *ground truth* è le varie prove di classificazioni con i diversi sotto campionamenti: anche in questo caso i risultati ottenuti sono molto soddisfacenti.

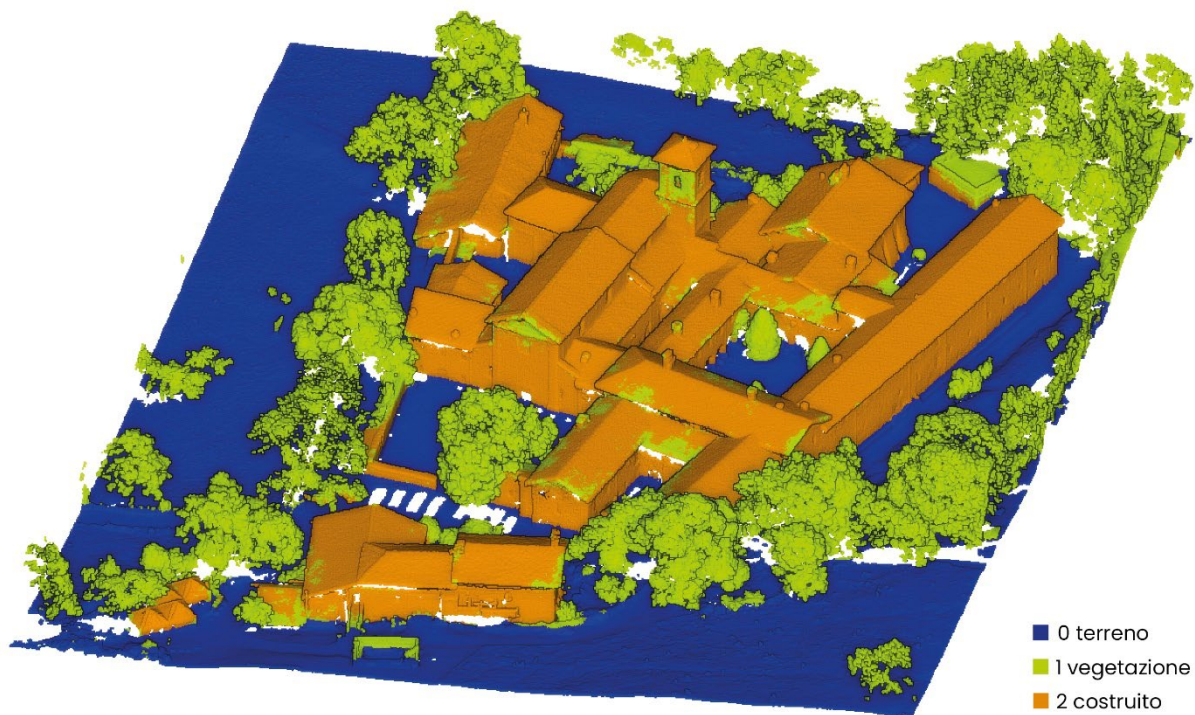
Ground truth



Classificazione Metashape su nuvola non sotto campionata



Classificazione Metashape su nuvola sotto campionata a 0.1 m



Classificazione Metashape su nuvola sotto campionata a 0.2 m

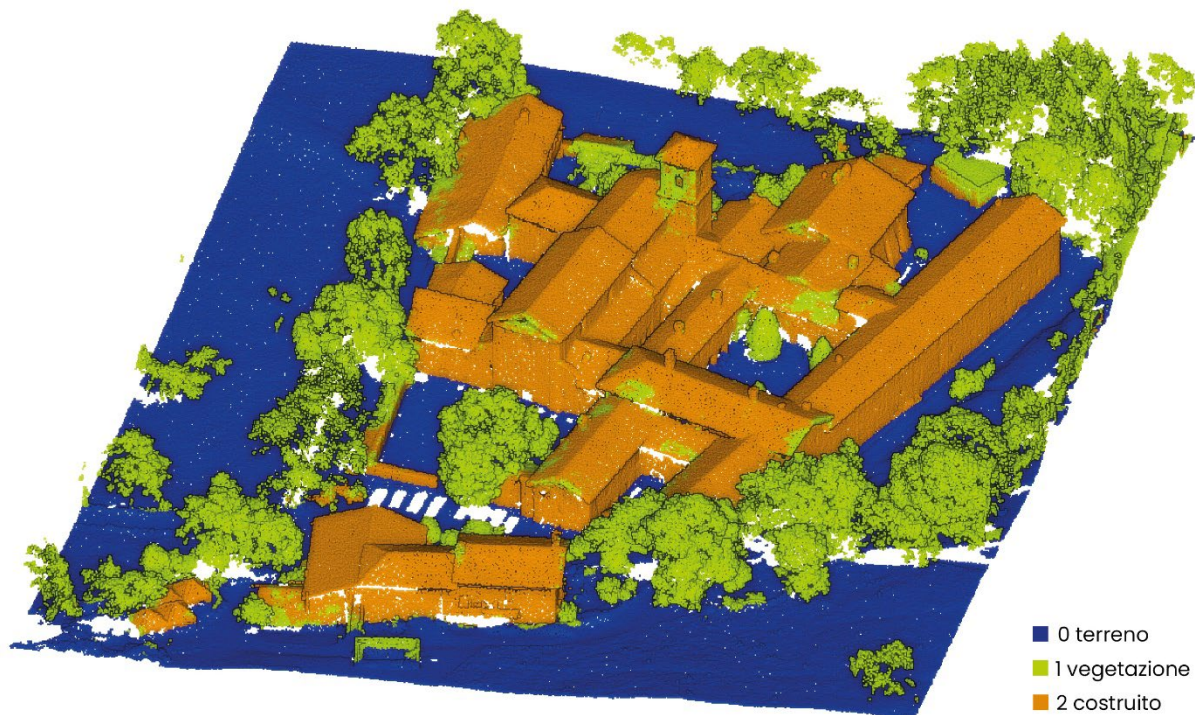


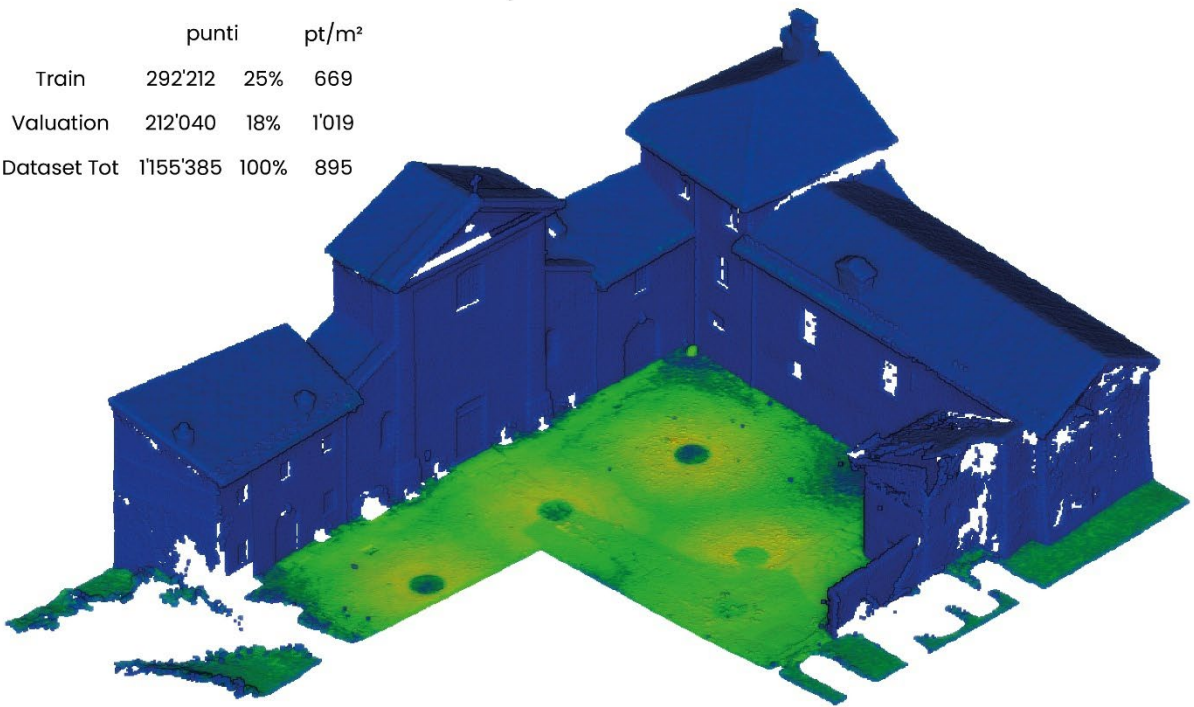
Figura 57 Classificazione nuvola UAS dell'abbazia della Novalesa ai vari sotto campionamenti mediante software Metashape.

4.4 Over-fitting e replicabilità

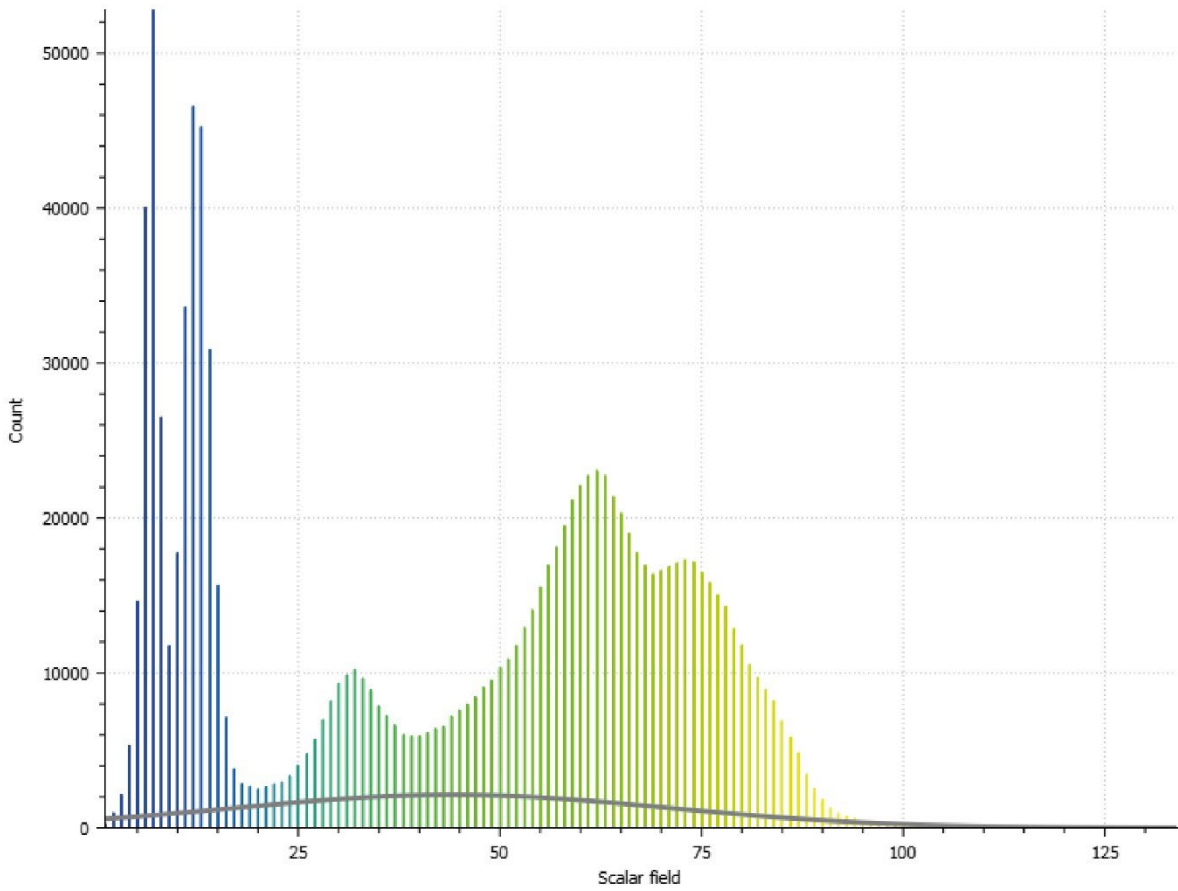
Come è possibile vedere all'immagine 50 le nuvole precedentemente classificate a scala architettonica sono estremamente rumorose e poco coerenti. Però gli algoritmi RF impiegati hanno classificato in maniera simile tra loro il dataset di *evaluation*. Ciò ci conferma che il problema non risiede nei codici degli algoritmi d'intelligenza artificiale ma nelle *features* che gli forniamo. Per questo si è deciso di ripartire dalla fase di pre-elaborazione manuale. Le caratteristiche del dataset di partenza ($X, Y, Z, R, G, B, N_x, N_y, N_z$) sono intrinseche della nuvola ed esse vengono acquisite dallo strumento o calcolate dal *software*, ma non sono sufficientemente significative. Per migliorare i risultati di classificazione e fornire ulteriori informazioni ai vari algoritmi RF è stata elaborata una nuova *feature* effettuando un sotto campionamento per classi e calcolandone la densità. Rispetto alla soluzione precedente per uniformare le varie nuvole (UAV e TLS) il sotto campionamento è stato adoperato per differenziare le classi usando le istanze stesse come elemento discriminate per effettuare il *subsample*. Attraverso *CloudCompare* (a valle del sotto campionamento filtrato per classi) per ogni punto è stata calcolata la sua densità rispetto ai punti limitrofi, attribuendo ad ogni *array* (punto) uno *scalar field* (una scala numerica finita a cui viene associato per ogni numero un colore): questo costituisce la nuova *feature* aggiuntiva. Si è deciso inoltre di invertire rispetto alla soluzione precedente la porzione di dataset di addestramento e test. Nell'immagine 58 riportiamo le distribuzioni di densità attraverso gaussiana per i vari sotto campionamenti effettuati per classi. Riportiamo anche per ogni caso il numero di punti e pts/m^2 per il dataset totale e le sotto porzioni di *training* ed *evaluation*.

Sotto campionamento a 3 istanze

	punti		pt/m ²
Train	292'212	25%	669
Valuation	212'040	18%	1'019
Dataset Tot	1'155'385	100%	895

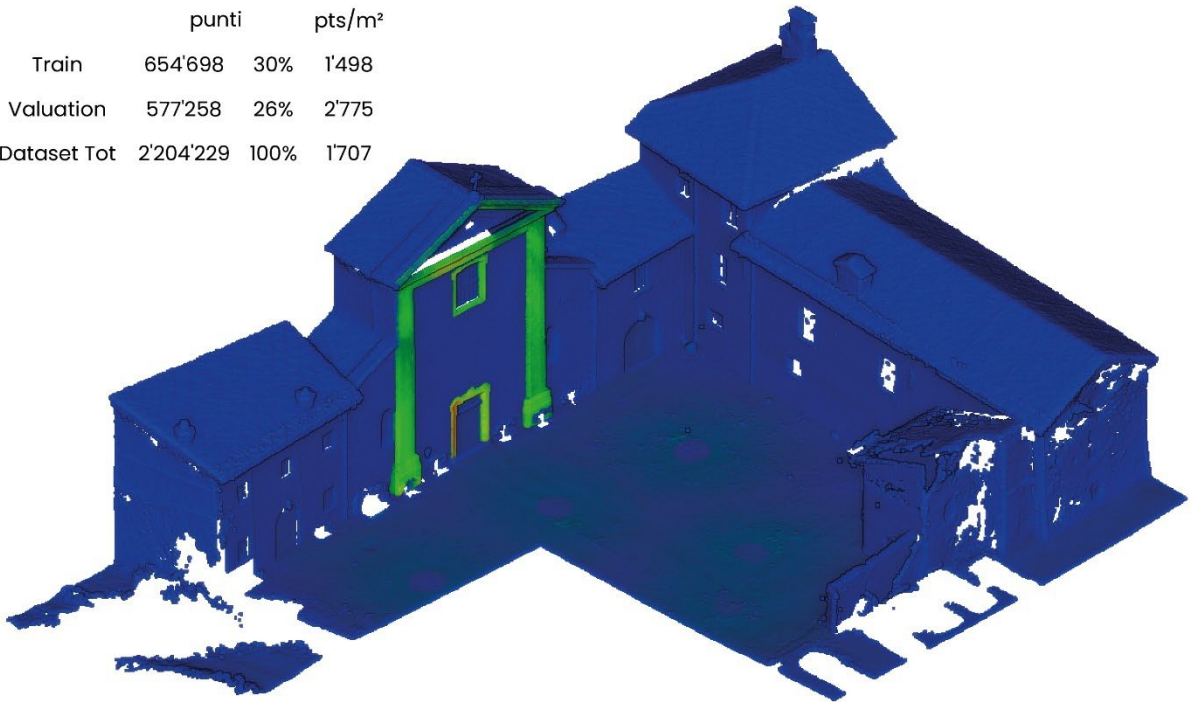


Gauss: mean = 44.109295 / std.dev. = 26.757128 [1075 classes]

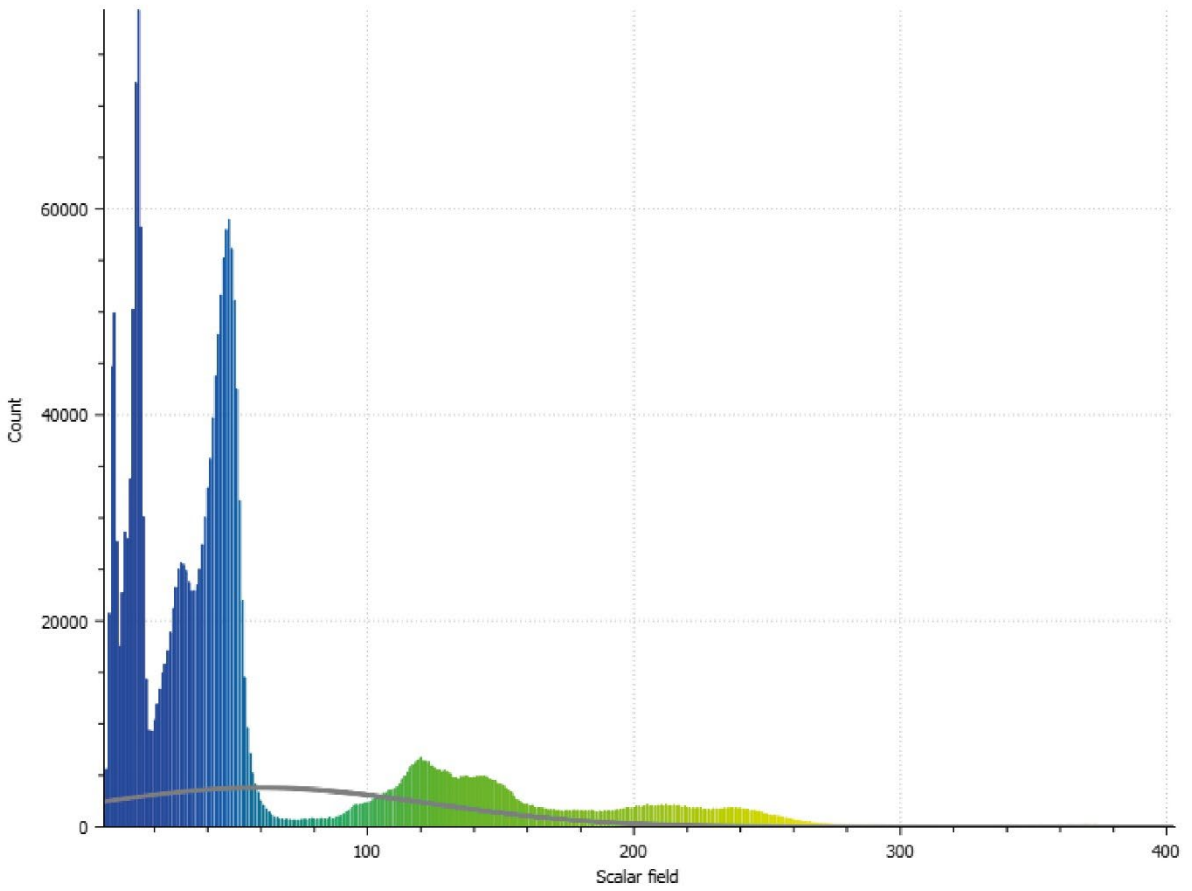


Sotto campionamento istanze ArCHdataset

	punti		pts/m ²
Train	654'698	30%	1'498
Valuation	577'258	26%	2'775
Dataset Tot	2'204'229	100%	1'707

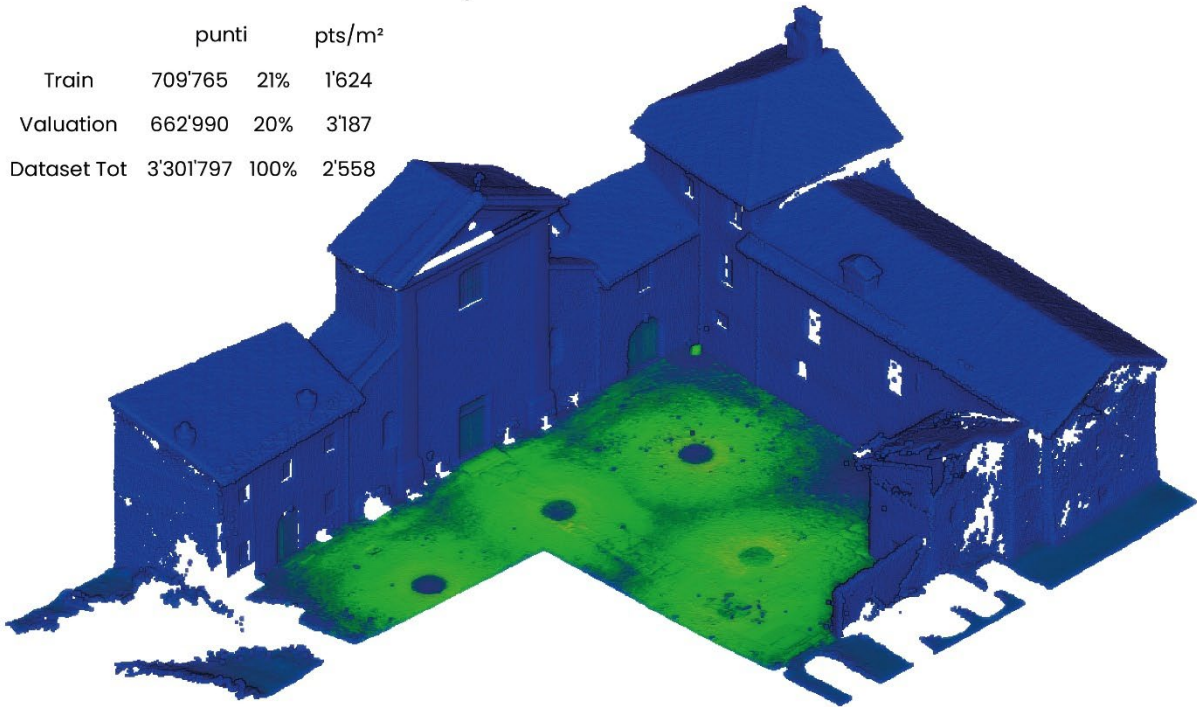


Gauss: mean = 59.766663 / std.dev. = 62.713051 [1485 classes]

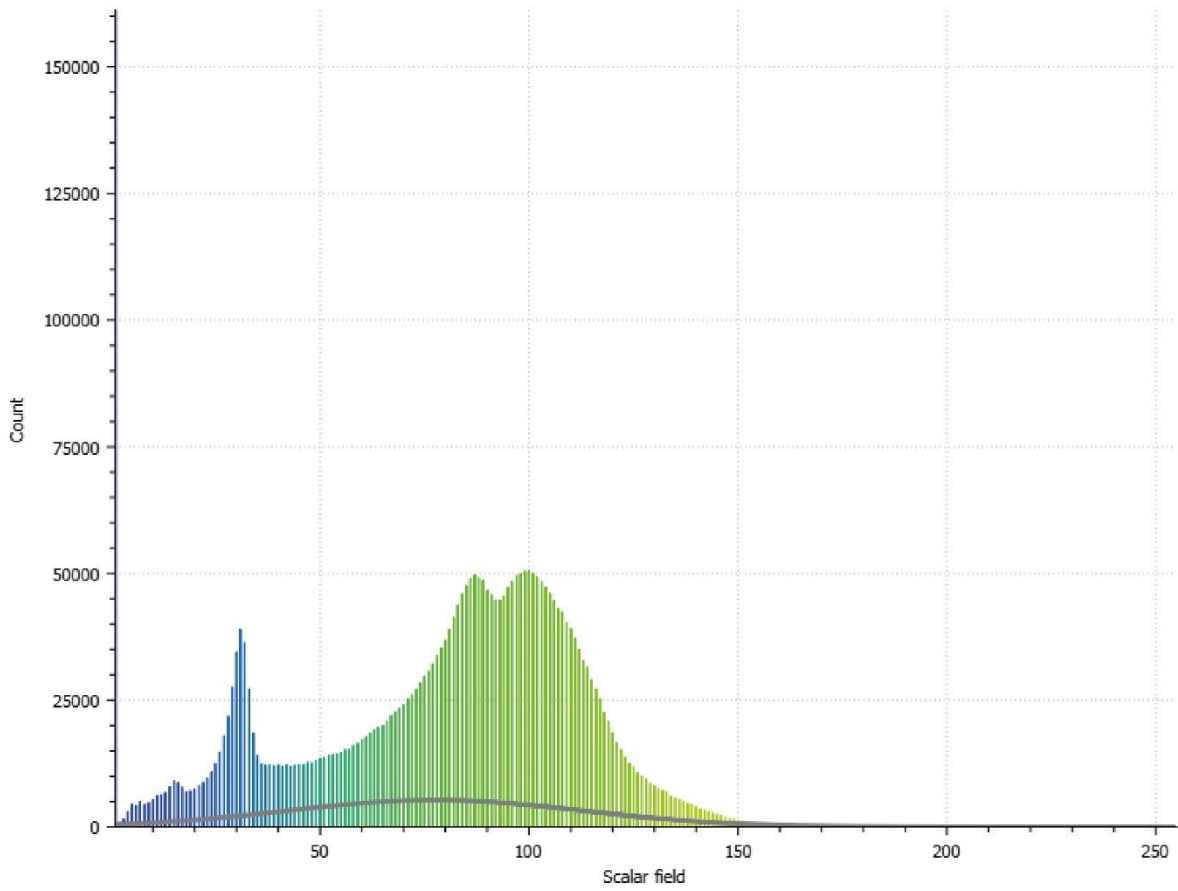


Sotto campionamento istanze architettoniche

	punti		pts/m ²
Train	709'765	21%	1'624
Valuation	662'990	20%	3'187
Dataset Tot	3'301'797	100%	2'558

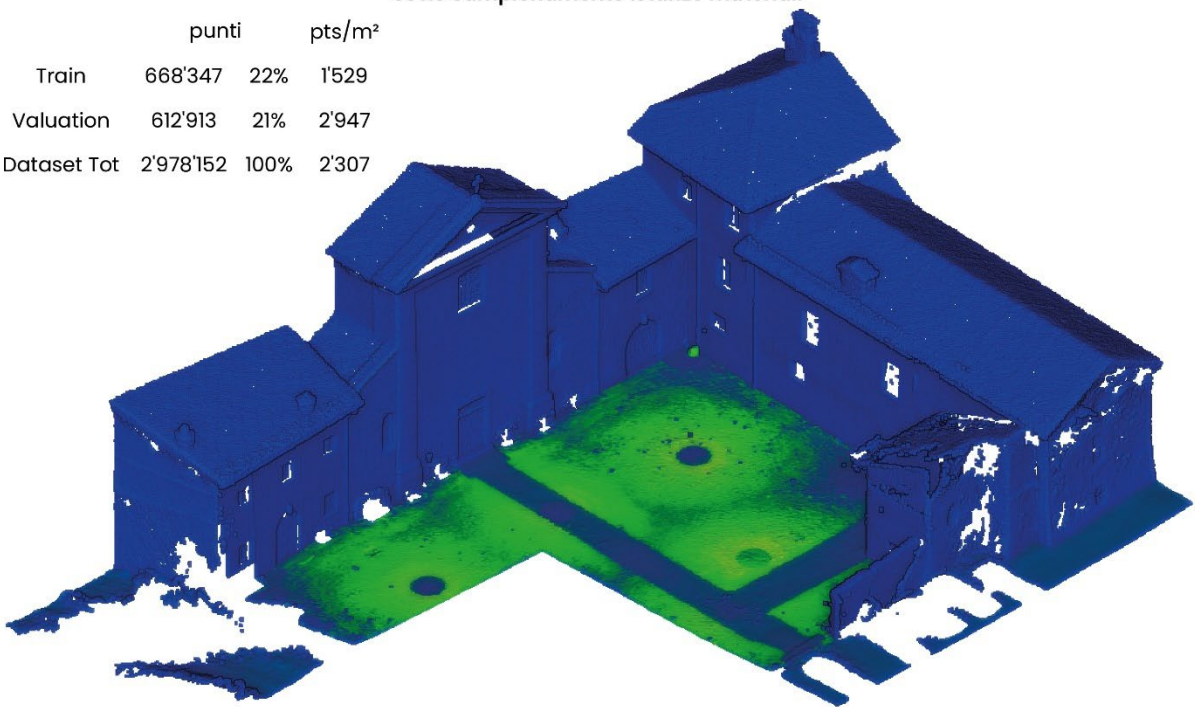


Gauss: mean = 77.642387 / std.dev. = 34.931168 [1818 classes]



Sotto campionamento istanze materiali

	punti		pts/m ²
Train	668'347	22%	1'529
Valuation	612'913	21%	2'947
Dataset Tot	2'978'152	100%	2'307



Gauss: mean = 77.878700 / std.dev. = 42.384815 [1726 classes]

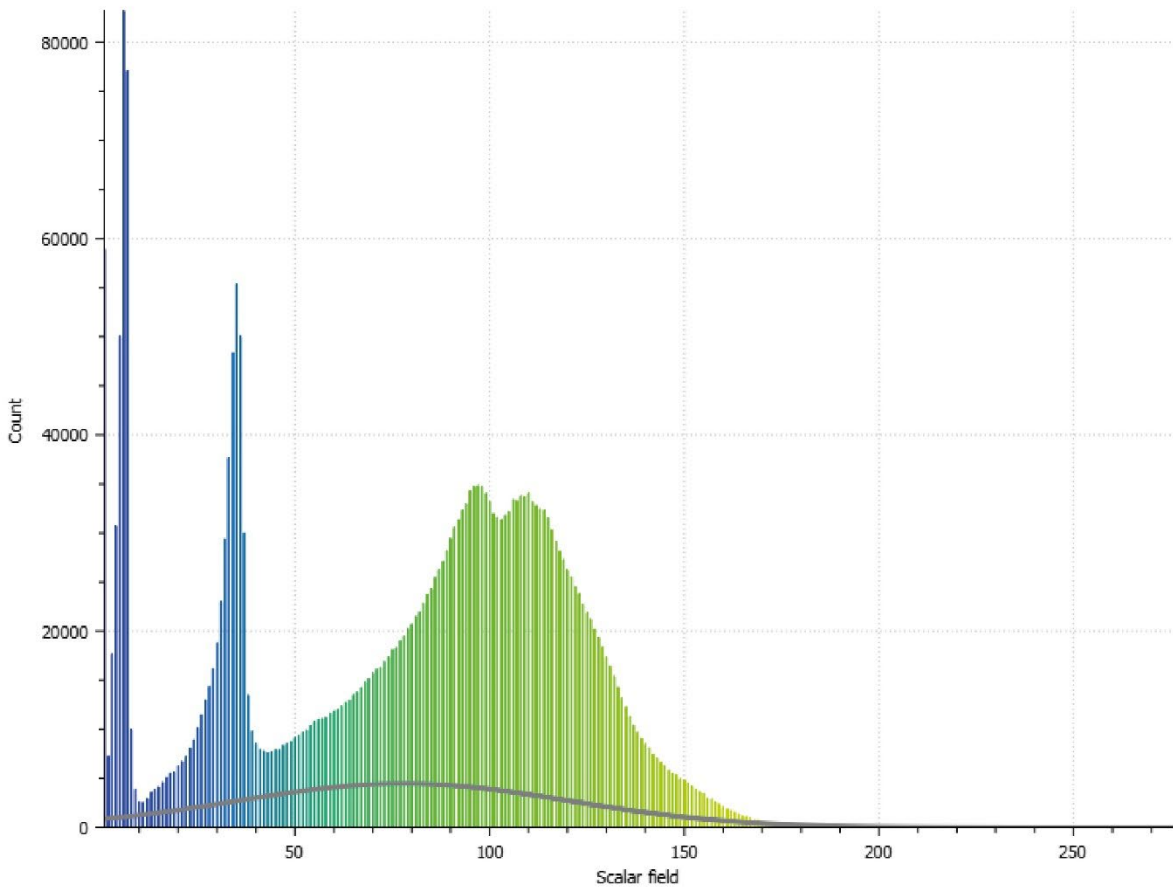


Figura 58 Grafici di distribuzione gaussiana di frequenza della densità a seguito del sotto campionamento per istanze. Partendo dall'alto: 3 classi, ArCHdataset, elementi architettonici, materiali.

Come possiamo vedere dalla tabella 59 questa nuova *feature* è estremamente più significativa e ci permette di ottenere dei risultati corretti a discapito come spiegheremo successivamente della replicabilità del metodo. Subito dopo per *feature importance* troviamo le coordinate in Z e le normali Nz.

	Feature importance									
	X	Y	Z	R	G	B	Nx	Ny	Nz	density
3 Class	0.0478	0.0251	0.1560	0.0233	0.0075	0.0032	0.0589	0.0125	0.1535	0.5121
ArCHdataset	0.0620	0.0718	0.1134	0.0287	0.0182	0.0092	0.0577	0.0167	0.1203	0.5019
Elementi architettonici	0.0555	0.0459	0.1879	0.0378	0.0467	0.0145	0.0599	0.0114	0.1504	0.3901
Materili	0.0690	0.1036	0.1096	0.0328	0.0222	0.0163	0.0319	0.0164	0.1181	0.4802

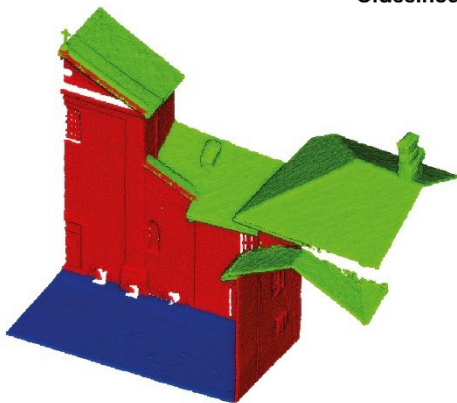
Figura 59 Features importance ricavati tramite algoritmo RF4PCC.

Attraverso l'uso di questa pre-elaborazione otteniamo dei risultati migliori rispetto alla soluzione precedente, tuttavia il modello addestrato ha perso la capacità di generalizzare e replicare quello che ha appreso e sarà in grado di operare su dataset che hanno subito lo stesso tipo di pre-elaborazione, altrimenti esso non sarà capace di segmentare nessuna nuvola di punti. Più in generale diciamo che l'algoritmo di apprendimento va in *over-fitting*, cioè esso ha appreso in maniera troppo rigida dal dataset di addestramento che non riesce più ad operare su altri contesti, a meno che essi non presentino le medesime *features*. In *over-fitting* perdiamo la capacità del modello addestrato di generalizzare e replicare ciò che ha appreso dal dato di *training* su nuovi dati incogniti. I sistemi di ML sono molto suscettibili a problemi di *over-fitting* che possono essere causati da differenti fattori: il numero di classi e la loro complessità, istanze non bilanciate e uniformemente distribuite tra loro, *features* troppo significative e non replicabili, la proporzione tra il dataset di addestramento e quello di test (Grilli, Farella Torresani, Remondino 2019).

Con l'aggiunta di questa nuova *feature* al caso studio si è riusciti ad ottenere un risultato di classificazione più coerente a discapito della replicabilità. Questo vuol dire che il modello addestrato ottenuto per la classificazione del sagrato e del prospetto della Chiesa Santi Pietro e Andrea potrà essere applicato solo su nuvole che hanno subito lo stesso tipo di elaborazione, altrimenti non funzionerà. Precisiamo quindi che tutto il dataset del sagrato riguardante l'abbazia della Novalesa è stato pre-elaborato nella stessa maniera e non solo le porzioni di *training* e di *evaluation*, altrimenti gli algoritmi RF non funzionerebbero.

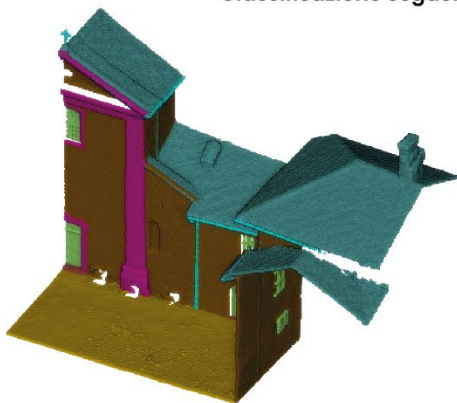
Avendo elaborato questa nuova *feature* il flusso di lavoro è il medesimo di quello fatto in precedenza: applicazione degli algoritmi RF per addestramento e il test, ottenimento e applicazione del modello addestrato sul sagrato della Chiesa dei Santi Pietro e Andrea. Le seguenti immagini della figura 60 illustrano i dataset di *training* pre-classificati manualmente per l'addestramento, riportando la percentuale d'incidenza di ogni classe sul totale dei punti.

Classificazione a 3 istanze



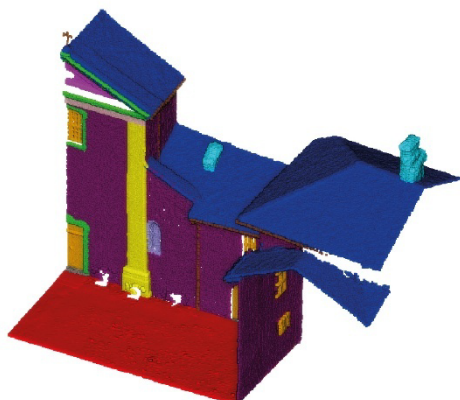
	Classi	pt	pt %
0	suolo	160'124	54.80%
1	coperture	82'473	28.22%
2	elementi verticali	49'615	16.98%

Classificazione seguendo l'esempio ArCHdataset



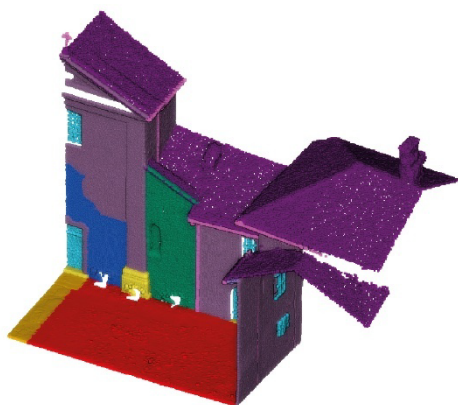
	Classi	pt	pt %
0	molding	228'091	34.84%
1	floor	208'249	31.81%
3	wall	138'514	21.16%
5	roof	53'751	8.21%
2	door window	22'600	3.45%
6	other	2'859	0.44%
4	stair	634	0.10%

Classificazione per caratteristiche architettoniche



	Classi	pt	pt %
0	terreno	584'991	82.42%
1	bucature infissi	44'773	6.31%
6	tetto	35'010	4.93%
9	muro	21'056	2.97%
2	lesene	13'703	1.93%
5	cornici	3'545	0.50%
3	trabeazione	2'032	0.29%
7	comignolo	1'675	0.24%
4	timpano	1'565	0.22%
10	grondaie pluviali	967	0.14%
8	monofora cieca	334	0.05%
11	scale	114	0.02%

Classificazione per materiali

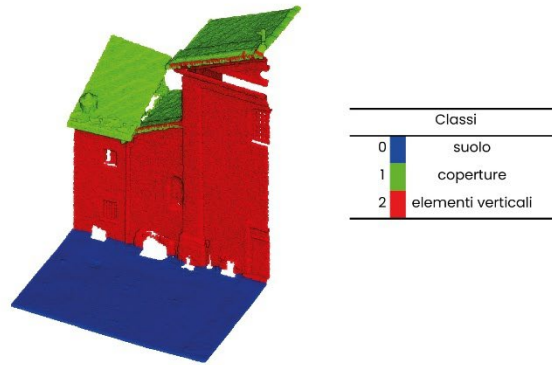


	Classi	pt	pt %
0	pietrisco	526'360	78.76%
4	intonaco	76'201	11.40%
1	selciato	18'968	2.84%
9	copertura in lose	17'657	2.64%
5	paramento murario in pietra	7'830	1.17%
3	grondaie pluviali in rame	7'151	1.07%
2	pietra da decoro	5'033	0.75%
6	affreschi	3'714	0.56%
7	infissi lignei	2'915	0.44%
8	puntoni lignei	2'518	0.38%

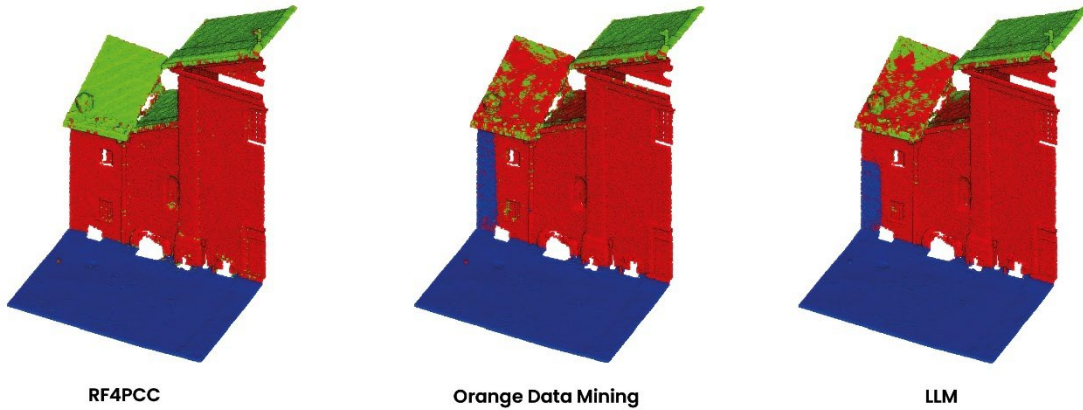
Figura 60 Distribuzione delle istanze del dataset di training partendo dall'alto: 3 classi, ArCHdataset, elementi architettonici, materiali.

Come è possibile visualizzare dai risultati riportati nell'immagine 61 i vari algoritmi RF restituiscono degli esiti nettamente migliori rispetto al tentativo di classificazione precedente. Le nuvole classificate mediante i vari algoritmi RF si avvicinano molto di più al dataset *ground truth*.

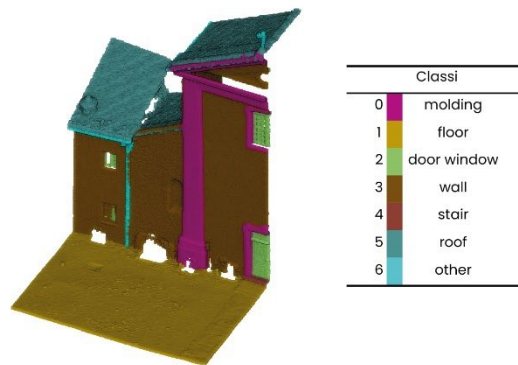
Classificazione manuale (Ground truth) a 3 istanze



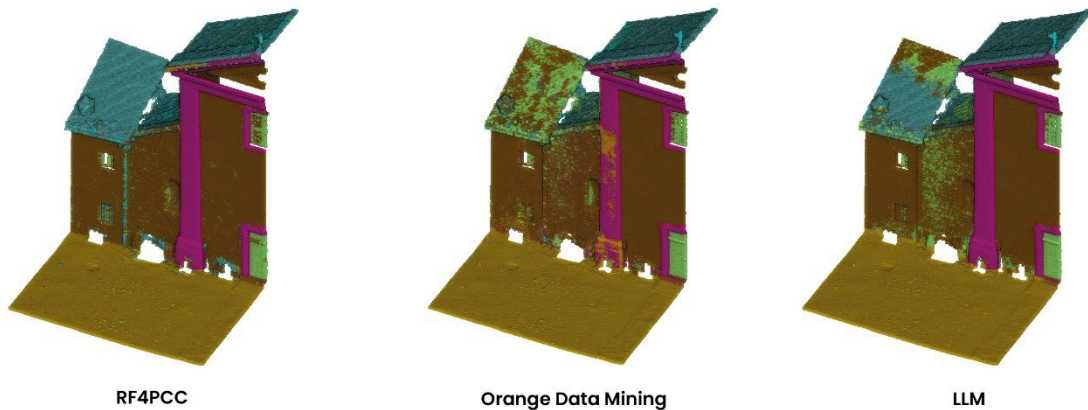
Classificazione tramite i tre algoritmi RF impiegati



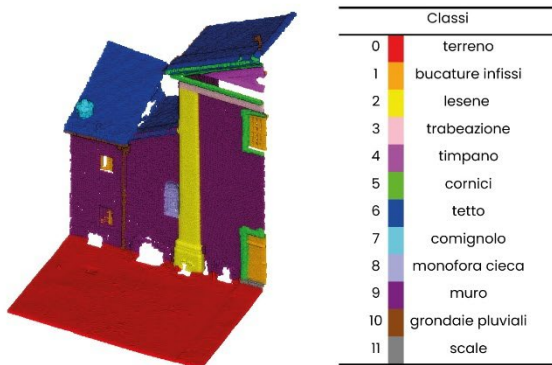
Classificazione manuale (Ground truth) istanze ArCHdataset



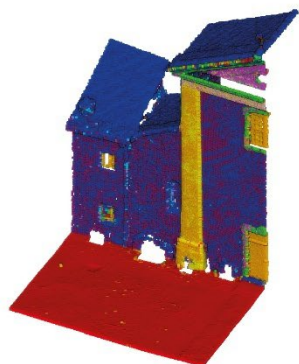
Classificazione tramite i tre algoritmi RF impiegati



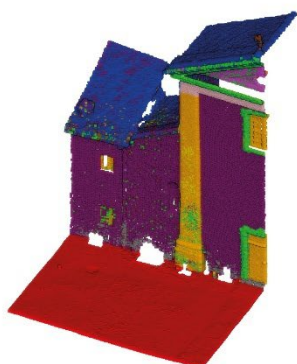
Classificazione manuale (Ground truth) istanze architettoniche



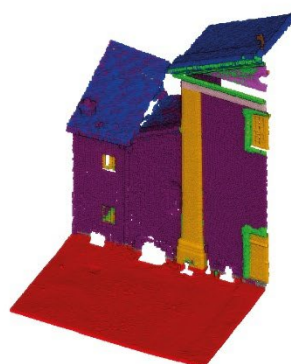
Classificazione tramite i tre algoritmi RF impiegati



RF4PCC

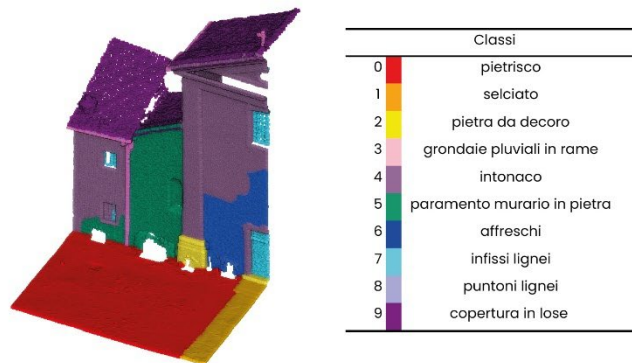


Orange Data Mining



LLM

Classificazione manuale (Ground truth) istanze materiali



Classificazione tramite i tre algoritmi RF impiegati

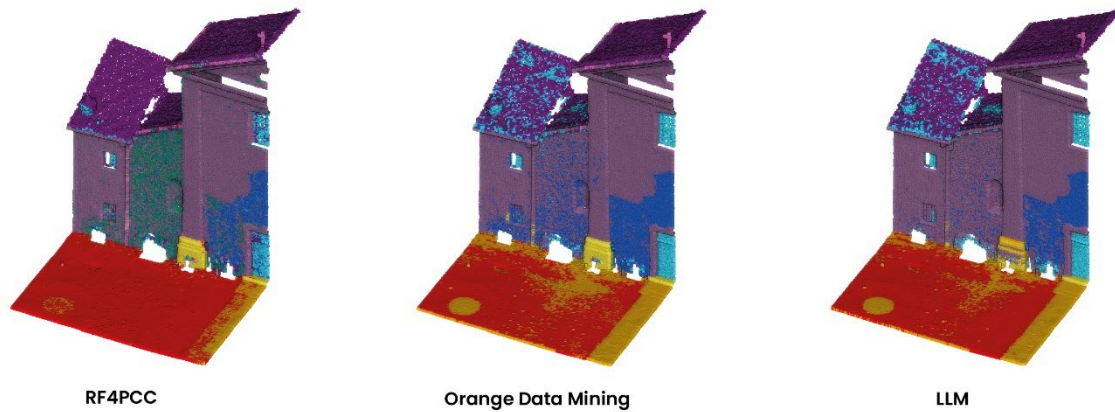
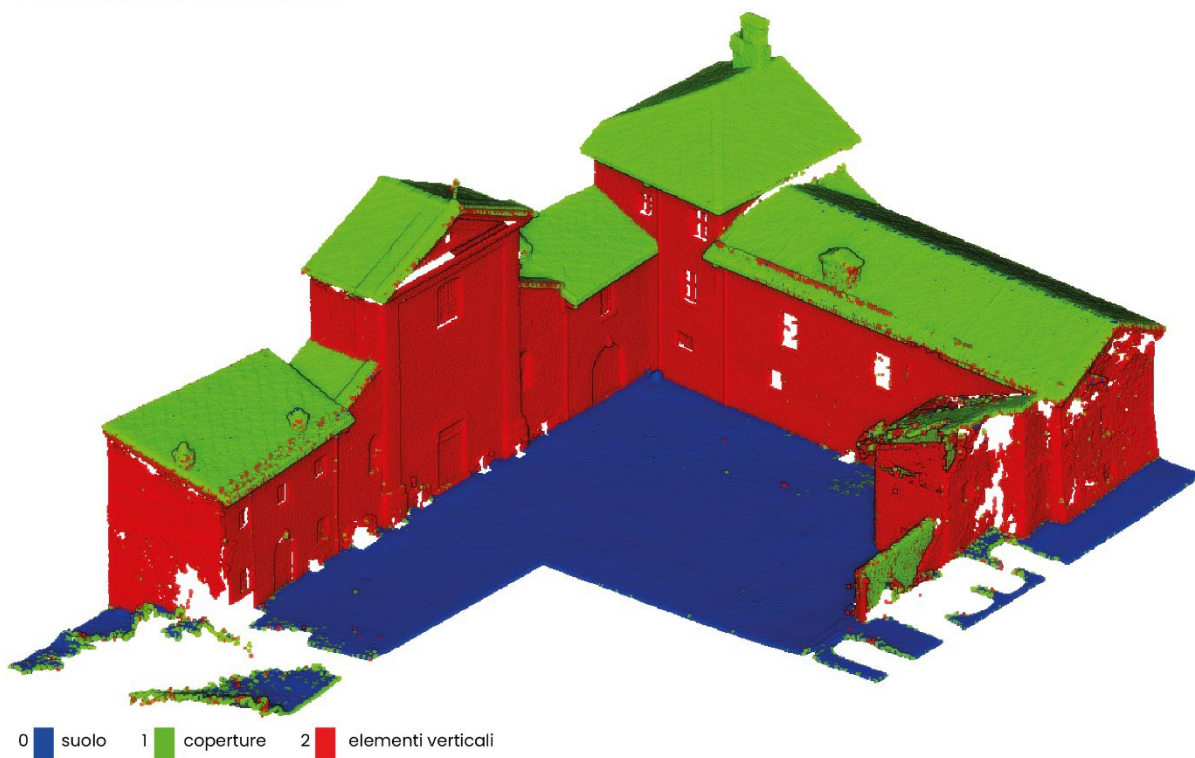


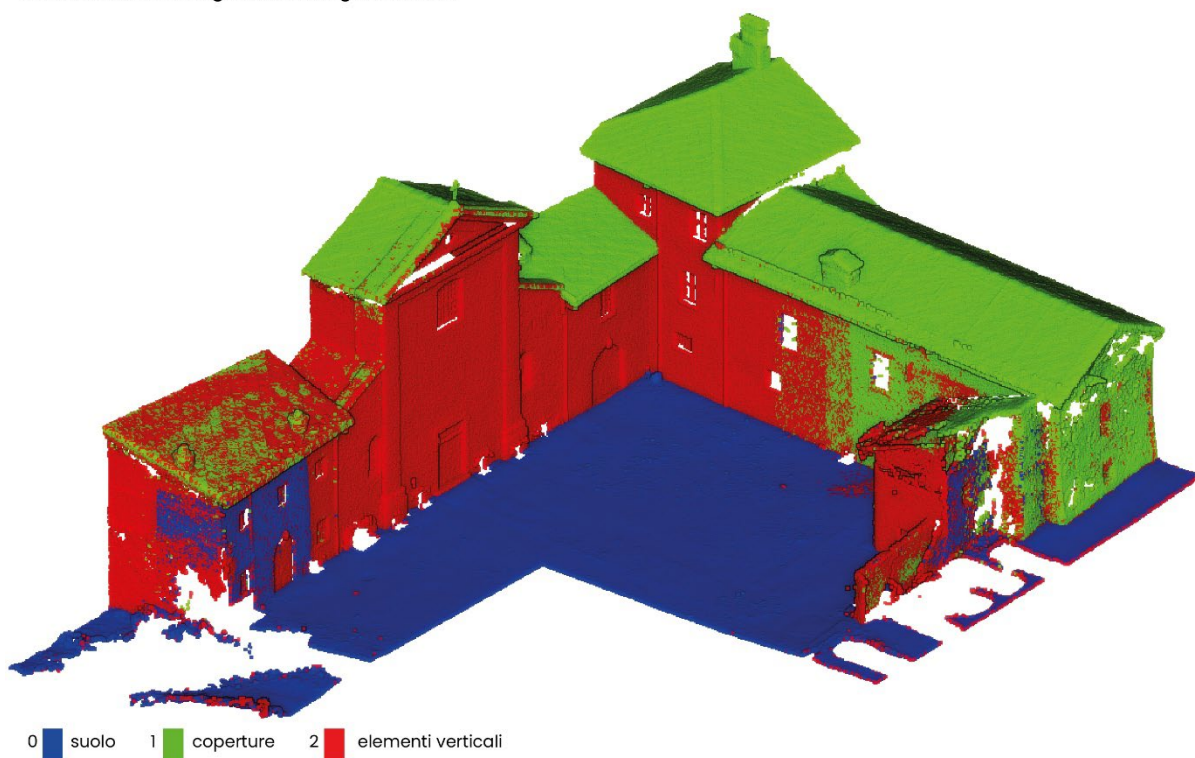
Figura 61 Le varie porzioni di test con le differenti prove di classificazione ottenute applicando i vari algoritmi Random Forest.

Nella figura 62 sono stati applicati i vari modelli addestrati ottenuti grazie agli algoritmi RF utilizzando sull'intero prospetto del sagrato. I risultati sono nettamente migliori rispetto alle soluzioni precedenti.

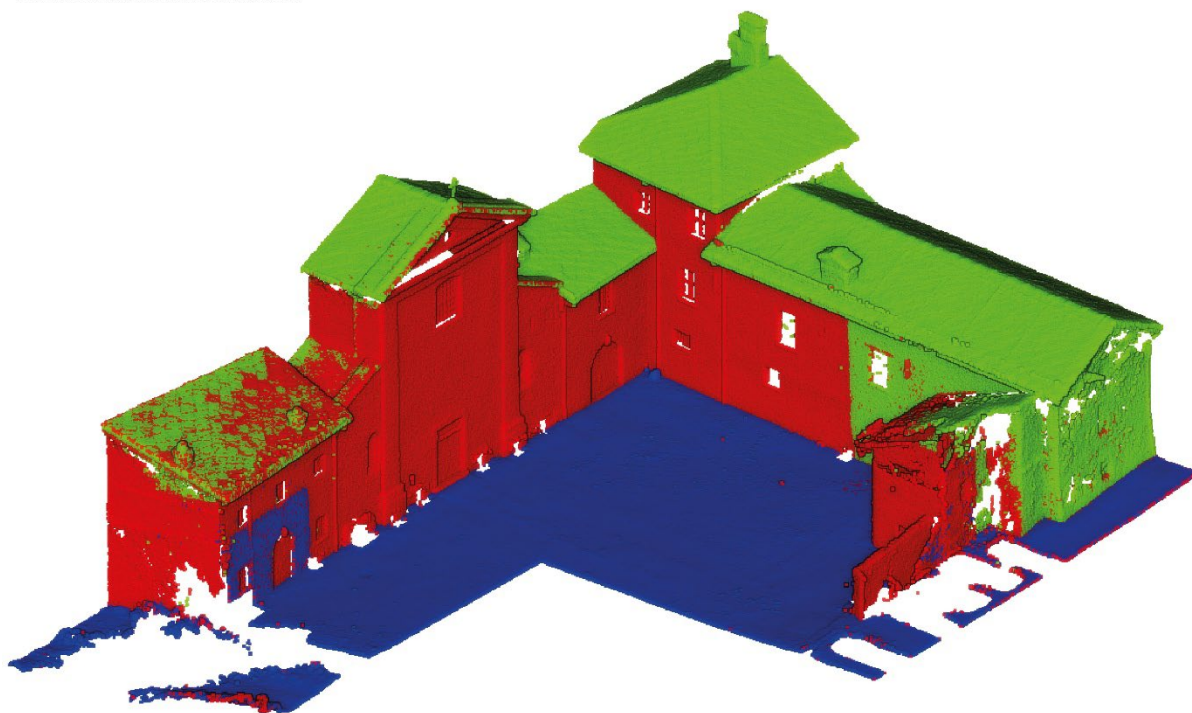
Classificazione RF4PCC a 3 istanze



Classificazione Orange Data Mining a 3 istanze

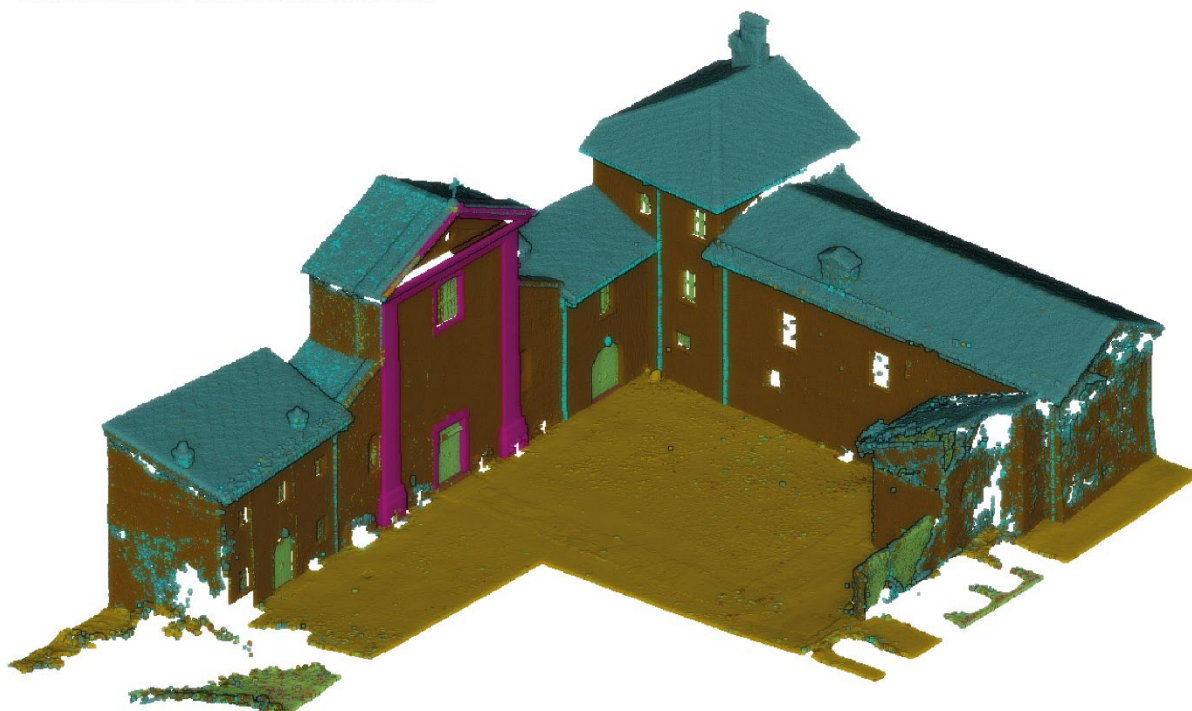


Classificazione LLM a 3 istanze



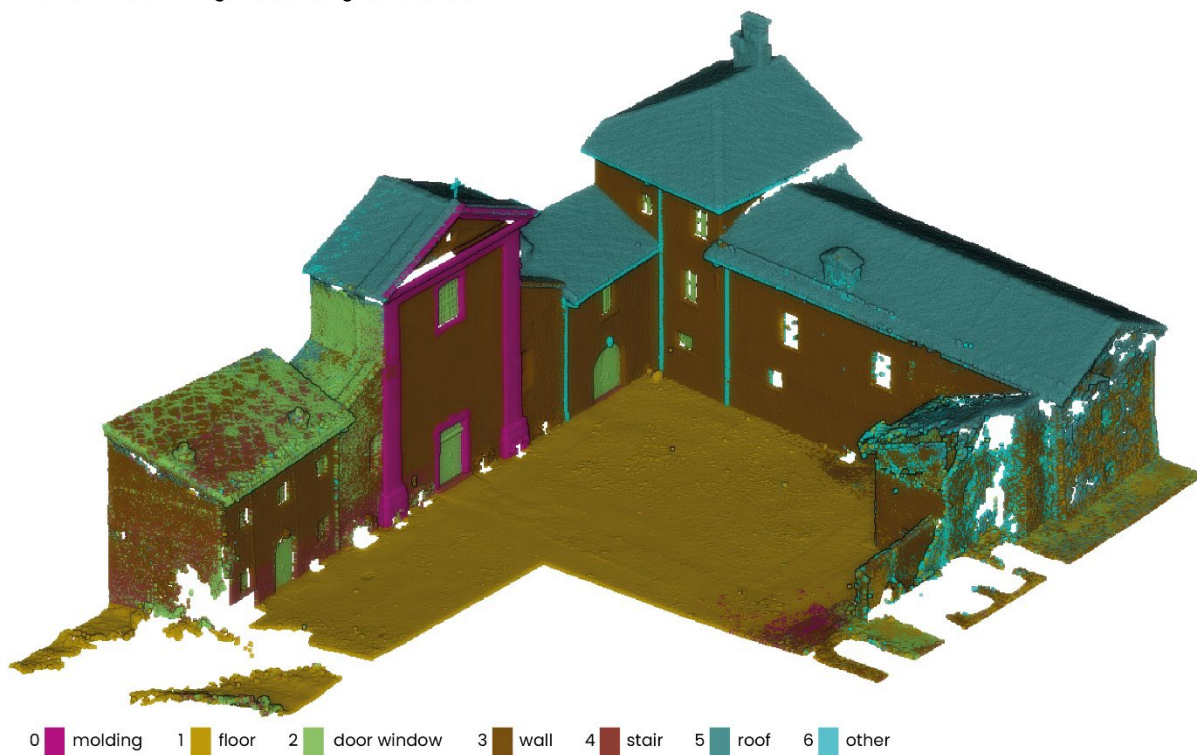
0  suolo 1  coperture 2  elementi verticali

Classificazione RF4PCC istanze ArCHdataset

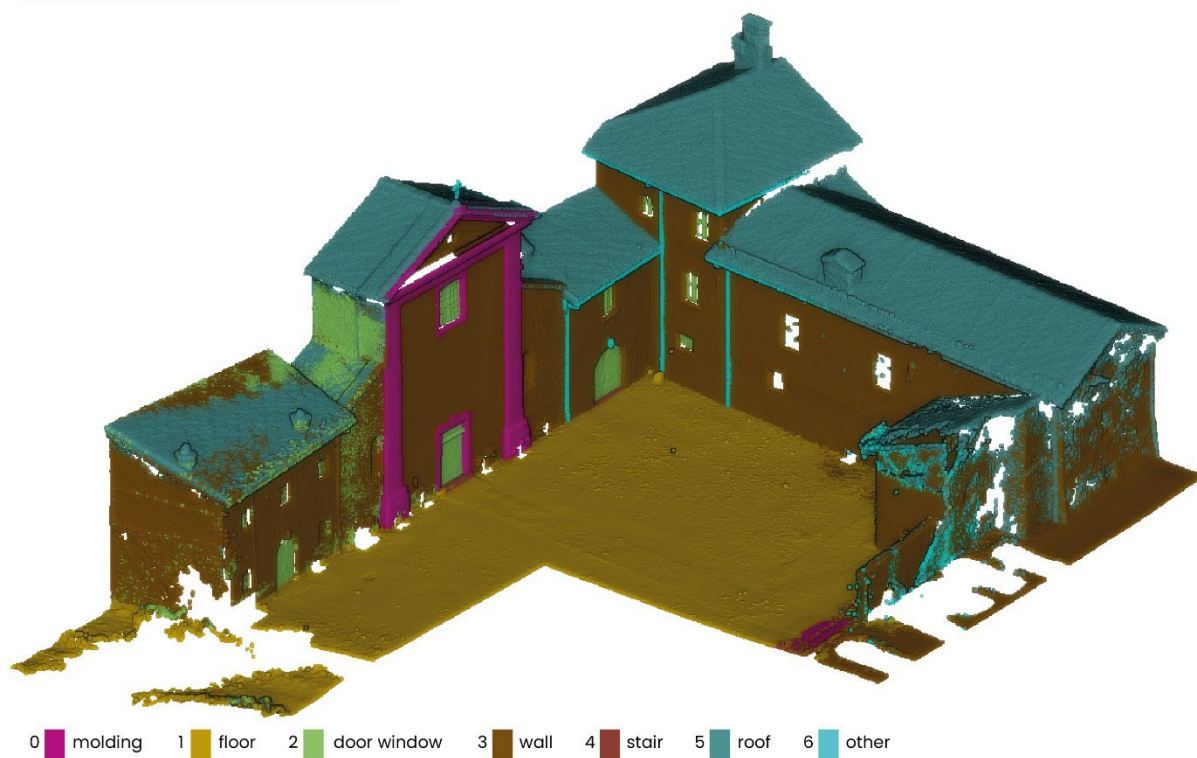


0  molding 1  floor 2  door window 3  wall 4  stair 5  roof 6  other

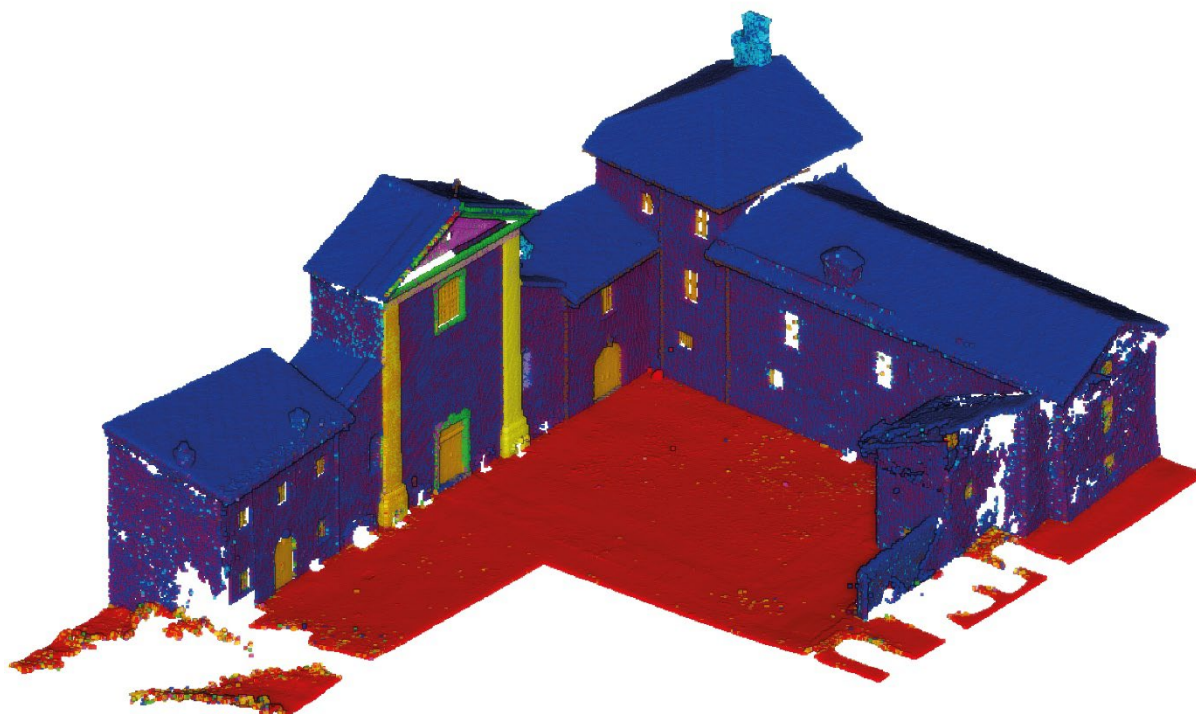
Classificazione Orange Data Mining istanze ArCHdataset



Classificazione LLM istanze ArCHdataset

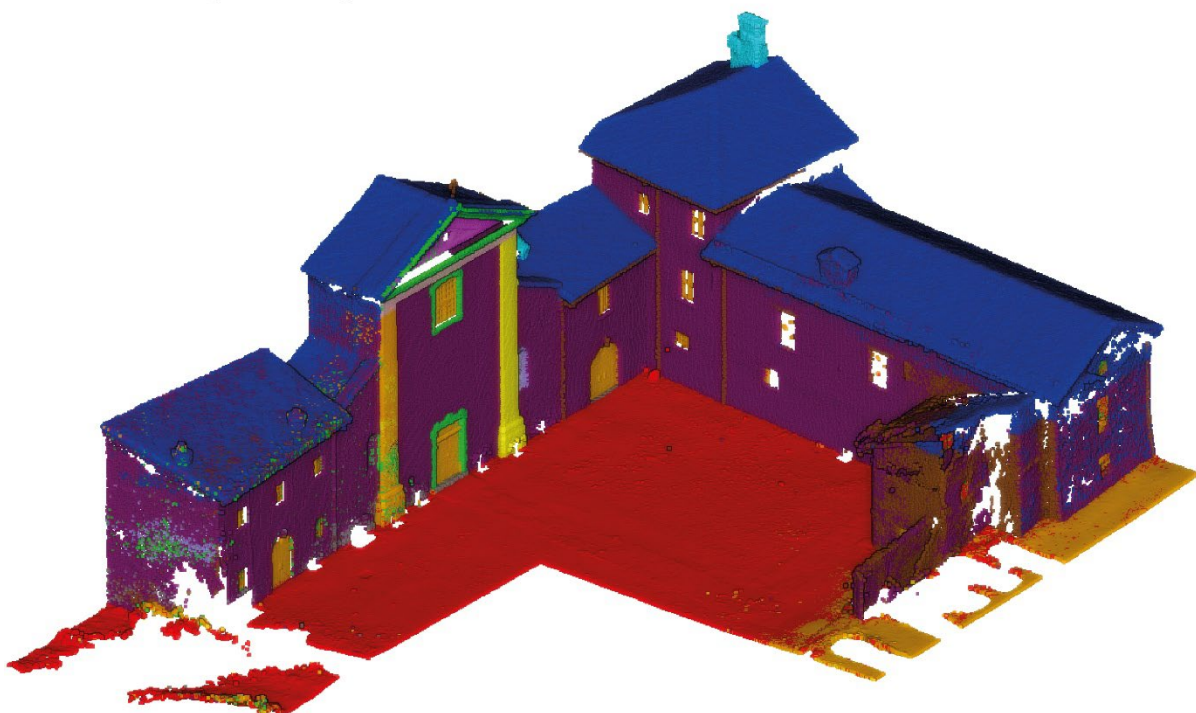


Classificazione RF4PCC istanze architettoniche



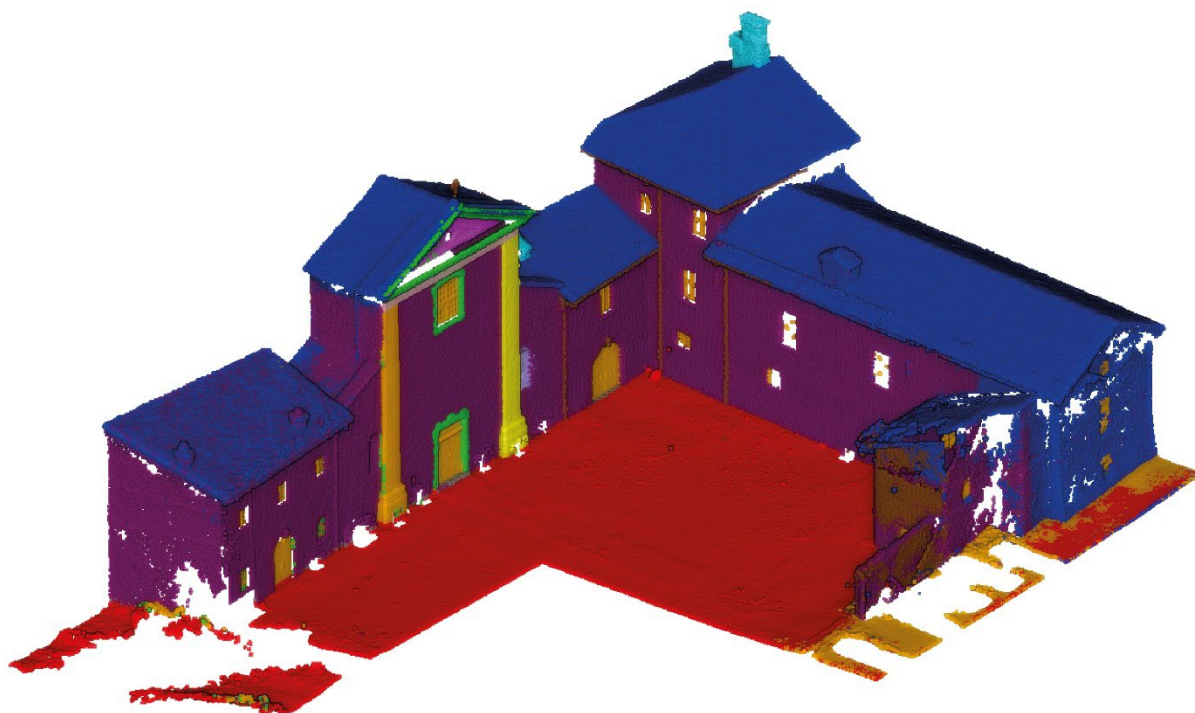
- | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|---|------------------|----|-------------------|----|-------------|---|---------|---|---------|---|-------|---|------------|
| 0 | terreno | 1 | bucature infissi | 2 | lesene | 3 | trabeazione | 4 | timpano | 5 | cornici | 6 | tetto | 7 | cornignolo |
| 8 | monofora cieca | 9 | muro | 10 | grondaie pluviali | 11 | scale | | | | | | | | |

Classificazione Orange Data Mining istanze architettoniche



- | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|---|------------------|----|-------------------|----|-------------|---|---------|---|---------|---|-------|---|------------|
| 0 | terreno | 1 | bucature infissi | 2 | lesene | 3 | trabeazione | 4 | timpano | 5 | cornici | 6 | tetto | 7 | cornignolo |
| 8 | monofora cieca | 9 | muro | 10 | grondaie pluviali | 11 | scale | | | | | | | | |

Classificazione LLM istanze architettoniche



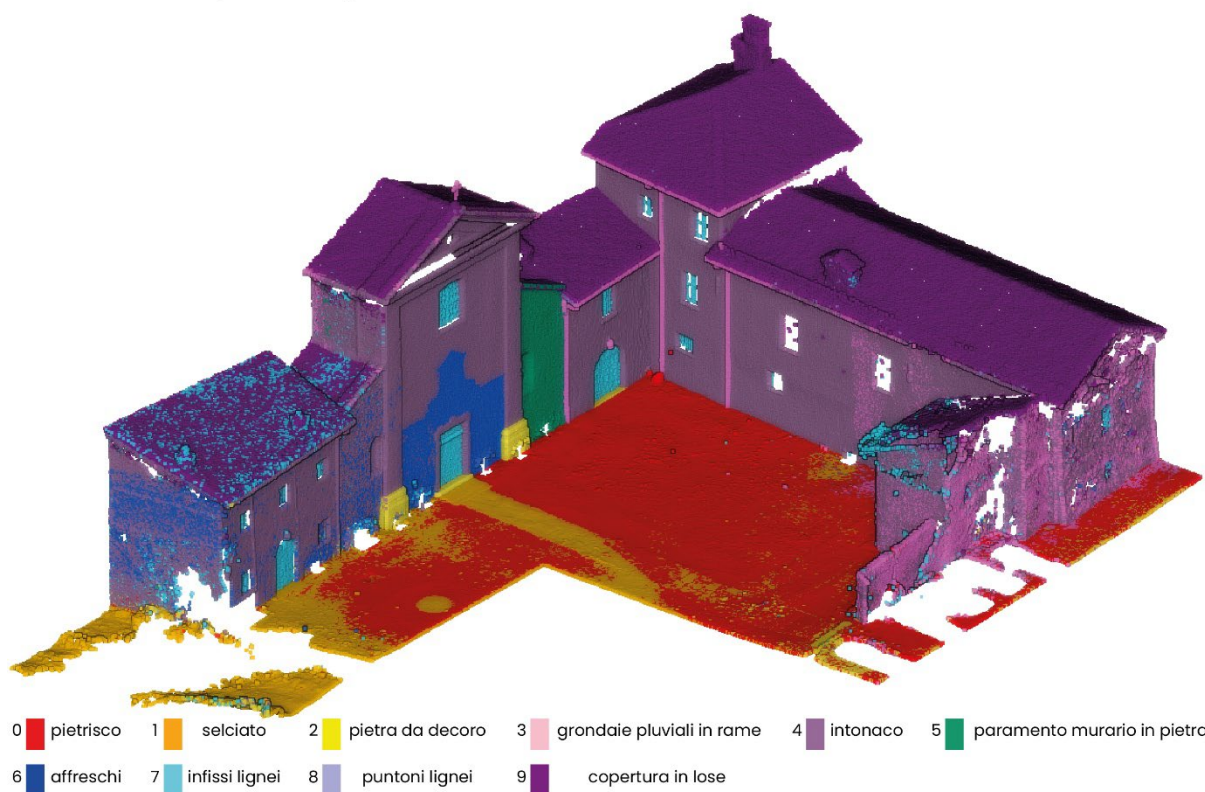
- | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|---|------------------|----|-------------------|----|-------------|---|---------|---|---------|---|-------|---|------------|
| 0 | terreno | 1 | bucature infissi | 2 | lesene | 3 | trabeazione | 4 | timpano | 5 | cornici | 6 | tetto | 7 | cornignolo |
| 8 | monofora cieca | 9 | muro | 10 | grondaie pluviali | 11 | scale | | | | | | | | |

Classificazione RF4PCC istanze materiali



- | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|---|----------------|---|------------------|---|---------------------------|---|----------|---|-----------------------------|
| 0 | pietrisco | 1 | selciato | 2 | pietra da decoro | 3 | grondaie pluviali in rame | 4 | intonaco | 5 | paramento murario in pietra |
| 6 | affreschi | 7 | infissi lignei | 8 | puntoni lignei | 9 | copertura in lose | | | | |

Classificazione Orange Data Mining istanze materiali



Classificazione LLM istanze materiali

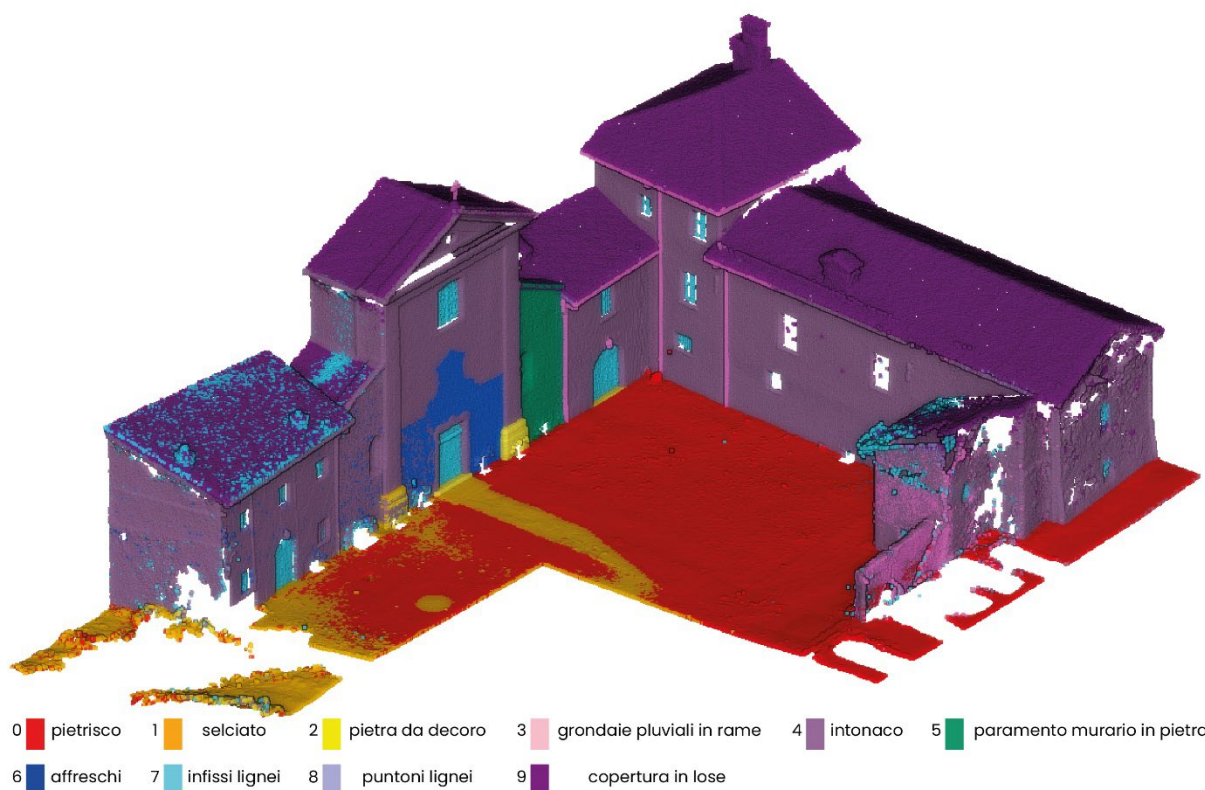


Figura 62 Applicazione del modello addestrato sull'intero dataset per i vari test di classificazione.

4.5 Metriche per la valutazione

Per valutare le prestazioni dei vari algoritmi impiegati oltre ad apprezzare in maniera qualitativa attraverso il controllo visivo, utilizzeremo una serie di metriche ACC (*Accuracy*), Prec. (*Precision*), TPR (*Recall*), F1 (*F1-score*), TNR (*Specificity*), ER (*Error rate*), CF (*Class frequency*) come successivamente illustrato, utili alla comprensione del modello addestrato partendo dalla matrice di confusione. Quest'ultima ci permette di porre in relazione la predizione fatta dal modello addestrato con il *ground truth* (si tratta del medesimo dataset predetto dal modello, ma le istanze assegnate sono corrette e certe). La matrice di confusione è una matrice quadrata dove effettuiamo il conteggio dei veri positivi e negativi e dei falsi positivi e negativi confrontando le predizioni con il *ground truth* da cui è possibile calcolare le altre metriche per la valutazione del modello addestrato.

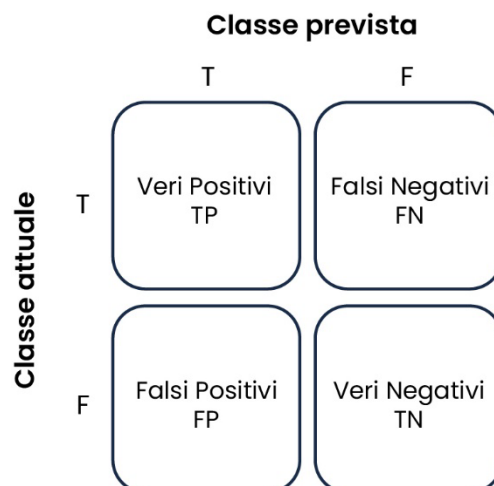


Figura 63 Esempio di una matrice di confusione generica (Alfio, Pepe, Costantino 2024).

Di seguito vengono riportate le formule generali per il calcolo delle metriche applicandole ad ogni algoritmo di apprendimento impiegato potendo confrontare le previsioni delle varie istanze.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

ACC (*Accuracy*): rappresenta la proporzione di predizioni corrette sul totale del dataset. È una misura generale di *performance*, ma può risultare fuorviante in caso di dataset sbilanciati.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP}$$

Prec. (*Precision*): misura quanto sono affidabili le predizioni positive effettuate dal modello. Indica la proporzione di istanze che sono realmente positive tra tutte quelle che il modello ha classificato come positive. Questa metrica è particolarmente utile nei casi in cui è importante ridurre al minimo il numero di falsi positivi.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

TPR (*Recall*): valuta la capacità del modello di identificare correttamente tutte le istanze positive, ignorando quelle non rilevate. È importante nei casi in cui è cruciale ridurre i falsi negativi.

$$\text{F1 - score} = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

F1 (*F1-score*): rappresenta la media armonica tra *Precision* e *Recall*, bilanciando le due metriche. È particolarmente utile in scenari dove esiste uno squilibrio tra le classi.

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN + FP}$$

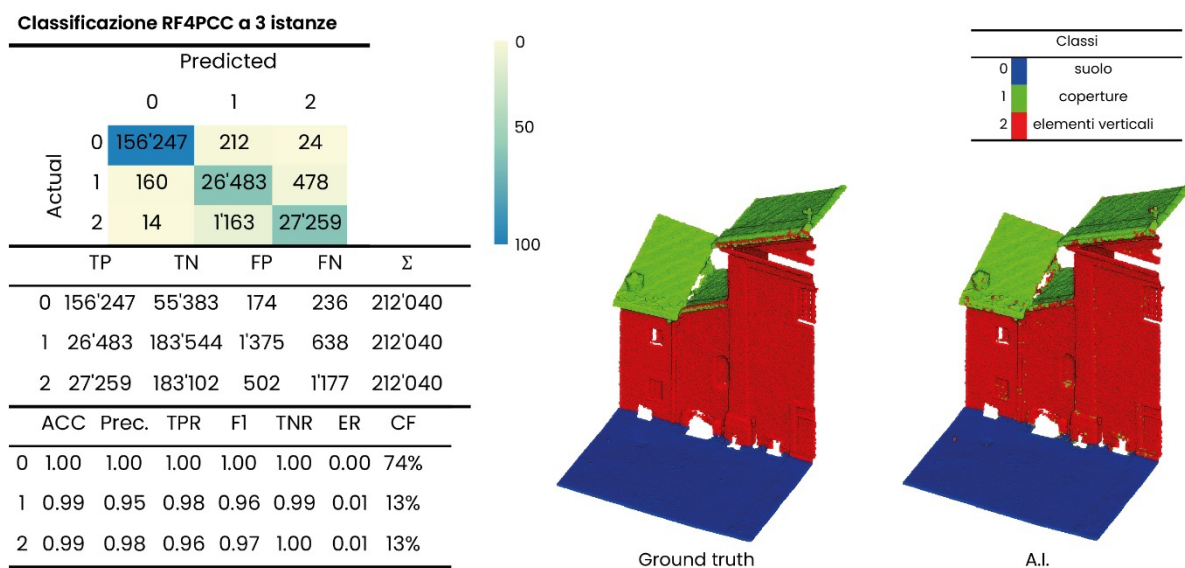
TNR (*Specificity*): misura la capacità del modello di identificare correttamente le istanze negative, ed è utile nei contesti in cui è importante ridurre i falsi positivi.

$$\text{Error Rate} = \frac{FP + FN}{TP + TN + FP + FN} = 1 - \text{Accuracy}$$

ER (*Error Rate*): misura la percentuale di predizioni sbagliate fatte dal modello rispetto al totale delle istanze analizzate. È una metrica che indica quanto spesso il modello commette errori nelle sue predizioni. Poiché è complementare all'*Accuracy*, l'*Error Rate* può essere calcolato come $1 - \text{Accuracy}$ (Alfio, Pepe, Costantino 2024).

- 4.5.1 Metriche di valutazione delle nuvole del sagrato dell'abbazia della Novalesa a scala architettonica

Di seguito riportiamo per ogni algoritmo RF e per ogni classificazione su cui è stato applicato la matrice di confusione e le altre metriche precedentemente spiegate. Riassumendo più in generale possiamo affermare che il modello RF4PCC si comporta complessivamente meglio al variare delle numerosità delle classi, dimostrando una maggiore capacità di adattarsi a dataset sbilanciati e mantenendo elevate prestazioni su tutte le classi. L'algoritmo ottenuto con LLM è competitivo per le classi frequenti, ma soffre per quelle meno rappresentate. Orange Data Mining risulta il meno efficace fra i tre per problemi di classificazione con distribuzione delle istanze squilibrate, come dimostrato dal calo delle metriche per le classi minoritarie. È importante sottolineare che i risultati ottenuti sono molto positivi considerando che il dataset presenta una forte disomogeneità nella distribuzione delle classi. Ciò come vedremo nelle metriche riportate di seguito ha influito sui risultati ottenuti.

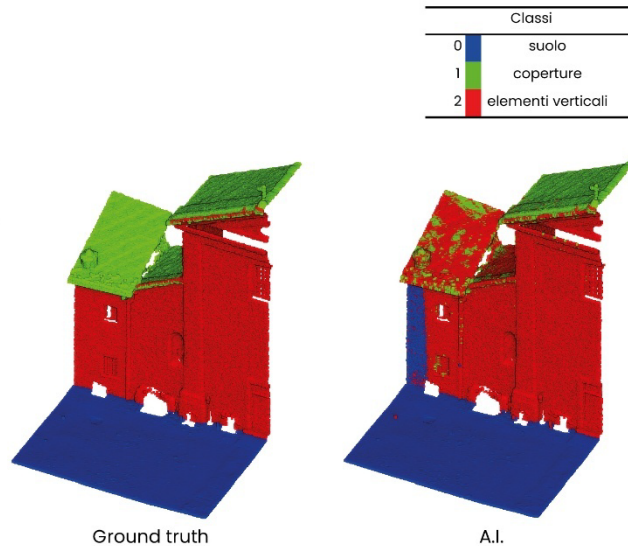


Per la classificazione a 3 istanze mediante RF4PCC il modello dimostra una *accuracy* molto alta (1.00 per la classe 0 e 0.99 per le classi 1 e 2) esso è il migliore tra i tre RF. La classe 0 è quella con le *performance* più alte, con *precision*, *recall* e *F1 score* pari a 1.00, indicando che il modello la identifica perfettamente. Le classi 1 e 2 hanno *performance* leggermente inferiori, con *precision* e *recall* più bassi (0.95-0.98), suggerendo che il modello commette qualche errore nel distinguerle, probabilmente a causa della loro minore frequenza nel

dataset (13% ciascuna). Nonostante ciò, le metriche rimangono molto buone, dimostrando che il modello è robusto anche per le classi meno rappresentate.

Classificazione Orange Data Mining a 3 istanze

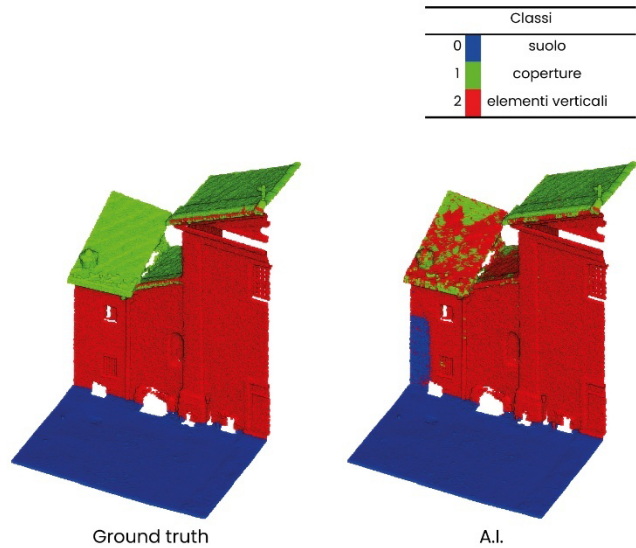
		Predicted			Σ			
		0	1	2				
Actual	0	156'440	0	43				
	1	0	16'446	10'675				
	2	1'281	554	26'601				
		TP	TN	FP	FN	Σ		
0		156'440	54'276	1'281	43	212'040		
1		16'446	184'365	554	10'675	212'040		
2		26'601	172'886	10'718	1'835	212'040		
		ACC	Prec.	TPR	F1	TNR	ER	CF
0		0.99	0.99	1.00	1.00	0.98	0.01	74%
1		0.95	0.97	0.61	0.75	1.00	0.05	13%
2		0.94	0.71	0.94	0.81	0.94	0.06	13%



Il software Orange Data Mining mostra performance solide, ma con differenze significative. Dei tre algoritmi RF è quello che dà esiti meno soddisfacenti. La classe 0 continua ad essere la migliore, con *precision*, *recall* e *F1 score* vicini a 1.00. La classe 2 ha un buon *recall* (0.94), ma una *precision* più bassa (0.71), indicando che il modello tende a classificare erroneamente alcuni punti. La classe 1 ha il *recall* più basso (0.61), suggerendo difficoltà nel riconoscere correttamente le sue istanze, probabilmente a causa della sovrapposizione con la classe 2. Nonostante ciò, l'*accuracy* complessiva rimane alta (0.99 per la classe 0 e 0.95-0.94 per le altre), dimostrando che il modello è ancora affidabile, ma con margini di miglioramento per le classi meno rappresentate.

Classificazione LLM a 3 istanze

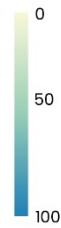
		Predicted						
		0	1	2				
Actual	0	156'454	0	29				
	1	0	18'249	8'872				
	2	959	291	27'186				
		TP	TN	FP	FN	Σ		
0		156'454	54'598	959	29	212'040		
1		18'249	184'628	291	8'872	212'040		
2		27'186	174'703	8'901	1'250	212'040		
		ACC	Prec.	TPR	F1	TNR	ER	CF
0		1.00	0.99	1.00	1.00	0.98	0.00	74%
1		0.96	0.98	0.67	0.80	1.00	0.04	13%
2		0.95	0.75	0.96	0.84	0.95	0.05	13%



L'algoritmo RF ottenuto con LLM performa molto bene per la classe 0, con *precision*, *recall* e *F1 score* vicini a 1.00. La classe 2 ha un *recall* elevato (0.96), ma una *precision* più bassa (0.75), indicando che il modello tende a classificare erroneamente alcune istanze come classe 2. La classe 1 ha un *recall* più basso (0.67), suggerendo difficoltà nel riconoscere correttamente le sue istanze, probabilmente a causa della sovrapposizione con la classe 2. Nonostante ciò, l'*accuracy* complessiva rimane alta (1.00 per la classe 0 e 0.96–0.95 per le altre), dimostrando che il modello è affidabile, ma con margini di miglioramento.

Classificazione RF4PCC istanze ArCHdataset

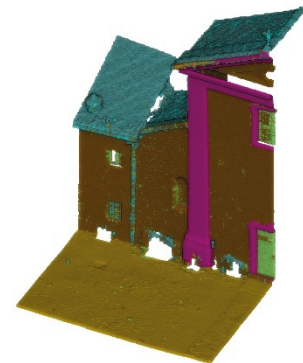
		Predicted							
		0	1	2	3	4	5	6	
Actual	0	273'655	760	357	806	0	695	1	
	1	118	198'714	378	261	14	69	4	
	2	560	331	7'790	1'885	9	107	15	
	3	936	229	2'811	66'154	37	1'327	66	
	4	4	34	7	131	98	9	2	
	5	196	83	152	446	19	15'232	1'407	
	6	1	9	36	285	2	905	111	
		TP	TN	FP	FN	Σ			
		0	273'655	299'169	1'815	2'619	577'258		
		1	198'714	376'254	1'446	844	577'258		
		2	7'790	562'820	3'741	2'907	577'258		
		3	66'154	501'884	3'814	5'406	577'258		
		4	98	576'892	81	187	577'258		
		5	15'232	556'611	3'112	2'303	577'258		
		6	111	574'414	1'495	1'238	577'258		
		ACC	Prec.	TPR	F1	TNR	ER	CF	
		0	0.99	0.99	0.99	0.99	0.01	48%	
		1	1.00	0.99	1.00	0.99	0.00	35%	
		2	0.99	0.68	0.73	0.70	0.99	2%	
		3	0.98	0.95	0.92	0.93	0.99	12%	
		4	1.00	0.55	0.34	0.42	1.00	0%	
		5	0.99	0.83	0.87	0.85	0.99	3%	
		6	1.00	0.07	0.08	0.08	1.00	0%	



Classi	
0	molding
1	floor
2	door window
3	wall
4	stair
5	roof
6	other



Ground truth

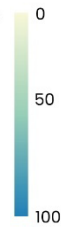


A.I.

Per la classificazione ottenuta seguendo le istanze ArCHdataset il modello RF4PCC mostra *performance* eccellenti per le classi 0 e 1, con *precision*, *recall* e *F1 score* vicini a 1.00. La classe 3 ha anche buone *performance*, con un *F1 score* di 0.93, grazie a una *precision* e *recall* bilanciate. Le classi 2 e 5 hanno *performance* accettabili, ma con *precision* e *recall* più basse (0.68-0.83), suggerendo qualche difficoltà nel distinguerle correttamente. Le classi 4 e 6 sono le più critiche, con *recall* molto bassi (0.34 e 0.08 rispettivamente), indicando che l'algoritmo d'intelligenza artificiale fatica a riconoscerle, probabilmente a causa della loro scarsa rappresentazione nel dataset (0% e 0% di class frequency). Nonostante ciò, l'*accuracy* complessiva rimane alta, dimostrando che il modello è affidabile per le classi maggioritarie, ma richiede miglioramenti per quelle meno rappresentate.

Classificazione Orange Data Mining istanze ArCHdataset

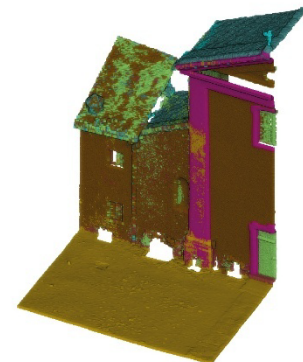
		Predicted						
		0	1	2	3	4	5	6
Actual	0	244'915	29'658	384	1'212	21	84	0
	1	7	199'514	4	11	22	0	0
	2	681	83	8'578	1'001	302	50	2
	3	1'207	1'332	10'335	53'607	4'282	774	23
	4	3	11	6	2	263	0	0
	5	276	29	4'085	2'740	198	9'736	471
	6	2	22	283	313	142	434	153
		TP	TN	FP	FN	Σ		
0		244'915	298'808	2'176	31'359	577'258		
1		199'514	346'565	31'135	44	577'258		
2		8'578	551'464	15'097	2'119	577'258		
3		53'607	500'419	5'279	17'953	577'258		
4		263	572'006	4'967	22	577'258		
5		9'736	558'381	1'342	7'799	577'258		
6		153	575'413	496	1'196	577'258		
		ACC	Prec.	TPR	FI	TNR	ER	CF
0		0.94	0.99	0.89	0.94	0.99	0.06	48%
1		0.95	0.87	1.00	0.93	0.92	0.05	35%
2		0.97	0.36	0.80	0.50	0.97	0.03	2%
3		0.96	0.91	0.75	0.82	0.99	0.04	12%
4		0.99	0.05	0.92	0.10	0.99	0.01	0%
5		0.98	0.88	0.56	0.68	1.00	0.02	3%
6		1.00	0.24	0.11	0.15	1.00	0.00	0%



Classi	
0	molding
1	floor
2	door window
3	wall
4	stair
5	roof
6	other



Ground truth

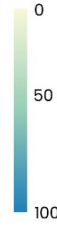


A.I.

Il software *Orange Data Mining* performa molto bene per le classi 0 e 1, con *precision* e *recall* elevati (0.99 e 1.00 rispettivamente per la classe 1), indicando un'identificazione affidabile. La classe 3 ha buone *performance*, con un *FI* score di 0.82, grazie a una *precision* e *recall* simili. Le classi 2 e 5 mostrano alcune difficoltà, con *precision* e *recall* più bassi (0.36 e 0.88 per la classe 2, 0.56 e 0.88 per la classe 5), suggerendo che il l'algoritmo RF fatica a distinguerle correttamente. Le classi 4 e 6 sono le più critiche, con *recall* molto basse (0.92 e 0.11 rispettivamente) e *precision* estremamente bassa per la classe 4 (0.05), indicando che il modello ha serie difficoltà nel riconoscere queste classi, a causa della loro scarsa frequenza nel dataset (0% di class frequency). Tuttavia, l'*accuracy* complessiva rimane alta per le classi maggioritarie.

Classificazione LLM istanze ArCHdataset

Actuali	Predicted						
	0	1	2	3	4	5	6
0	273'786	1'145	162	1'172	0	9	0
1	0	199'553	0	4	1	0	0
2	275	5	8'809	1'603	1	4	0
3	784	1'341	13'776	54'969	13	677	0
4	4	89	2	1	189	0	0
5	223	0	2'681	1'269	0	13'361	1
6	2	24	221	444	0	628	30



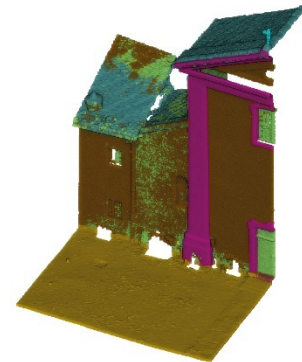
Classi	
0	molding
1	floor
2	door window
3	wall
4	stair
5	roof
6	other

	TP	TN	FP	FN	Σ
0	273'786	299'696	1'288	2'488	577'258
1	199'553	375'096	2'604	5	577'258
2	8'809	549'719	16'842	1'888	577'258
3	54'969	501'205	4'493	16'591	577'258
4	189	576'958	15	96	577'258
5	13'361	558'405	1'318	4'174	577'258
6	30	575'908	1	1'319	577'258

	ACC	Prec.	TPR	F1	TNR	ER	CF
0	0.99	1.00	0.99	0.99	1.00	0.01	48%
1	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	0.00	35%
2	0.97	0.34	0.82	0.48	0.97	0.03	2%
3	0.96	0.92	0.77	0.84	0.99	0.04	12%
4	1.00	0.93	0.66	0.77	1.00	0.00	0%
5	0.99	0.91	0.76	0.83	1.00	0.01	3%
6	1.00	0.97	0.02	0.04	1.00	0.00	0%



Ground truth

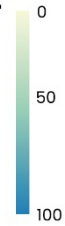


A.I.

L'algoritmo RF ottenuto con LLM performa in maniera eccellente per le classi 0 e 1, con *precision*, *recall* e *F1 score* vicini a 1.00, con una predizione quasi perfetta. La classe 3 ha anche buone *performance*, con un *F1 score* di 0.84, grazie a una *precision* e *recall* bilanciate. Le classi 2 e 5 mostrano alcune difficoltà, con *precision* e *recall* più bassi (0.34 e 0.82 per la classe 2, 0.76 e 0.91 per la classe 5). La classe 4 ha un *recall* basso (0.66), ma una *precision* alta (0.93), indicando che l'algoritmo RF è selettivo ma non sempre riesce a identificare tutte le istanze. La classe 6 è la più critica, con un *recall* molto basso (0.02), indicando che il sistema addestrato ha serie difficoltà nel riconoscerla, (0% di class frequency). Nonostante ciò, l'*accuracy* complessiva rimane alta per le classi maggioritarie sottoperformando per le classi con *class frequency* bassa.

Classificazione RF4PCC istanze architettoniche

		Predicted											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Actual	0	592'917	1'036	43	12	13	11	3	0	0	2	0	1
	1	533	18'239	1'013	26	36	53	3	0	0	10	0	0
	2	138	10'282	7'426	75	57	31	3	1	0	11	1	2
	3	0	14	521	1'437	181	56	0	0	0	3	0	0
	4	2	21	38	258	983	238	0	0	0	13	0	0
	5	33	146	176	82	455	2'601	18	0	6	97	1	1
	6	10	1	3	0	1	11	11'459	86	20	295	49	7
	7	0	0	0	0	0	0	134	28	0	27	6	0
	8	1	0	0	1	5	17	244	20	32	124	11	0
	9	22	53	61	25	25	79	4'110	247	41	5'858	42	3
	10	0	1	0	0	0	1	270	34	7	90	14	1
	11	8	3	5	0	0	0	24	0	0	3	0	12



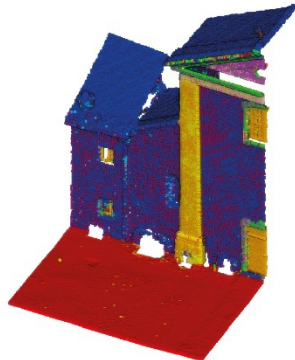
Classi	
0	terreno
1	bucature infissi
2	lesene
3	trabeazione
4	timpano
5	cornici
6	tetto
7	comignolo
8	monofora cieca
9	muro
10	grondaie pluviali
11	scale

	TP	TN	FP	FN	Σ
0	592'917	68'205	747	1'121	662'990
1	18'239	631'520	11'557	1'674	662'990
2	7'426	643'103	1'860	10'601	662'990
3	1'437	660'299	479	775	662'990
4	983	660'664	773	570	662'990
5	2'601	658'877	497	1'015	662'990
6	11'459	646'239	4'809	483	662'990
7	28	662'407	388	167	662'990
8	32	662'461	74	423	662'990
9	5'858	651'749	675	4'708	662'990
10	14	662'462	110	404	662'990
11	12	662'920	15	43	662'990



Ground truth

	ACC	Prec.	TPR	F1	TNR	ER	CF
0	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.00	90%
1	0.98	0.61	0.92	0.73	0.98	0.02	3%
2	0.98	0.80	0.41	0.54	1.00	0.02	3%
3	1.00	0.75	0.65	0.70	1.00	0.00	0%
4	1.00	0.56	0.63	0.59	1.00	0.00	0%
5	1.00	0.84	0.72	0.77	1.00	0.00	1%
6	0.99	0.70	0.96	0.81	0.99	0.01	2%
7	1.00	0.07	0.14	0.09	1.00	0.00	0%
8	1.00	0.30	0.07	0.11	1.00	0.00	0%
9	0.99	0.90	0.55	0.69	1.00	0.01	2%
10	1.00	0.11	0.03	0.05	1.00	0.00	0%
11	1.00	0.44	0.22	0.29	1.00	0.00	0%

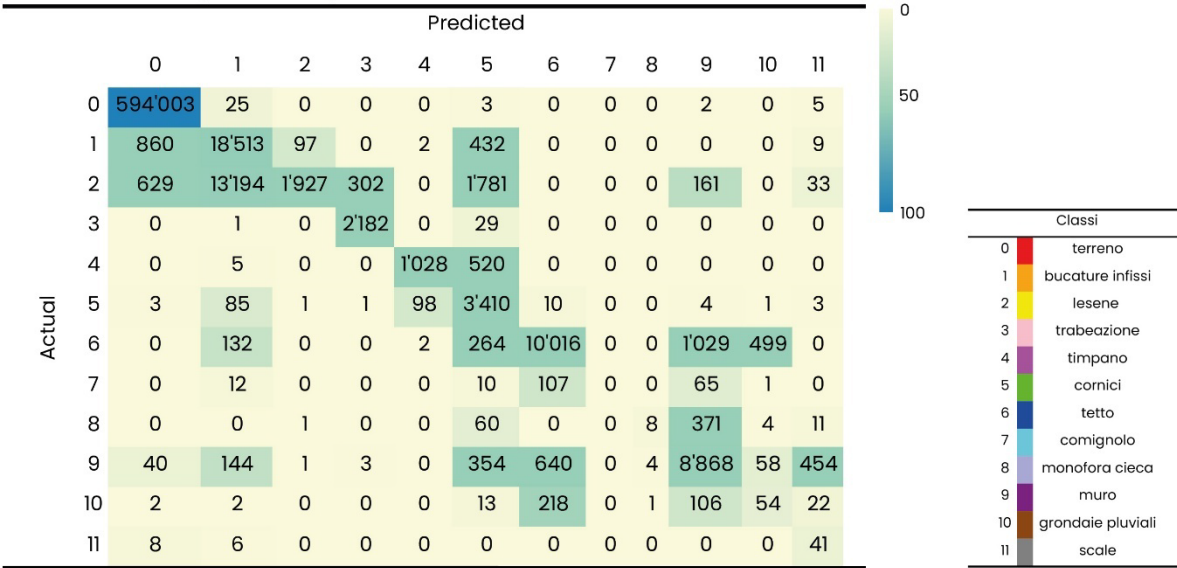


A.I.

Per la classificazione degli elementi architettonici l'algorithmo RF4PCC mostra *performance* eccellenti per la classe 0, con *precision*, *recall* e *F1 score* pari a 1.00, con una individuazione ottimale. Le classi 1, 2, 5 e 6 hanno *performance* buone, con *F1 score* compresi tra 0.73 e 0.81,

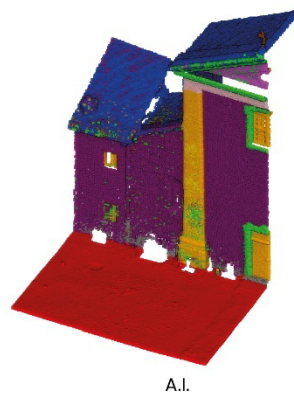
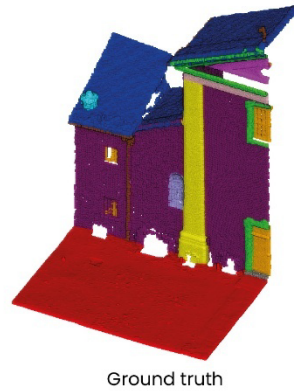
grazie a *precision* e *recall* bilanciati. Le classi 3 e 4 hanno *performance* accettabili, ma con *precision* e *recall* più bassi (0.75 e 0.56 rispettivamente). Le classi 7, 8, 9 e 10 sono le più critiche, con *recall* molto bassi (0.14, 0.07, 0.55 e 0.03 rispettivamente), indicando che il modello fatica a riconoscerle, a causa della loro presenza nel dataset esigua. Tra i vari algoritmi RF è quello che presenta le performance migliori.

Classificazione Orange Data Mining istanze architettoniche



	TP	TN	FP	FN	Σ
0	594'003	67'410	1'542	35	662'990
1	18'513	629'471	13'606	1'400	662'990
2	1'927	644'863	100	16'100	662'990
3	2'182	660'472	306	30	662'990
4	1'028	661'335	102	525	662'990
5	3'410	655'908	3'466	206	662'990
6	10'016	650'073	975	1'926	662'990
7	0	662'795	0	195	662'990
8	8	662'530	5	447	662'990
9	8'868	650'686	1'738	1'698	662'990
10	54	662'009	563	364	662'990
11	41	662'398	537	14	662'990

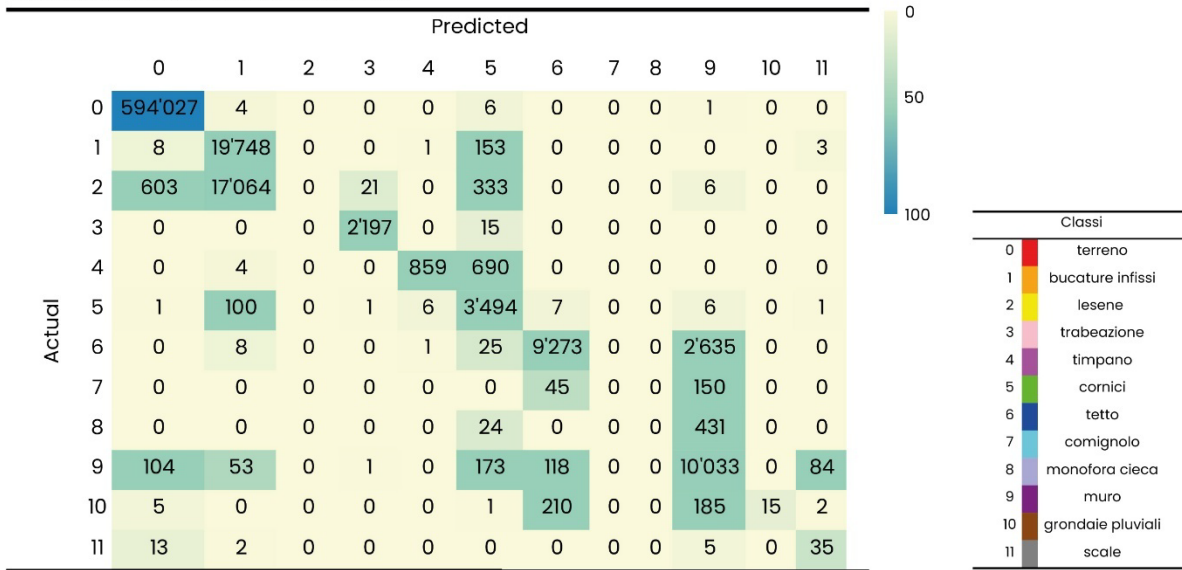
	ACC	Prec.	TPR	FI	TNR	ER	CF
0	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.00	90%
1	0.98	0.58	0.93	0.71	0.98	0.02	3%
2	0.98	0.95	0.11	0.19	1.00	0.02	3%
3	1.00	0.88	0.99	0.93	1.00	0.00	0%
4	1.00	0.91	0.66	0.77	1.00	0.00	0%
5	0.99	0.50	0.94	0.65	0.99	0.01	1%
6	1.00	0.91	0.84	0.87	1.00	0.00	2%
7	1.00	/	0.00	/	1.00	0.00	0%
8	1.00	0.62	0.02	0.03	1.00	0.00	0%
9	0.99	0.84	0.84	0.84	1.00	0.01	2%
10	1.00	0.09	0.13	0.10	1.00	0.00	0%
11	1.00	0.07	0.75	0.13	1.00	0.00	0%



La classificazione ottenuta con il software Orange Data Mining è la più rumorosa tra quelle ottenute, nonostante ciò il modello continua a performare in modo eccellente per la classe 0, con precision, recall e FI score pari a 1.00, confermando un'identificazione perfetta.

Le classi 1, 3, 4, 5 e 6 mostrano buone *performance*, con *F1 score* compresi tra 0.71 e 0.93, grazie a *precision* e *recall* bilanciati. La classe 2 ha un *recall* molto basso (0.11), indicando che il modello fatica a riconoscere correttamente le sue istanze nonostante una *precision* alta (0.95). Le classi 7, 8, 9 e 10 sono le più critiche, con *recall* molto bassi (0.00, 0.02, 0.84 e 0.13 rispettivamente), suggerendo che il modello ha difficoltà nel riconoscerle, a causa della loro scarsa frequenza nel dataset.

Classificazione LLM istanze architettoniche



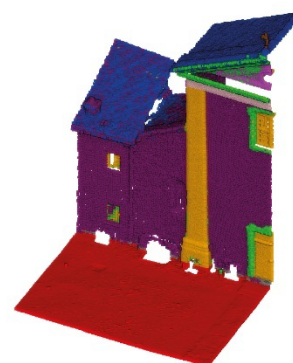
Classi	
0	terreno
1	bucature infissi
2	lesene
3	trabeazione
4	timpano
5	cornici
6	tetto
7	cornignolo
8	monofora cieca
9	muro
10	grondaie pluviali
11	scale

	TP	TN	FP	FN	Σ
0	594'027	68'218	734	11	662'990
1	19'748	625'842	17'235	165	662'990
2	0	644'963	0	18'027	662'990
3	2'197	660'755	23	15	662'990
4	859	661'429	8	694	662'990
5	3'494	657'954	1'420	122	662'990
6	9'273	650'668	380	2'669	662'990
7	0	662'795	0	195	662'990
8	0	662'535	0	455	662'990
9	10'033	649'005	3'419	533	662'990
10	15	662'572	0	403	662'990
11	35	662'845	90	20	662'990



Ground truth

	ACC	Prec.	TPR	FI	TNR	ER	CF
0	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.00	90%
1	0.97	0.53	0.99	0.69	0.97	0.03	3%
2	0.97	/	0.00	/	1.00	0.03	3%
3	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	0.00	0%
4	1.00	0.99	0.55	0.71	1.00	0.00	0%
5	1.00	0.71	0.97	0.82	1.00	0.00	1%
6	1.00	0.96	0.78	0.86	1.00	0.00	2%
7	1.00	/	0.00	/	1.00	0.00	0%
8	1.00	/	0.00	/	1.00	0.00	0%
9	0.99	0.75	0.95	0.84	0.99	0.01	2%
10	1.00	1.00	0.04	0.07	1.00	0.00	0%
11	1.00	0.28	0.64	0.39	1.00	0.00	0%



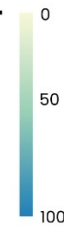
A.I.

L'algoritmo RF ottenuto tramite LLM performa in modo eccellente per la classe 0, con *precision*, *recall* e *F1 score* pari a 1.00. Le classi 1, 3, 4, 5 e 6 mostrano buone *performance*, con *F1 score* compresi tra 0.69 e 0.99, grazie a *precision* e *recall* bilanciati. La classe 2 ha un

recall pari a 0.00, indicando che il modello non riesce a riconoscere le sue istanze, nonostante una precision alta. Le classi 7, 8, 9 e 10 sono le più critiche, con recall molto bassi (0.00, 0.00, 0.95 e 0.04 rispettivamente), suggerendo che il modello ha difficoltà nel riconoscere queste classi a causa della class frequency bassa. Nonostante ciò, l'accuracy complessiva rimane alta per le classi ad elevata numerosità.

Classificazione RF4PCC istanze materiali

		Predicted									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Actual	0	523'752	2'674	169	52	41	9	0	1	5	2
	1	7'353	13'846	75	4	7	0	0	0	0	0
	2	224	13	4'313	84	99	8	0	2	0	1
	3	238	5	182	1'218	1'868	113	4	13	12	25
	4	40	0	31	1'565	32'754	649	72	191	104	34
	5	48	2	40	323	4'706	3'784	239	31	8	56
	6	4	0	3	19	1'375	637	1'662	60	9	39
	7	0	0	1	9	86	68	85	773	47	401
	8	1	0	0	7	21	14	3	18	74	376
	9	14	0	1	55	61	29	10	96	153	5'613



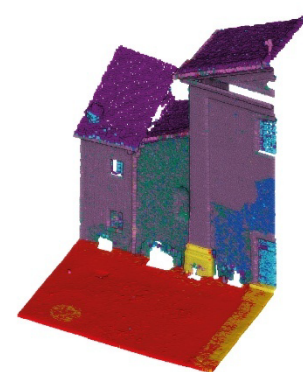
Classi	
0	pietrisco
1	selciato
2	pietra da decoro
3	grondaie pluviali in rame
4	intonaco
5	paramento murario in pietra
6	affreschi
7	infissi lignei
8	puntoni lignei
9	copertura in lose

	TP	TN	FP	FN	Σ
0	523'752	78'286	7'922	2'953	612'913
1	13'846	588'934	2'694	7'439	612'913
2	4'313	607'667	502	431	612'913
3	1'218	607'117	2'118	2'460	612'913
4	32'754	569'209	8'264	2'686	612'913
5	3'784	602'149	1'527	5'453	612'913
6	1'662	608'692	413	2'146	612'913
7	773	611'031	412	697	612'913
8	74	612'061	338	440	612'913
9	5'613	605'947	934	419	612'913

	ACC	Prec.	TPR	FI	TNR	ER	CF
0	0.98	0.99	0.99	0.99	0.91	0.02	86%
1	0.98	0.84	0.65	0.73	1.00	0.02	3%
2	1.00	0.90	0.91	0.90	1.00	0.00	1%
3	0.99	0.37	0.33	0.35	1.00	0.01	1%
4	0.98	0.80	0.92	0.86	0.99	0.02	6%
5	0.99	0.71	0.41	0.52	1.00	0.01	2%
6	1.00	0.80	0.44	0.57	1.00	0.00	1%
7	1.00	0.65	0.53	0.58	1.00	0.00	0%
8	1.00	0.18	0.14	0.16	1.00	0.00	0%
9	1.00	0.86	0.93	0.89	1.00	0.00	1%



Ground truth



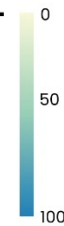
A.I.

Per la classificazione dei materiali l'algoritmo RF4PCC mostra performance eccellenti per la classe 0, con precision, recall e FI score vicini a 1.00, indicando una predizione ottimale.

Le classi 2, 4 e 9 hanno anche buone *performance*, con *F1 score* compresi tra 0.86 e 0.90, grazie a *precision* e *recall* bilanciati. Le classi 1, 3, 5 e 6 mostrano *performance* accettabili, ma con *precision* e *recall* più bassi (0.65-0.92). Le classi 7 e 8 sono le più critiche, con *recall* molto bassi (0.53 e 0.14 rispettivamente), indicando che il modello fatica a riconoscerle, nonostante ciò il sistema addestrato funziona correttamente.

Classificazione Orange Data Mining istanze materiali

		Predicted									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Actual	0	450'113	76'543	33	0	15	0	0	1	0	0
	1	123	21'161	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	34	232	4'348	1	122	0	3	4	0	0
	3	0	25	83	306	3'163	0	16	31	2	52
	4	2	24	63	279	34'112	67	525	172	0	196
	5	26	157	50	14	6'698	0	2'130	147	0	15
	6	0	18	17	1	452	0	3'277	42	0	1
	7	0	1	1	0	64	0	173	1'227	0	4
	8	0	0	0	3	27	0	1	410	6	67
	9	0	0	0	13	110	0	6	960	4	4'939



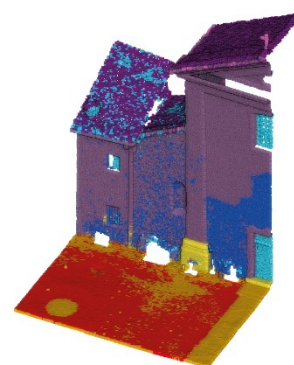
Classi	
0	pietrisco
1	selciato
2	pietra da decoro
3	grondaie pluviali in rame
4	intonaco
5	paramento murario in pietra
6	affreschi
7	infissi lignei
8	puntoni lignei
9	copertura in lose

	TP	TN	FP	FN	Σ
0	450'113	86'023	185	76'592	612'913
1	21'161	514'628	77'000	124	612'913
2	4'348	607'921	248	396	612'913
3	306	608'924	311	3'372	612'913
4	34'112	566'822	10'651	1'328	612'913
5	0	603'609	67	9'237	612'913
6	3'277	606'251	2'854	531	612'913
7	1'227	609'676	1'767	243	612'913
8	6	612'393	6	508	612'913
9	4'939	606'546	335	1'093	612'913

	ACC	Prec.	TPR	FI	TNR	ER	CF
0	0.87	1.00	0.85	0.92	1.00	0.13	86%
1	0.87	0.22	0.99	0.35	0.87	0.13	3%
2	1.00	0.95	0.92	0.93	1.00	0.00	1%
3	0.99	0.50	0.08	0.14	1.00	0.01	1%
4	0.98	0.76	0.96	0.85	0.98	0.02	6%
5	0.98	0.00	0.00	/	1.00	0.02	2%
6	0.99	0.53	0.86	0.66	1.00	0.01	1%
7	1.00	0.41	0.83	0.55	1.00	0.00	0%
8	1.00	0.50	0.01	0.02	1.00	0.00	0%
9	1.00	0.94	0.82	0.87	1.00	0.00	1%



Ground truth

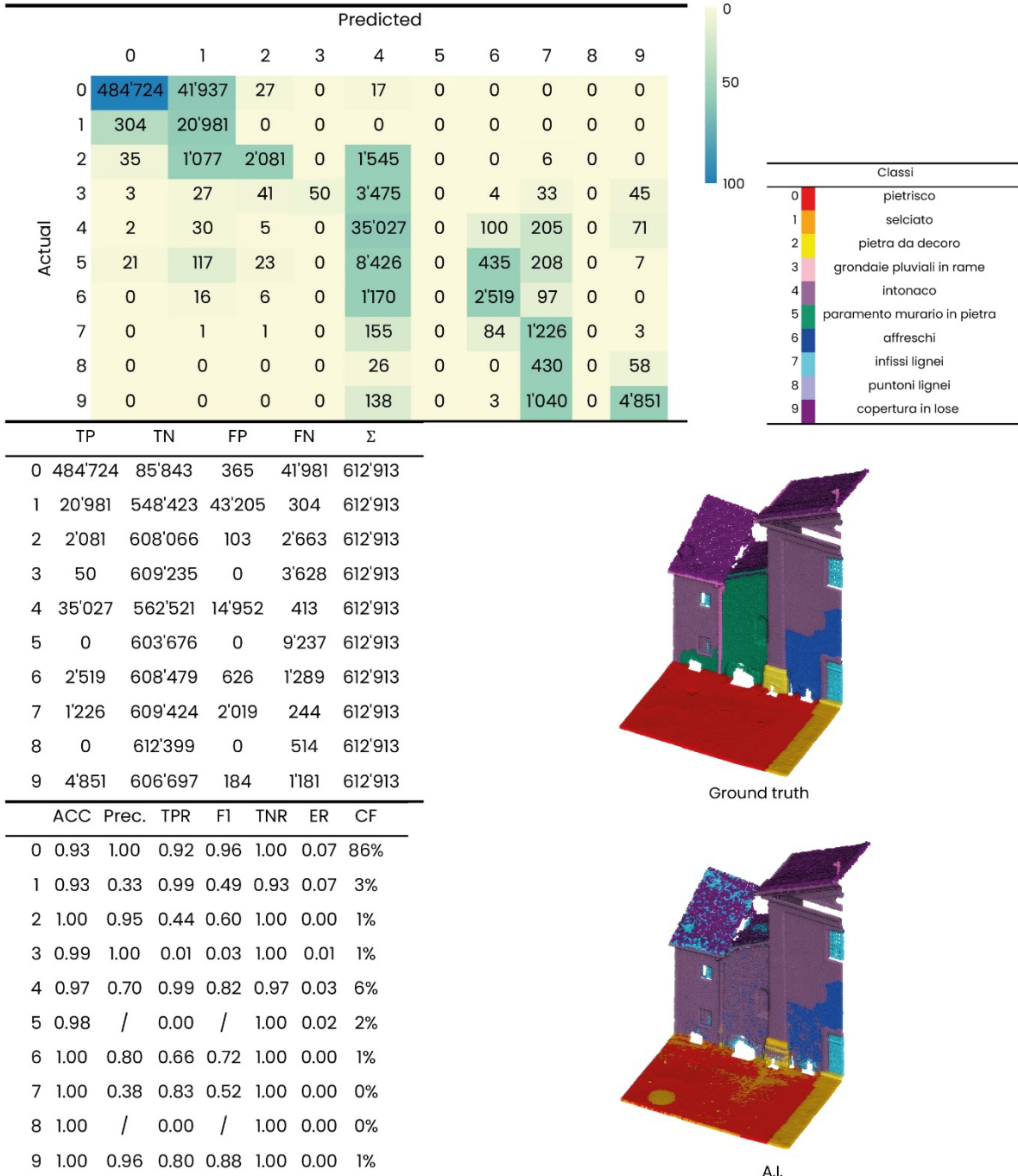


A.I.

L'algoritmo RF del software *Orange Data Mining* mostra buona *performance* per l'istanza 0, con *precision* pari a 1.00 e un *F1 score* di 0.92. Le classi 2, 4 e 9 hanno anche buone

performance, con *F1 score* compresi tra 0.85 e 0.93, grazie a *precision* e *recall* bilanciati. Le classi 1, 3, 5 e 6 mostrano performance accettabili, ma con *precision* e *recall* più bassi (0.22-0.86), suggerendo qualche difficoltà nel distinguerle correttamente. Le classi 5, 7 e 8 sono le più critiche, con *recall* molto bassi (0.00, 0.83 e 0.01 rispettivamente).

Classificazione LLM istanze materiali



Il modello addestrato dimostra performance eccellenti per la classe 0, con *precision* pari a 1.00 e un *F1 score* di 0.96. Le classi 4 e 9 hanno anche buone performance, con *F1 score* compresi tra 0.82 e 0.88, grazie a *precision* e *recall* bilanciati. Le classi 1, 2, 3, 5 e 6 mostrano

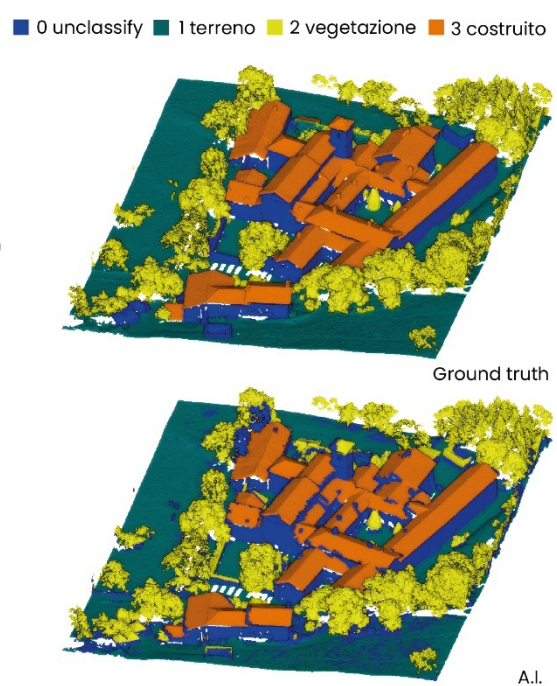
performance accettabili, ma con *precision* e *recall* più bassi (0.33-0.99), con qualche difficoltà nel distinguerle correttamente. Le classi 5, 7 e 8 sono le più critiche, con *recall* molto bassi (0.00, 0.83 e 0.00 rispettivamente) a causa della loro scarsa rappresentazione (0% o 2% di class frequency). La classificazione come per i casi precedenti risulta fortemente sbilanciata a favore della classe 0.

- 4.5.2 Metriche di valutazione delle nuvole dell'abbazia della Novalesa a scala ambientale

Di seguito riportiamo per ogni metodo applicato e per ogni classificazione su cui è stato utilizzato la matrice di confusione e le altre metriche precedentemente illustrate. Riassumendo più in generale possiamo affermare che i risultati ottenuti dai due metodi, *LASTools* e *Metashape*, suggeriscono un comportamento interessante al variare della numerosità del dataset. Sebbene in molti casi ci si aspetti che la riduzione del numero di dati possa portare a un peggioramento delle prestazioni, qui si osserva un effetto opposto: entrambi gli algoritmi sembrano trarre beneficio dalla diminuzione della densità della nuvola di punti. Con l'abbassarsi della quantità di dati (sia con sotto campionamenti a 0.1 m che a 0.2 m), si nota un miglioramento delle metriche. Questo fenomeno può essere spiegato dalla riduzione del rumore nei dati, migliorando quindi la loro capacità di generalizzare e classificare correttamente.

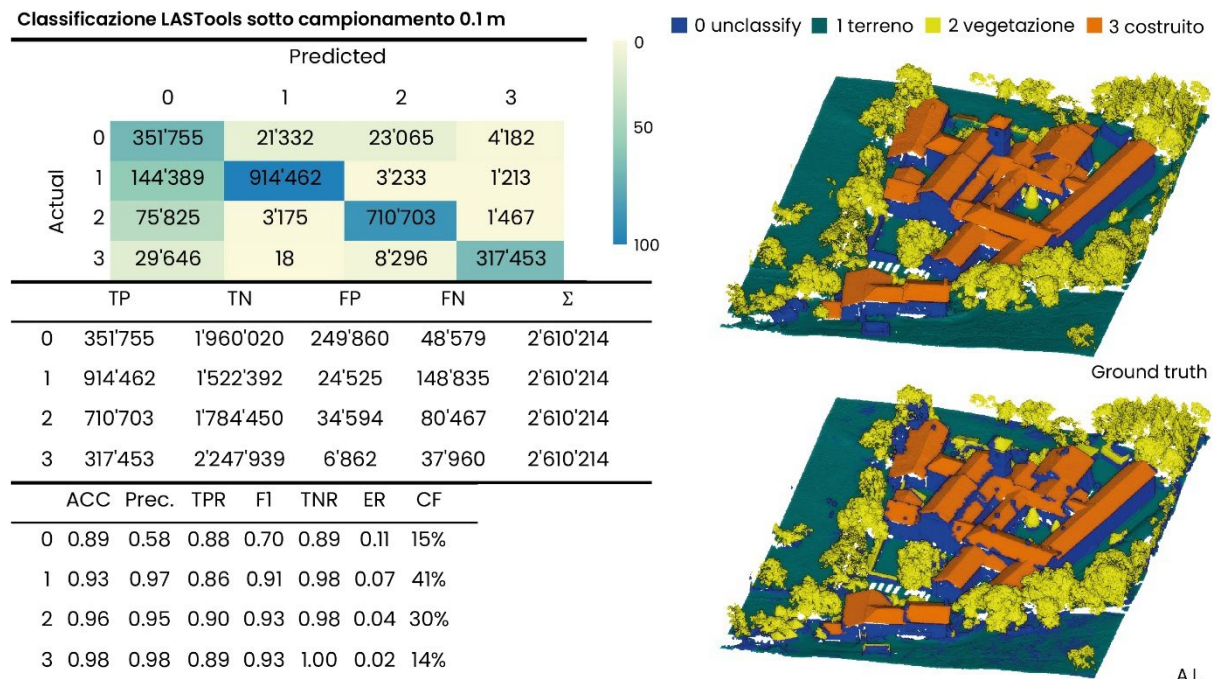
Classificazione LASTools senza sotto campionamento

		Predicted				Σ		
		0	1	2	3			
Actual	0	13'028'933	829'662	1'036'261	1'207'321			
	1	6'493'428	36'255'090	217'594	0			
	2	2'140'604	107'316	28'091'785	47'737			
	3	938'685	0	336'286	11'503'260			
		TP	TN	FP	FN	Σ		
0		13'028'933	76'559'068	9'572'717	3'073'244	102'233'962		
1		36'255'090	58'330'872	936'978	6'711'022	102'233'962		
2		28'091'785	70'256'379	1'590'141	2'295'657	102'233'962		
3		11'503'260	88'200'673	1'255'058	1'274'971	102'233'962		
		ACC	Prec.	TPR	FI	TNR	ER	CF
0		0.88	0.58	0.81	0.67	0.89	0.12	16%
1		0.93	0.97	0.84	0.90	0.98	0.07	42%
2		0.96	0.95	0.92	0.94	0.98	0.04	30%
3		0.98	0.90	0.90	0.90	0.99	0.02	12%



LASTools mostra *performance* solide, con *accuracy* elevata. La classe 1 ha le migliori *performance*, con *precision*, *recall* e *F1 score* vicini a 0.97, 0.84 e 0.90 rispettivamente, indicando un'identificazione affidabile. Le classi 2 e 3 hanno anche buone *performance*, con *F1 score* compresi tra 0.90 e 0.94, grazie a *precision* e *recall* bilanciati. La classe 0 ha un *recall* più basso (0.81) rispetto alle altre classi, suggerendo difficoltà nel riconoscere

correttamente le sue istanze. Nonostante ciò, l'*accuracy* complessiva rimane alta per tutte le classi, dimostrando che il modello è affidabile, ma potrebbe beneficiare di ulteriori miglioramenti per la classe 0. Le classi hanno tra loro una *class frequency* bilanciata.

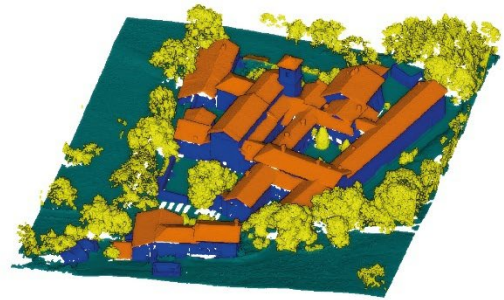


Al sotto campionamento 0.1 m il modello continua a mostrare buone *performance*, con *accuracy* elevata. La classe 1 ha le migliori *performance*, con *precision*, *recall* e *F1 score* vicini a 0.97, 0.86 e 0.91 rispettivamente. Le classi 2 e 3 hanno anche buone *performance*, con *F1 score* pari a 0.93, grazie a *precision* e *recall* bilanciati. La classe 0 ha un *recall* più basso (0.88), suggerendo qualche difficoltà nel riconoscere correttamente le sue istanze.

Classificazione LASTools sotto campionamento 0.2 m

		Predicted						
		0	1	2	3			
Actual	0	93'051	5'214	6'165	1'615			
	1	41'502	232'919	2'078	340			
	2	14'286	715	194'726	310			
	3	7'556	15	2'152	82'157			
		TP	TN	FP	FN	Σ		
0		93'051	515'412	63'344	12'994	684'801		
1		232'919	402'018	5'944	43'920	684'801		
2		194'726	464'369	10'395	15'311	684'801		
3		82'157	590'656	2'265	9'723	684'801		
		ACC	Prec.	TPR	F1	TNR	ER	CF
0		0.89	0.59	0.88	0.71	0.89	0.11	15%
1		0.93	0.98	0.84	0.90	0.99	0.07	40%
2		0.96	0.95	0.93	0.94	0.98	0.04	31%
3		0.98	0.97	0.89	0.93	1.00	0.02	13%

■ 0 unclassify ■ 1 terreno ■ 2 vegetazione ■ 3 costruito



Ground truth



A.I.

Al sotto campionamento 0.2 m l' algoritmo continua a dimostrare *performance* solide, con *accuracy* elevata per tutte le classi. La classe 1 ha le migliori *performance*, con *precision*, *recall* e *F1 score* vicini a 0.98, 0.84 e 0.90 rispettivamente. Le classi 2 e 3 hanno anche buone *performance*, con *F1 score* compresi tra 0.93 e 0.94, grazie a *precision* e *recall* bilanciati. La classe 0 ha un *recall* più basso (0.88).

Classificazione Metashape senza sotto campionamento

		Predicted						
		0	1	2	3			
Actual	0	39'866'208	1'714'597	17'288	36'280			
	1	639'060	30'367'299	41'494	137			
	2	2'716'517	2'540'553	24'291'695	2'834			
	3	0	0	0	0			
		TP	TN	FP	FN	Σ		
0		39'866'208	57'244'012	3'355'577	1'768'165	102'233'962		
1		30'367'299	66'930'822	4'255'150	680'691	102'233'962		
2		24'291'695	72'623'581	58'782	5'259'904	102'233'962		
3		0	102'194'711	39'251	0	102'233'962		
		ACC	Prec.	TPR	F1	TNR	ER	CF
0		0.95	0.92	0.96	0.94	0.94	0.05	41%
1		0.95	0.88	0.98	0.92	0.94	0.05	30%
2		0.95	1.00	0.82	0.90	1.00	0.05	29%
3		1.00	0.00	/	/	1.00	0.00	0%

■ 0 terreno ■ 1 vegetazione ■ 2 costruito



Ground truth

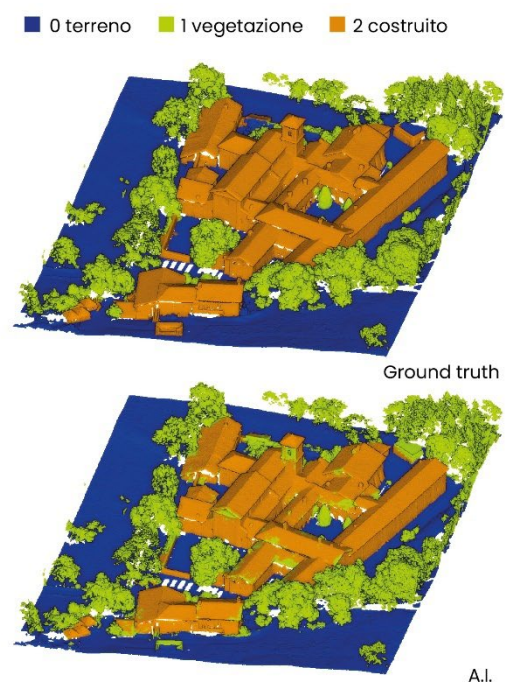


A.I.

Il software *Metashape* mostra *performance* eccellenti per le classi 0, 1 e 2, con *precision*, *recall* e *F1 score* vicini a 0.92-1.00, indicando un riconoscimento soddisfacente. La classe 0 ha un *F1 score* di 0.94, mentre la classe 1 ha un *F1 score* di 0.92, entrambi con *recall* elevati (0.96 e 0.98 rispettivamente). La classe 2 ha una *precision* perfetta (1.00) e un *F1 score* di 0.90, nonostante un *recall* leggermente più basso (0.82). La classe 3 non ha istanze correttamente identificate, con *precision* e *recall* pari a 0.00, indicando che il modello non riesce a riconoscerla, a causa della sua assenza nel *ground truth*. Nonostante ciò, l'*accuracy* complessiva rimane alta per le classi maggioritarie.

Classificazione Metashape sotto campionamento 0.1 m

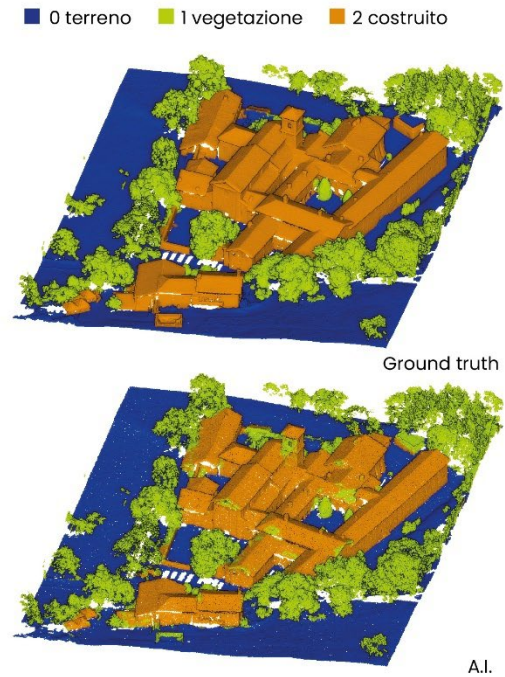
		Predicted						
		0	1	2	3			
Actual	0	1'015'587	46'338	1'019	353			
	1	23'403	766'796	971	0			
	2	62'547	58'131	635'028	41			
	3	0	0	0	0			
		TP	TN	FP	FN	Σ		
0		1'015'587	1'460'967	85'950	47'710	2'610'214		
1		766'796	1'714'575	104'469	24'374	2'610'214		
2		635'028	1'852'477	1'990	120'719	2'610'214		
3		0	2'609'820	394	0	2'610'214		
		ACC	Prec.	TPR	FI	TNR	ER	CF
0		0.95	0.92	0.96	0.94	0.94	0.05	41%
1		0.95	0.88	0.97	0.92	0.94	0.05	30%
2		0.95	1.00	0.84	0.91	1.00	0.05	29%
3		1.00	0.00	/	/	1.00	0.00	0%



Al sotto campionamento 0.1 m il RF continua a mostrare *performance* eccellenti per le classi 0, 1 e 2, con *precision*, *recall* e *F1 score* vicini a 0.92-1.00. La classe 0 ha un *F1 score* di 0.94, mentre la classe 1 ha un *F1 score* di 0.92, entrambi con *recall* elevati (0.96 e 0.97 rispettivamente). La classe 2 ha una *precision* perfetta (1.00) e un *F1 score* di 0.91, nonostante un *recall* leggermente più basso (0.84). La classe 3 non viene riconosciuta perché non è presente nel *ground truth*. Nonostante ciò, l'*accuracy* complessiva rimane alta per le classi più frequenti.

Classificazione Metashape sotto campionamento 0.2 m

		Predicted						
		0	1	2	3			
Actual	0	261'888	14'547	380	24			
	1	2'275	207'209	553	0			
	2	15'588	14'240	168'094	3			
	3	0	0	0	0			
		TP	TN	FP	FN	Σ		
0		261'888	390'099	17'863	14'951	684'801		
1		207'209	445'977	28'787	2'828	684'801		
2		168'094	485'943	933	29'831	684'801		
3		0	684'774	27	0	684'801		
		ACC	Prec.	TPR	FI	TNR	ER	CF
0		0.95	0.94	0.95	0.94	0.96	0.05	40%
1		0.95	0.88	0.99	0.93	0.94	0.05	31%
2		0.96	0.99	0.85	0.92	1.00	0.04	29%
3		1.00	0.00	/	/	1.00	0.00	0%



Al sotto campionamento 0.2 m il sistema addestrato continua a dimostrare *performance* eccellenti per le classi 0, 1 e 2, con *precision*, *recall* e *F1 score* vicini a 0.94-0.99. La classe 0 ha un *F1 score* di 0.94, mentre la classe 1 ha un *F1 score* di 0.93, entrambi con *recall* elevati (0.95 e 0.99 rispettivamente). La classe 2 ha una *precision* quasi perfetta (0.99) e un *F1 score* di 0.92, nonostante un *recall* leggermente più basso (0.85). Possiamo concludere che la classificazione è condotta in maniera corretta.

5. Il modello BIM da nuvola classificata

L'ultimo aspetto fondamentale riguarda la restituzione e l'accessibilità del modello parametrico ai vari *stakeholder*. Un modello HBIM non è solo una rappresentazione digitale dell'edificio, ma un vero e proprio archivio dinamico che raccoglie e organizza le informazioni estratte attraverso l'impiego di tecnologie avanzate, come gli algoritmi di intelligenza artificiale (AI). Le piattaforme BIM e HBIM assolvono a questo compito diventando dei "*digital twin*" (gemelli digitali) del patrimonio architettonico reale. Questi modelli non si limitano a replicare la geometria dell'edificio, ma rappresentano un registro digitale in cui al modello 3D parametrico vengono associate informazioni multidisciplinari che si evolvono e si stratificano nel tempo. In questo modo, il modello HBIM diventa una memoria storica dell'edificio, capace di documentare non solo lo stato attuale, ma anche le trasformazioni, i danni e gli interventi subiti nel corso del tempo. (Spanò, Patrucco, Sammartano, Perri, Avena, Fillia, Milan, 2023).

Uno degli aspetti più innovativi e ancora fortemente sperimentali è il passaggio da *mesh* a modello parametrico in modo automatico, un processo noto come *scan-to-BIM*. Questo processo prevede l'uso di algoritmi di intelligenza artificiale in grado di riconoscere e classificare gli elementi strutturali e architettonici all'interno delle nuvole di punti (derivanti da scansioni laser o fotogrammetria) e di associarli alle corrispondenti famiglie parametriche nell'ambiente BIM. L'obiettivo è ridurre i tempi e i costi legati alla modellazione manuale, che spesso rappresenta un collo di bottiglia nei progetti di digitalizzazione del patrimonio storico. Tuttavia, questa automazione non è priva di sfide, soprattutto quando si tratta di beni architettonici storici che presentano geometrie complesse e irregolari, spesso lontane dagli standard di costruzione contemporanei su cui si basano i software BIM tradizionali.

Una delle principali complessità risiede proprio nel modellare elementi parametrici che rispecchino la natura stratificata e disomogenea del patrimonio storico. A differenza degli edifici moderni, che seguono standard costruttivi ben definiti, i beni culturali presentano spesso soluzioni costruttive uniche, materiali eterogenei e forme non convenzionali. Per affrontare questa sfida, è necessario utilizzare software HBIM specializzati, che includano famiglie parametriche specifiche per il patrimonio storico, come archi, volte, colonne

antiche o decorazioni artistiche. Questi elementi devono essere adattati per rappresentare fedelmente le peculiarità dell'architettura storica, richiedendo un lavoro di personalizzazione e integrazione che aumenta la complessità del processo di modellazione (Spanò, Patrucco, Sammartano, Perri, Avena, Fillia, Milan, 2023).

Un ulteriore livello di difficoltà è rappresentato dalla necessità di gestire la stratificazione storica degli edifici. I beni architettonici storici sono spesso il risultato di interventi e modifiche avvenuti nel corso dei secoli, che hanno lasciato tracce materiali e strutturali. L'HBIM deve quindi essere in grado di rappresentare non solo lo stato attuale dell'edificio, ma anche le sue fasi storiche, documentando le trasformazioni e le aggiunte nel tempo. Questo richiede un approccio multidisciplinare che integri dati storici, archeologici e diagnostici all'interno del modello digitale.

Infine, un aspetto cruciale è la condivisione e l'interoperabilità del modello HBIM tra i diversi attori coinvolti nel processo di conservazione. L'uso di standard aperti come l'IFC è essenziale per garantire che il modello possa essere utilizzato e arricchito da professionisti con competenze diverse, come architetti, ingegneri, restauratori e storici dell'arte. Tuttavia, l'adattamento dello standard IFC alle esigenze specifiche del patrimonio storico rimane una sfida aperta, che richiede ulteriori sviluppi e sperimentazioni.

In conclusione, l'HBIM rappresenta uno strumento potente per la conservazione e la gestione del patrimonio architettonico, ma il suo pieno potenziale può essere raggiunto solo attraverso un approccio integrato che combini tecnologie avanzate, competenze multidisciplinari e una profonda comprensione delle peculiarità del patrimonio storico. La strada verso una piena automazione del processo scan-to-BIM e verso una modellazione parametrica efficace per i beni culturali è ancora in evoluzione, ma le prospettive sono promettenti, soprattutto grazie ai progressi nell'intelligenza artificiale e nella gestione dei dati (Spanò, Patrucco, Sammartano, Perri, Avena, Fillia, Milan, 2023).

Per quanto riguarda il caso specifico del sagrato della Chiesa dei santi Pietro e Andrea della Noalesa è stata fatta una modellazione tramite BIM in maniera manuale avendo come riferimento sottostante la nuvola di punti e le classificazioni che si sono portate avanti

tramite le casistiche precedentemente riportate. L'immagine 64 mostra l'ambiente BIM impiegato per la modellazione dell'abbazia della Novalesa.

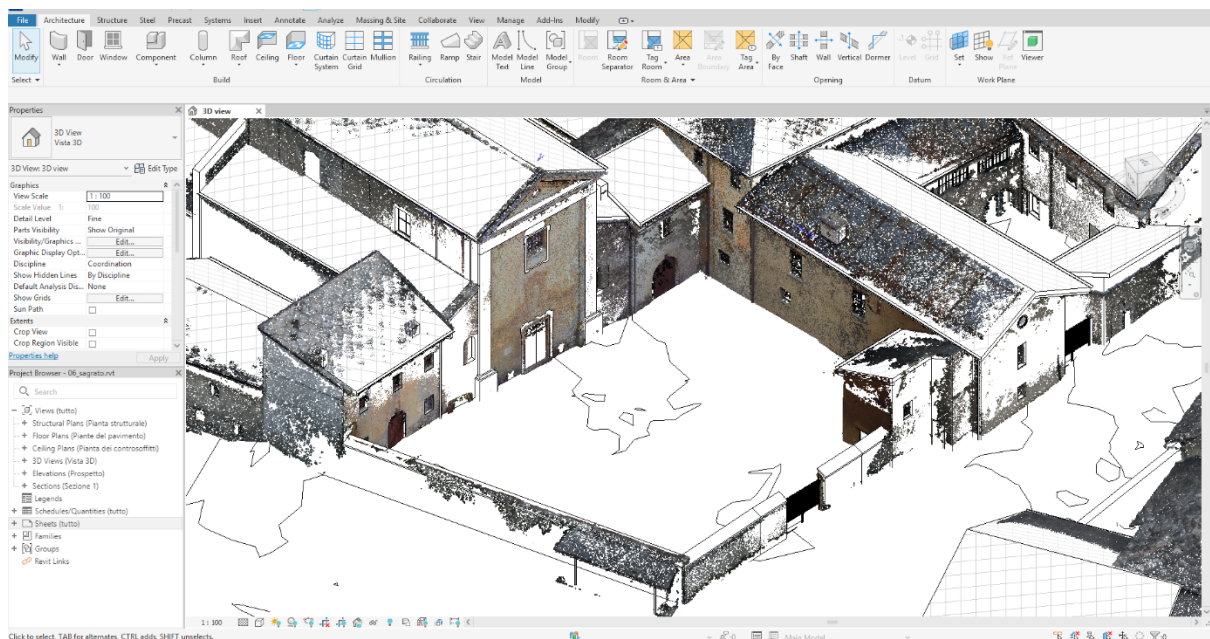


Figura 64 Schermata software BIM. Modellazione elementi parametrici del sagrato dell'abbazia della Novalesa avendo come riferimento sottostante la nuvola di punti.

6. Conclusioni

I sistemi di ML e DL nell'ambito della geomatica ricoprono un ruolo estremamente attuale nel velocizzare e standardizzare i passaggi necessari per una corretta restituzione ed analisi del patrimonio architettonico da valorizzare e tutelare. È comunque necessario sottolineare che l'applicazione di un sistema di ML o DL nell'ambito geomatico architettonico presenta ancora notevoli criticità e richiede di essere supervisionato e adeguato alle necessità, grazie ad operazioni completamente umane. La complessità sta nel fatto che il patrimonio architettonico è estremamente eterogeneo e complesso ed ogni caso studio presenta delle caratteristiche che sono specifiche sia a livello architettonico, ma ancora di più a livello materico o di degrado. La parte di pre-elaborazione per la creazione di un modello addestrato rimane estremamente arbitraria, rendendo l'algoritmo di apprendimento difficilmente replicabile ed applicabile su altri beni culturali, a meno che la segmentazione proposta sia generalizzata e le architetture abbiano dei tratti distintivi comuni.

Un ulteriore ostacolo nell'applicazione di sistemi di ML nell'ambito del rilievo geomatico è la necessità di competenze informatiche avanzate. L'uso di algoritmi di intelligenza artificiale sviluppati da terzi (RF4PCC) o generati con l'ausilio di LLM rende complessa l'implementazione di un algoritmo RF adeguato al proprio dataset di studio. Il *toolkit open-source Orange Data Mining* offre un'interfaccia visuale più accessibile, ma come evidenziato dai risultati, tende a fornire classificazioni meno accurate, poiché non è stato sviluppato specificamente per l'analisi delle nuvole di punti.

L'elaborazione a scala architettonica del sagrato della chiesa dell'abbazia della Novalesa ha richiesto un notevole impegno, e i risultati ottenuti non sono altamente soddisfacenti a causa della non replicabilità del modello addestrato. Inoltre, con l'aumentare della complessità delle classificazioni, tutti e tre gli algoritmi RF analizzati hanno mostrato difficoltà nel predire correttamente le istanze minoritarie. Per le nuvole di punti riguardanti il sagrato dell'abbazia della Novalesa si è stati costretti a lavorare con dataset non bilanciati, con classi predominanti che l'algoritmo apprende con maggiore facilità rispetto a quelle meno rappresentate. Questo problema è particolarmente rilevante nel contesto

architettonico, dove il bilanciamento del dataset è difficile da ottenere, basti pensare alla differenza di superficie tra elementi opachi e trasparenti in una facciata.

Un'ulteriore criticità del caso studio risiede nella ridotta dimensione del dataset e nella porzione di *training* troppo esigua per un addestramento efficace dei modelli RF. Inoltre, i dati impiegati nella nuvola di punti derivano da due metodologie di misura differenti, con caratteristiche di densità e radiometria non omogenee.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti a scala ambientale, il riconoscimento di terreno, vegetazione e costruito ha fornito esiti molto positivi. È emerso che la riduzione della densità della nuvola di punti migliora le prestazioni del modello, sia nel caso di computazione con *LAStools* sia con *Metashape*. In particolare, *Metashape* adotta una combinazione di filtri geometrici e algoritmi di intelligenza artificiale, semplificando il compito di segmentazione e riducendo il numero di classi da riconoscere. Questo approccio potrebbe essere esteso anche al riconoscimento di micro-elementi edilizi, migliorando le *performance* dell'intelligenza artificiale nei contesti più articolati.

Un aspetto fondamentale nella digitalizzazione del patrimonio architettonico riguarda l'integrazione con il BIM, e in particolare con l'HBIM. Questi modelli rappresentano veri e propri archivi digitali dinamici, in grado di raccogliere e organizzare informazioni multidisciplinari, evolvendosi nel tempo per documentare trasformazioni, interventi e stati di conservazione. L'utilizzo del ML all'interno del processo *scan-to-BIM* rappresenta una frontiera di ricerca promettente, ma ancora ricca di sfide, soprattutto per la modellazione di elementi parametrici fedeli alla complessità del patrimonio storico.

In definitiva, l'applicazione di sistemi di ML nel campo della geomatica rappresenta un'importante risorsa per il restauro e la conservazione degli edifici storici. Queste tecnologie permettono di automatizzare e standardizzare processi complessi, supportando il lavoro di esperti nel riconoscimento, nella classificazione e nella documentazione del patrimonio costruito. Sebbene le attuali limitazioni in termini di replicabilità, bilanciamento dei dataset e complessità architettonica rendano ancora necessaria una supervisione umana, il continuo sviluppo di modelli avanzati e l'integrazione con metodologie

consolidate come l'HBIM potranno rendere il ML un elemento sempre più centrale nella tutela e valorizzazione del patrimonio storico.

Ringraziamenti

Politecnico di Torino:
Antonia Teresa Spano'
Giacomo Patrucco
Marco Cappellazzo
Marco Avena

Città Metropolitana di Torino:
Laura Garavoglia
Marco Di Salvo

7. Bibliografia

B. Rossi, *La valle Cenischia*, in Segusium, "Novalesa e la sua abbazia", no. 10, Susa, Società di ricerche e studi valsusini, 1973.

S. Savi, G. Ferrero, *Il borgo di Novalesa*, in Segusium, "Novalesa e la sua abbazia", no. 10, Susa, Società di ricerche e studi valsusini, 1973.

C. Blandino, *L'abbazia Benedettina di S. Pietro della Novalesa*, in Segusium, "Novalesa e la sua abbazia", no. 10, Susa, Società di ricerche e studi valsusini, 1973.

S. Savi, *Architettura preromanica e romanica Novalesa*, in Segusium, "Novalesa e la sua abbazia", no. 10, Susa, Società di ricerche e studi valsusini, 1973.

G. C. Alessio, *Cronaca di Novalesa*, Torino, Einaudi, 1982.

G. Cantino Wataghin, *Le ricerche archeologiche in corso all'abbazia della Novalesa*, in "La Novalesa: ricerche, fonti documentarie, restauri", Atti del convegno dibattito svoltosi nella Abbazia della Novalesa, 10-12 luglio 1981, Comunità benedettina dei SS. Pietro e Andrea, Susa, 1988.

G. Lunardi, N. Bartolomasi, G. Popolla, *La Abbazia di Novalesa (726-1996)*, Pinerolo, Alzani, 1998.

A. Selvini, F. Guzzetti, *Fotogrammetria generale*, Torino, UTET, 2000.

ISO 19101, *Geographic information – Reference model*, ISO/TC 211, Ginevra, 2002.

M. G. Cerri, *Novalesa: nuove luci dall'Abbazia*, Milano, Electa, 2004.

G. Sergi, *Novalesa fra storia e storiografia*, in M. G. Cerri, "Novalesa: nuove luci dall'Abbazia", Milano, Electa, 2004.

G. Cantino Wataghin, *L'abbazia dei Santi Pietro e Andrea di Novalesa: il contributo delle indagini archeologiche*, in M. G. Cerri, "Novalesa: nuove luci dall'Abbazia", Milano, Electa, 2004.

A. Bruno, *L'intervento nel costruito: cronaca recente della Novalesa*, in M. G. Cerri, "Novalesa: nuove luci dall'Abbazia", Milano, Electa, 2004.

- M. A. Gomarasca, *Elementi di geomatica*, Milano, Associazione Italiana di Telerilevamento (AIT), 2004.
- S. Campana, R. Francovich, *Laser scanner: paesaggi archeologici e tecnologie digitali*, Firenze, All'insegna del giglio, 2006.
- G. Cantino Wataghin E. Destefanis, *L'abbazia di Novalesa tra il XI e il XIII secolo nel quadro delle istituzioni monastiche contemporanee: fonti scritte e fonti archeologiche*, in P. Guglielmotti, F. Arneodo, "Attraverso le Alpi: S. Michele, Novalesa, S. Teofredo e altre reti monastiche: atti del convegno internazionale di studi (Cervère-Valgrana, 12-14 marzo 2004)". Bari, Edipuglia, 2008.
- S. Uggé, *Abbazia di Novalesa: il Museo Archeologico*, Novalesa, Abbazia di Novalesa, 2012.
- S. Bertocci, M. Bini, *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Novara, Città Studi, 2012.
- M. Ruffino, *Le Alpi ospitali: viaggio nella storia e nell'arte di Novalesa medievale*, Torino, CLUT, 2014.
- A. Cina, *Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System): per la Geomatica*, Torino, CELID, 2014.
- A. Riggio, R. Carlucci, *Topografia di base: fondamentali della geomatica per la misura e la rappresentazione del territorio*, Roma, EPC, 2015.
- M. Lo Turco, *Il BIM e la rappresentazione infografica nel processo edilizio: dieci anni di ricerche e applicazioni*, Ariccia, Aracne, 2015.
- G. Patrucco, *Tecniche innovative UAV e LIDAR per l'analisi stratigrafica delle murature: il chiostro dell'abbazia di Novalesa*, Politecnico di Torino, Tesi, 2016.
- S. Raschka, *Machine learning con Python: costruire algoritmi per generare conoscenza*, Roma, Apogeo, 2016.
- A. Spanò, E. Donadio, F. Chiabrando, *Modelli 3D densi tra esperienze didattiche e ricerche di soluzioni fruibili*, *Polymnia*, no. 08, pp. 79-100, 2017.
- N. Romina, *Documentazione digitale point cloud come sistema informativo*, Ariccia, Aracne, 2018.

G. Patrucco, F. Chiabrando, A. Spanò, *Modelli 3D generati da metodi fotogrammetrici e LiDAR alla base dell'analisi stratigrafica delle murature del chiostro dell'Abbazia di Novalesa*, in Segusium, "La Geomatica e il patrimonio architettonico storico, due casi: l'Abbazia di Novalesa e la Porta Piemonte a Susa", no. 56, Susa, Società di ricerche e studi valsusini, 2018.

A. De Sanctis. *Rilievo dell'architettura e dello spazio urbano: evoluzione, nuove tecniche, nuovi modelli di conoscenza*, Roma, WriteUp Site, 2019

F. Chiabrando, E. Costamagna, A. Spanò, *La correlazione di immagini per la generazione di modelli 3D per il patrimonio costruito*, DOAJ, 400e1fd9b26b4f74911fd64498a50bd7, 2013.

E. Grilli, E. M. Farella, A. Torresani, F. Remondino, *Geometric features analysis for the classification of Cultural heritage point clouds*, ISPRS, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-541-2019>, 2019.

Eleonora Grilli, Simone Teruggi, Michele Russo, Francesco Fassi, Fabio Remondino, *Approccio gerarchico di machine learning per la segmentazione semantica di nuvole di punti 3d*, BOLLETTINO SIFET, 2020.

F. Matrone, A. M. Lingua, R. Pierdicca, E. S. Malinverni, M. A. Paolanti, E. Grilli, F. Remondino, *Un benchmark per la segmentazione semantica di nuvole di punti di beni culturali*, BOLLETTINO SIFET, 2020.

E. Grilli, F. Remondino, *Machine Learning Generalisation across Different 3D Architectural Heritage*, ISPRS, <https://doi.org/10.3390/ijgi9060379>, 2020.

M. Cappellazzo, M. Baldo, G. Sammartano, A. Spanò, *Integrated Airborne Lidar-Uav methods for Archaeological Mapping in vegetation-covered areas*, ISPRS, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-357-2023>, 2023.

A. Spanò, G. Patrucco, G. Sammartano, S. Perri, M. Avena, E. Fillia, S. Milan, *Digital Twinning for 20th Century Concrete Heritage: HBIM Cognitive Model for Torino Esposizioni Halls*, Sensors, <https://doi.org/10.3390/s23104791>, 2023.

R. Roussel, L. De Luca, *An Approach to Build a Complete Digital Report of the Notre Dame Cathedral after the fire, using the Aaioli Platform*, ISPRS, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1359-2023>, 2023.

G. Patrucco, F. Setragno, *Enhancing Automation of Heritage Processes: generation of artificial training datasets from photogrammetric 3D models*, ISPRS, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1181-2023>, 2023.

S. Alfio, M. Pepe, D. Costantino, *The Use of Random Forest for the Classification of Point Cloud in Urban Scene Vincenzo*, International Journal of Engineering Trends and Technology ISSN: 2231-5381 / <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I3P101>, 2024.

A. Aboohamzeh, M. Avena, A. Spanò, *Automating Built Heritage Modelling for the Integration into 3D City Models*, ISPRS, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W10-2024-5-2024>, 2024.

M. Cappellazzo, G. Patrucco, G. Sammartano, M. Baldo, A. Spanò, *Semantic Mapping of Landscape Morphologies: Tuning ML/DL Classification Approaches for Airborne LiDAR Data, Sensors*, <https://doi.org/10.3390/rs16193572>, 2024.

M. Cappellazzo, G. Patrucco, A. Spanò, *ML Approaches for the Study of Significant Heritage Contexts: An Application on Coastal Landscapes in Sardinia*, Heritage, <https://doi.org/10.3390/heritage7100261>, 2024.

8. Sitografia

Sito Archivio di Stato di Torino, consultato 2024: <https://archiviodistatotorino.beniculturali.it/>

Sito 3DOM-FBK Random Forest 4 Point Cloud Classification - RF4PCC, consultato 2024: <https://github.com/3DOM-FBK/RF4PCC>

Sito Orange data mining Random Forest, consultato 2024:

https://github.com/biolab/orange3/blob/master/Orange/classification/random_forest.p

∩

Sito Random Forest generato mediante LLM, creato nel 2024:

https://github.com/LeoR89756/random-forest-point-cloud-classify/blob/main/RF_point_cloud_classify.py

Sito LAsTools, consultato 2024: <https://lastools.github.io/>

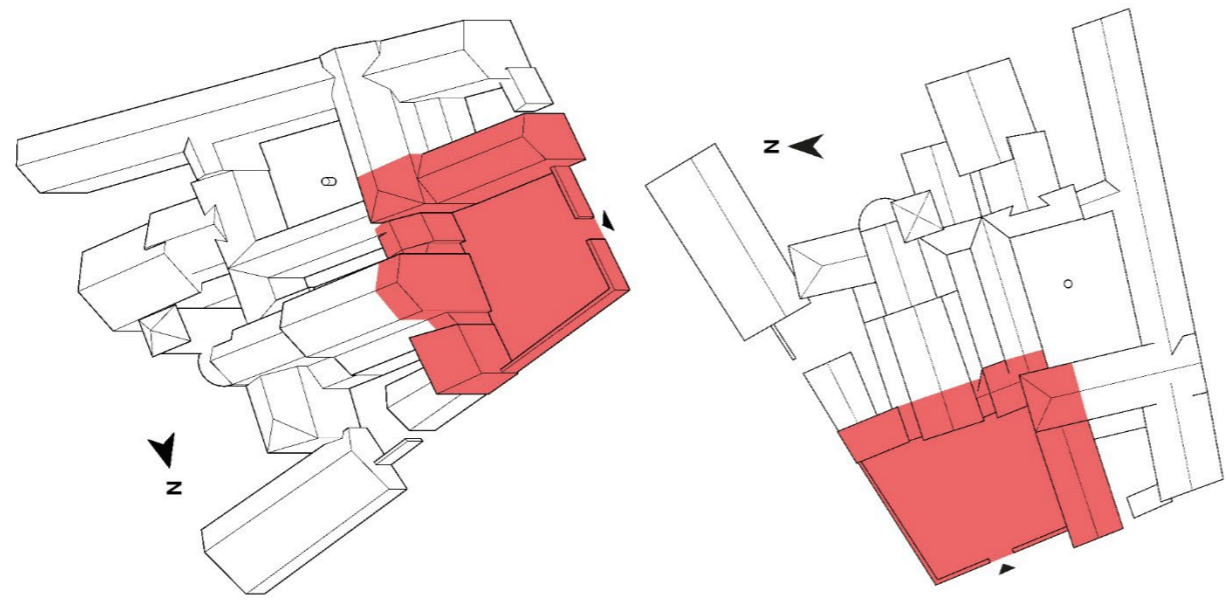
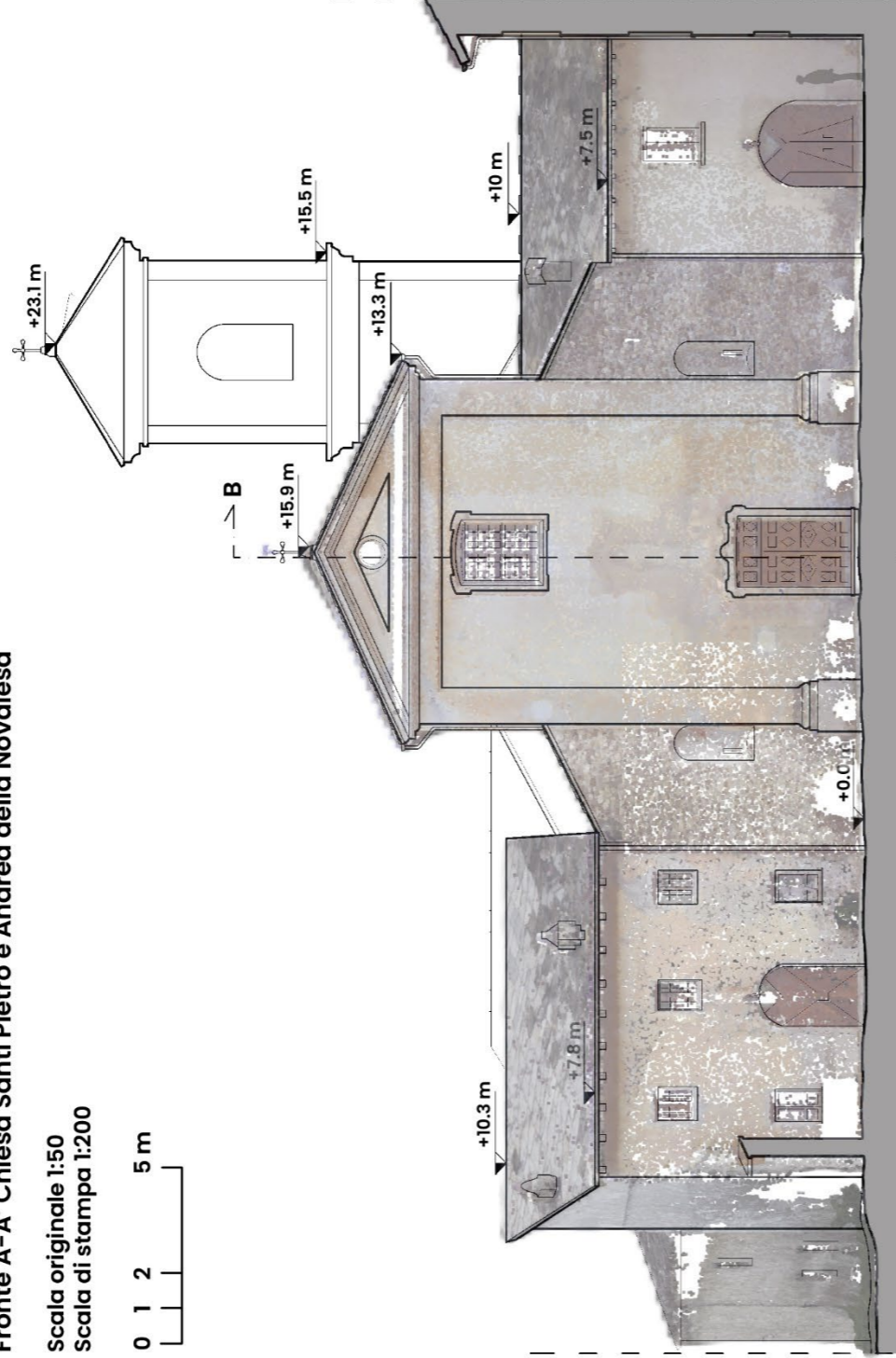
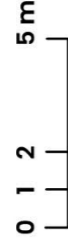
Sito Metashape, consultato 2024: <https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>

Sito ArCHdataset, consultato 2024: <https://archdataset.polito.it/>

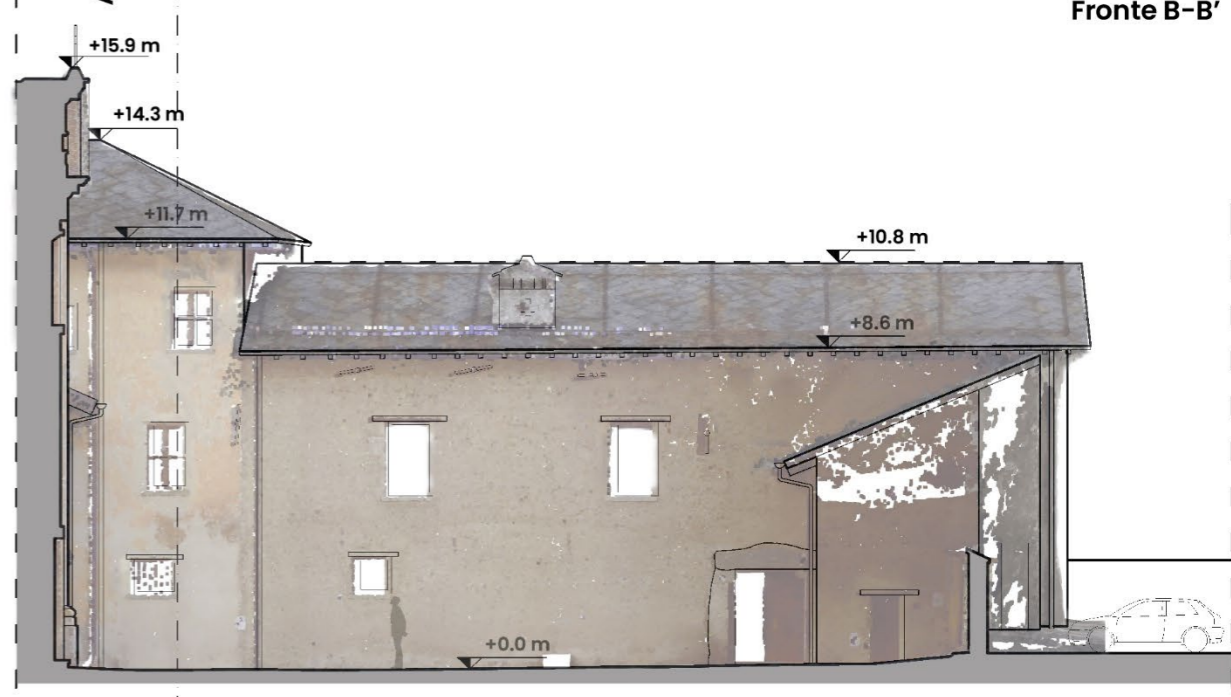
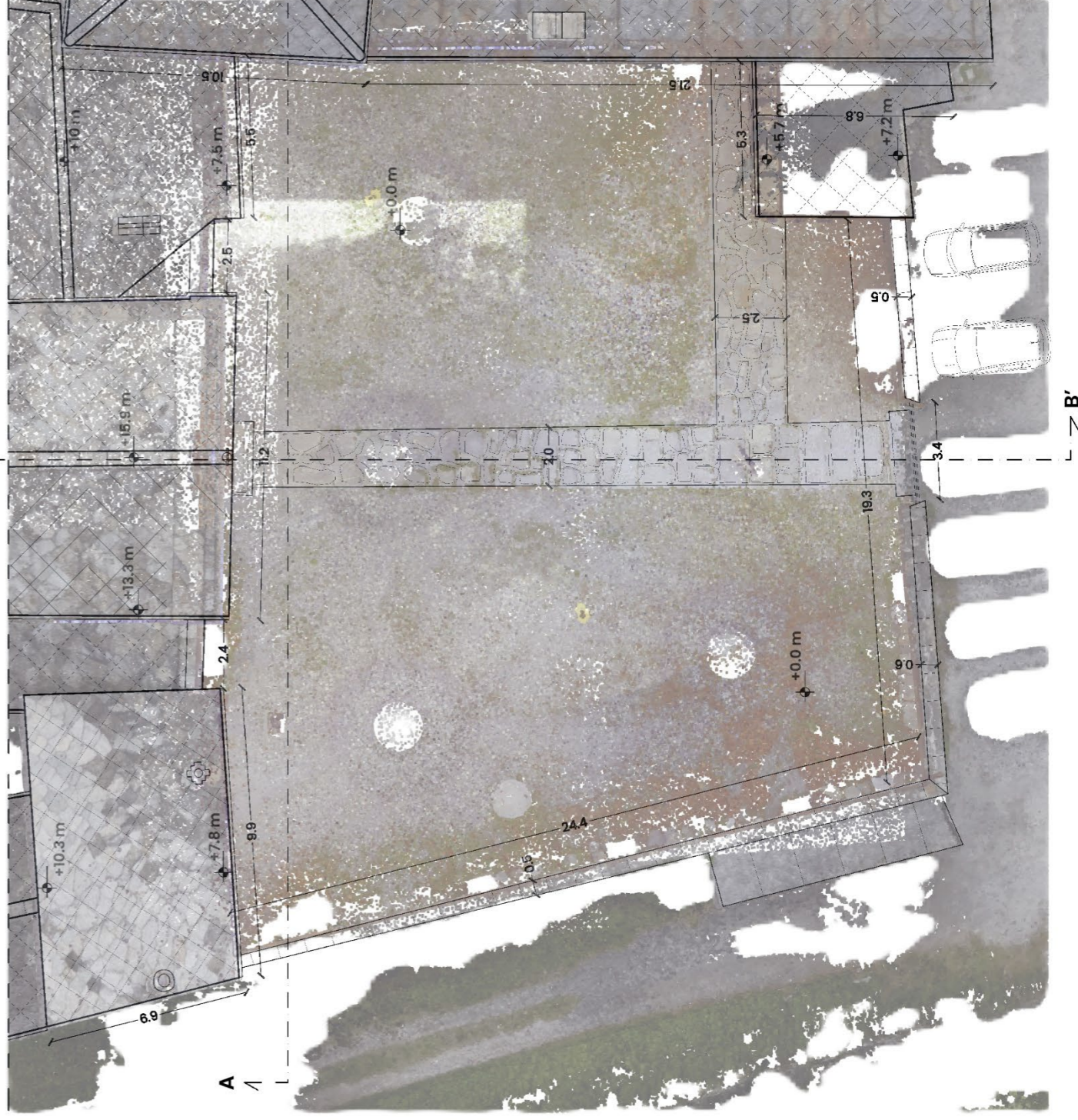
9. Tavole

Fronte A-A' Chiesa Santi Pietro e Andrea della Novalesa

Scala originale 1:50
Scala di stampa 1:200



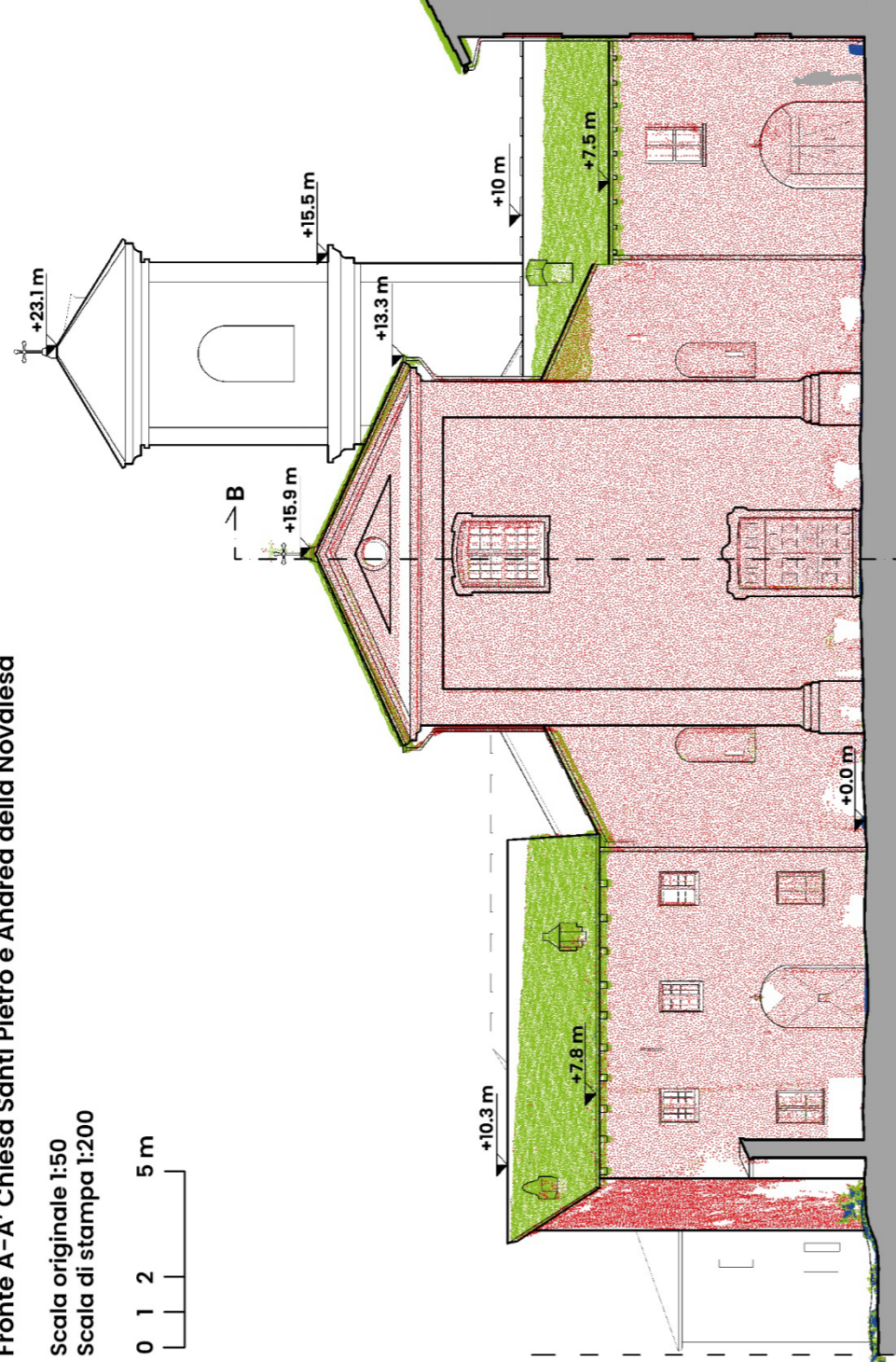
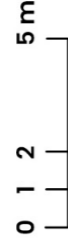
Porzione pianta sagrato abbazia della Novalesa



Fronte B-B'

Fronte A-A' Chiesa Santi Pietro e Andrea della Novalesa

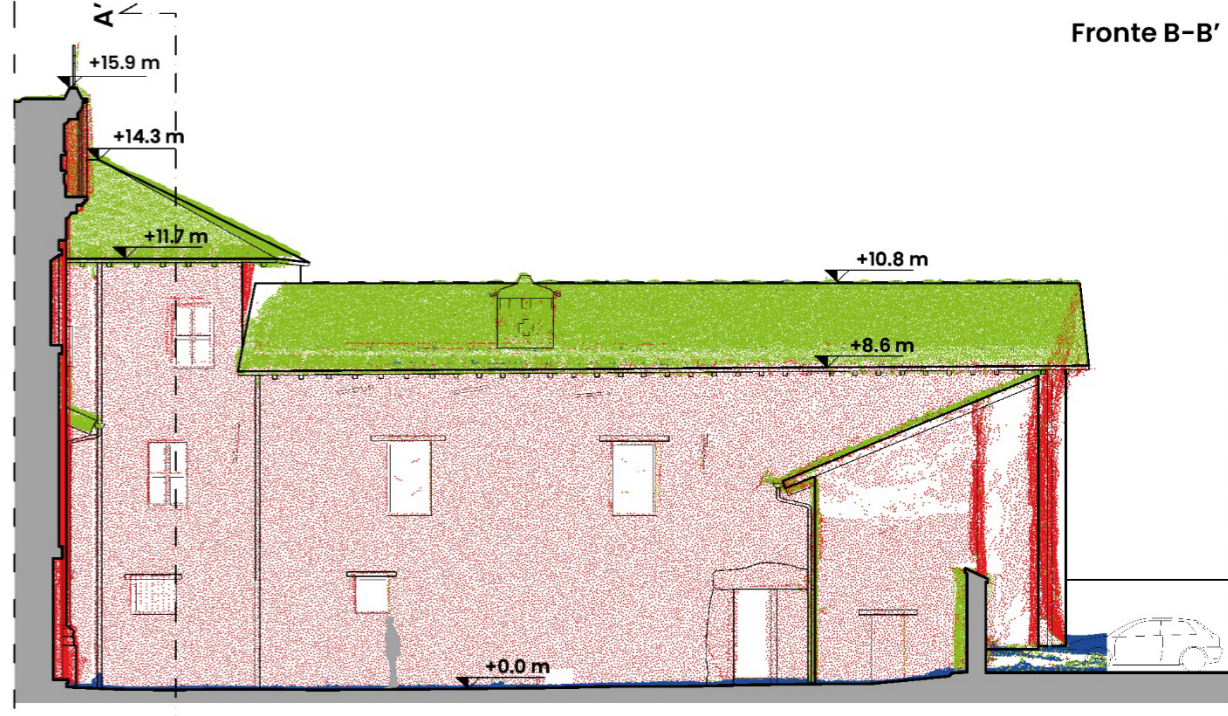
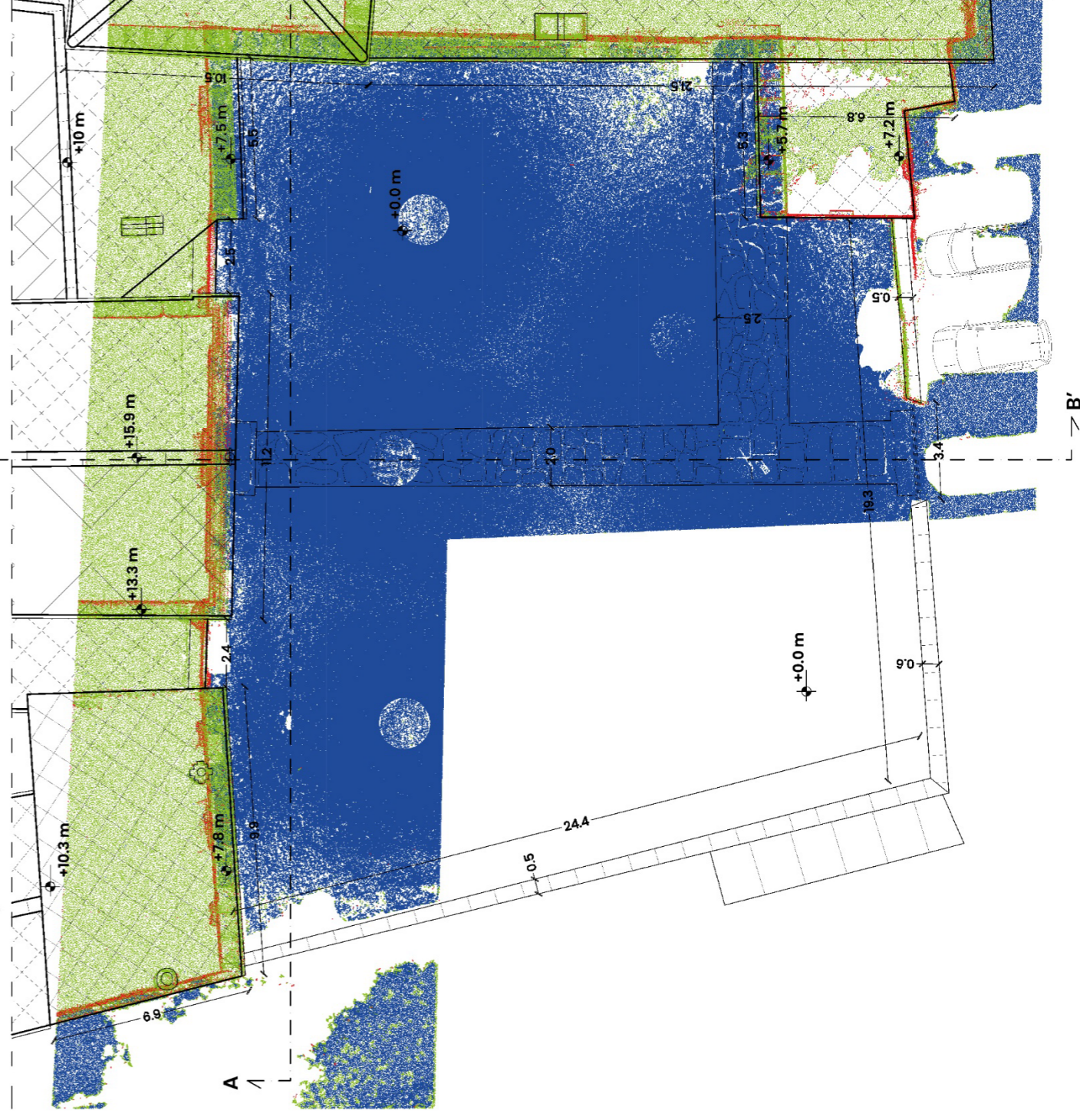
Scala originale 1:50
Scala di stampa 1:200



Classi	
0	suolo
1	coperture
2	elementi verticali

Classificazione algoritmo RF4PCC a 3 istanze

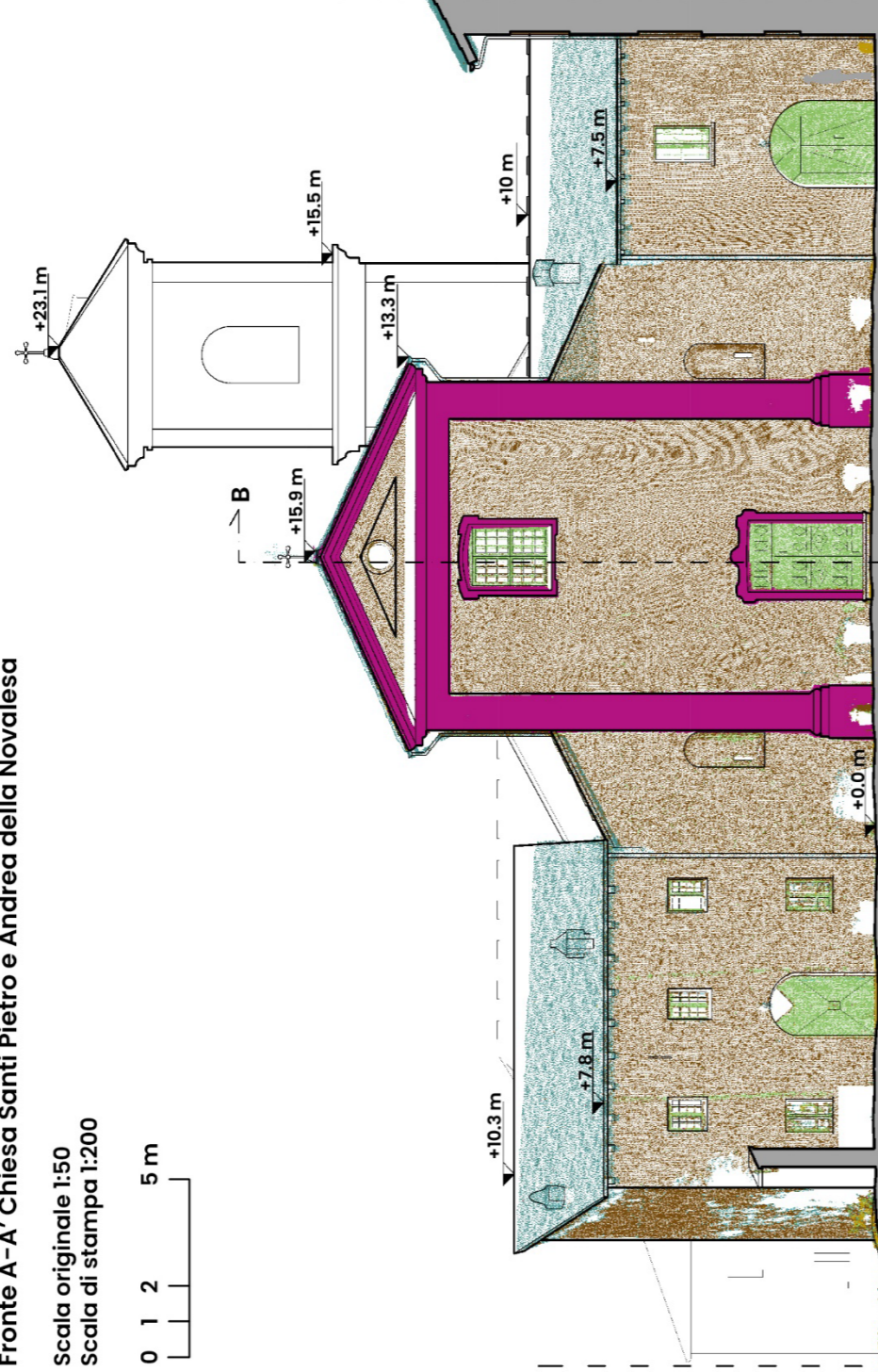
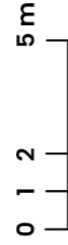
Porzione pianta sagrato abbazia della Novalesa



Fronte B-B'

Fronte A-A' Chiesa Santi Pietro e Andrea della Novalesa

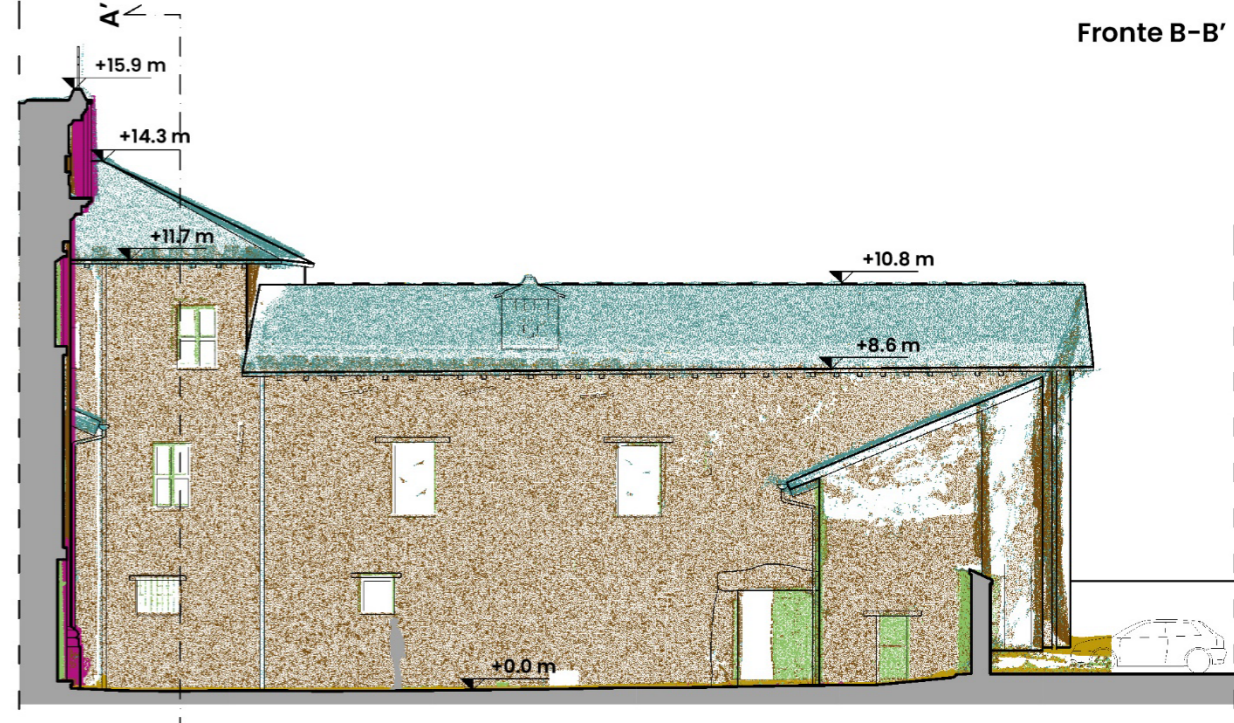
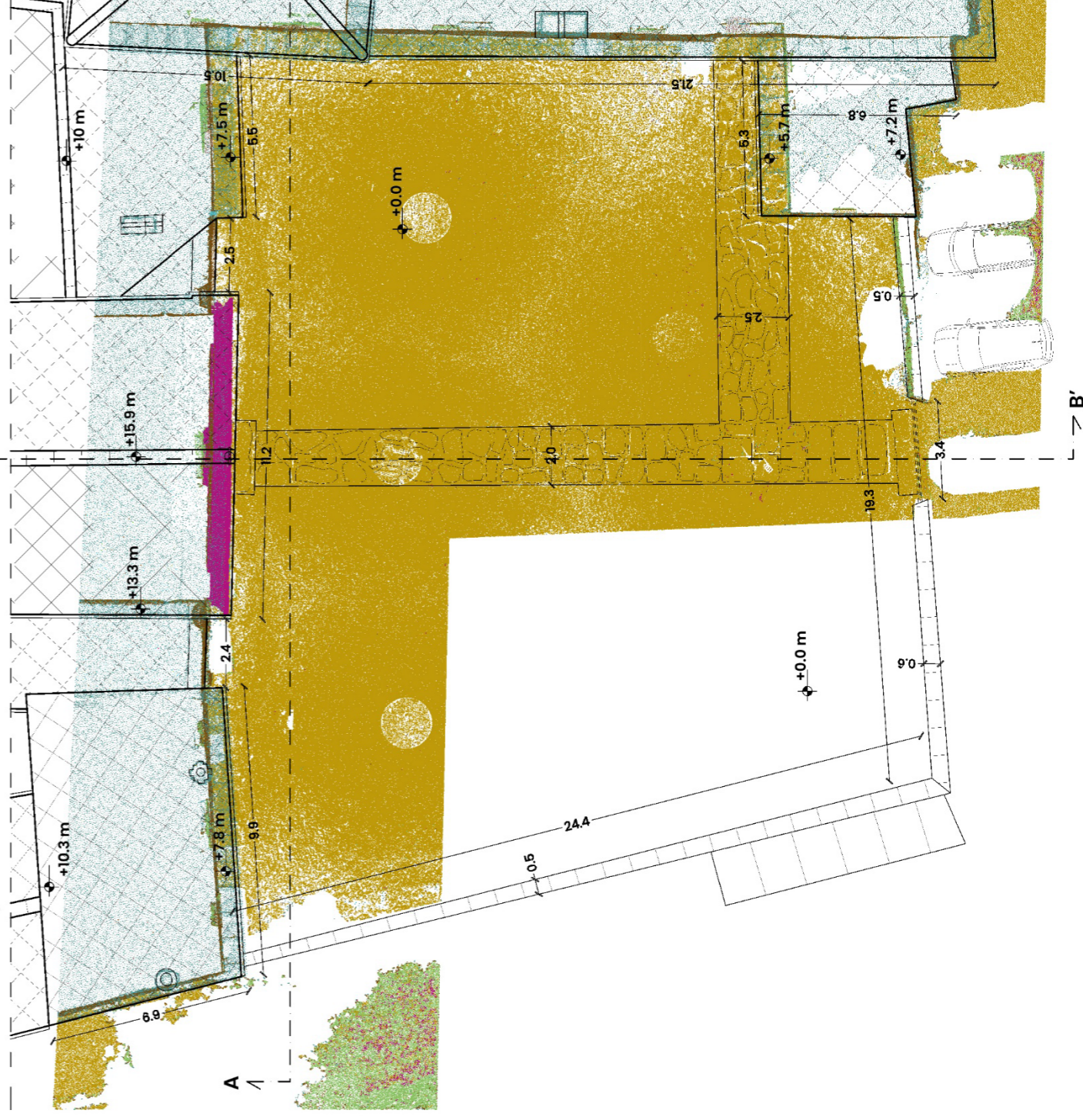
Scala originale 1:50
Scala di stampa 1:200



Classi	
0	molding
1	floor
2	door window
3	wall
4	stair
5	roof
6	other

Classificazione algoritmo RF4PCC
istanze ArCHdataset

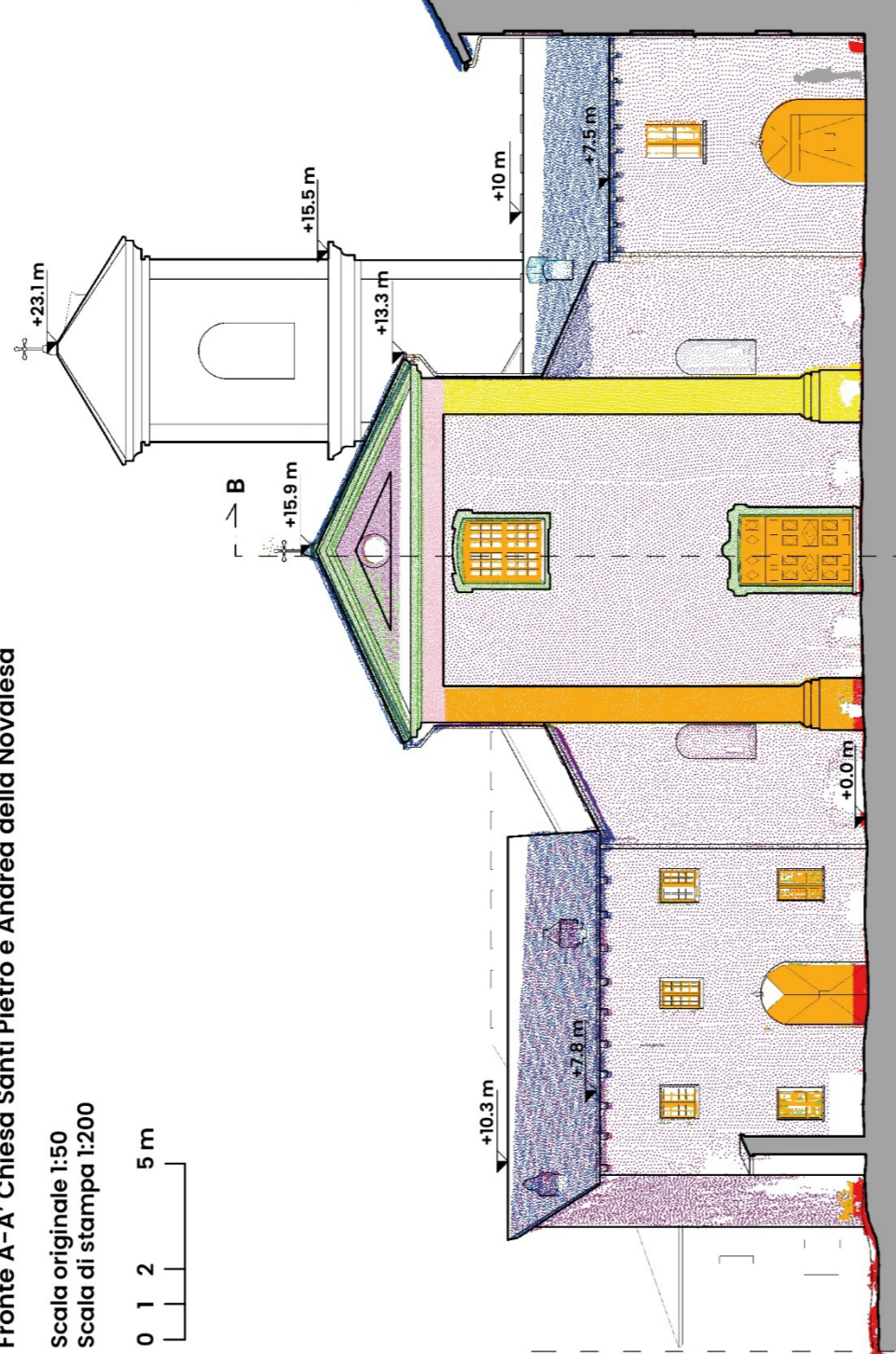
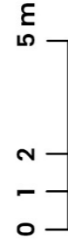
Porzione pianta sagrato abbazia della Novalesa



Fronte B-B'

Fronte A-A' Chiesa Santi Pietro e Andrea della Novalesa

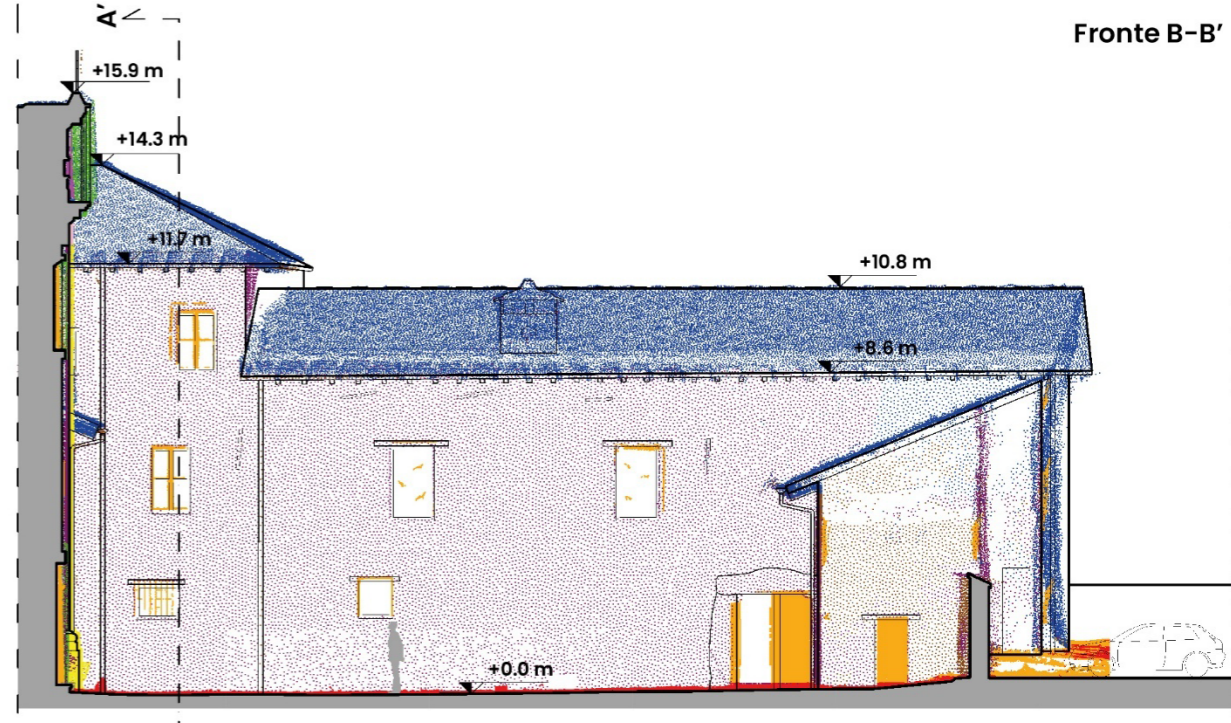
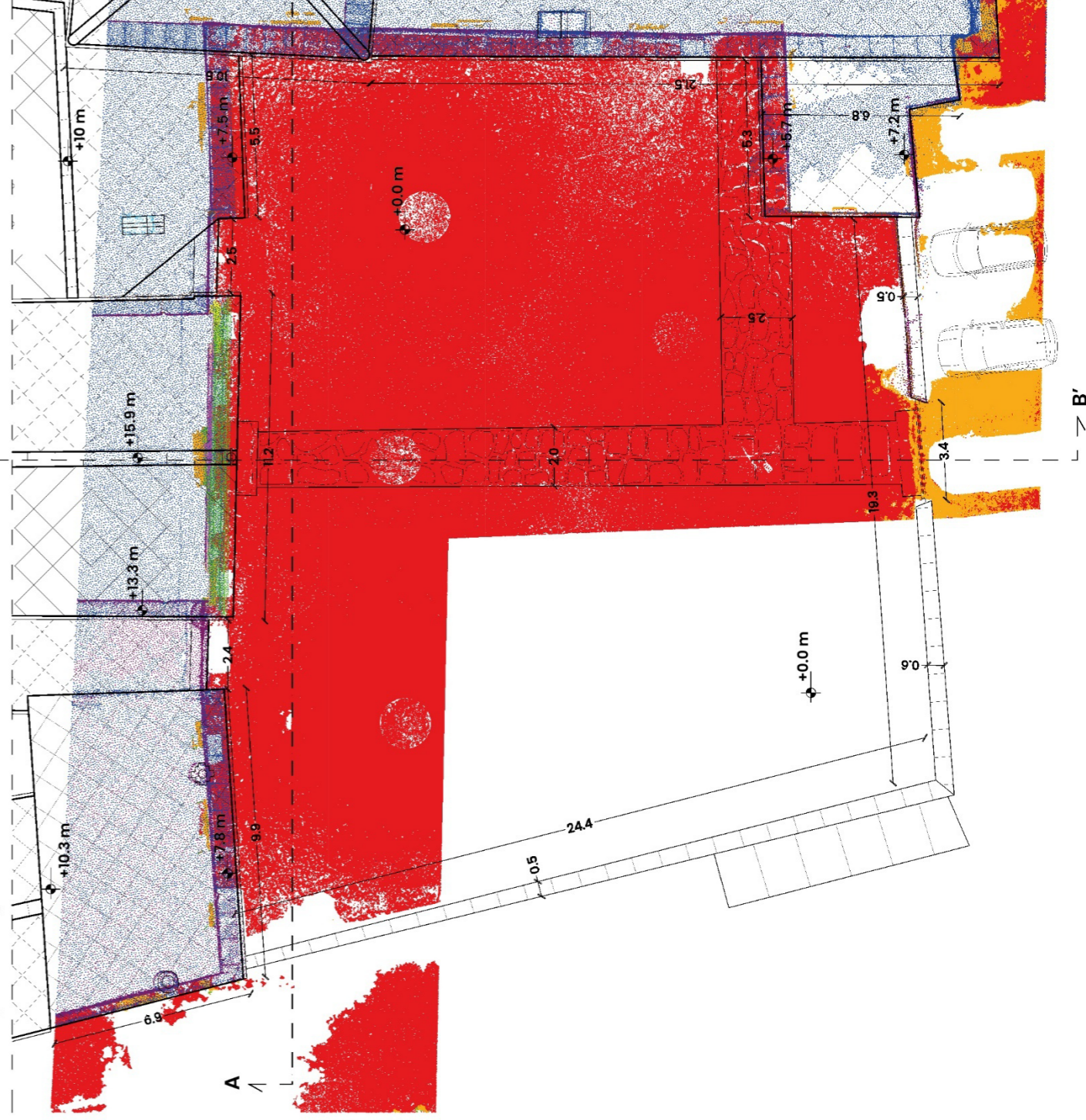
Scala originale 1:50
Scala di stampa 1:200



Classi	
0	terreno
1	bucature infissi
2	lesene
3	trabeazione
4	timpano
5	cornici
6	tetto
7	comignolo
8	monofora cieca
9	muro
10	grondaie pluviali
11	scale

Classificazione algoritmo LLM
istanze architettoniche

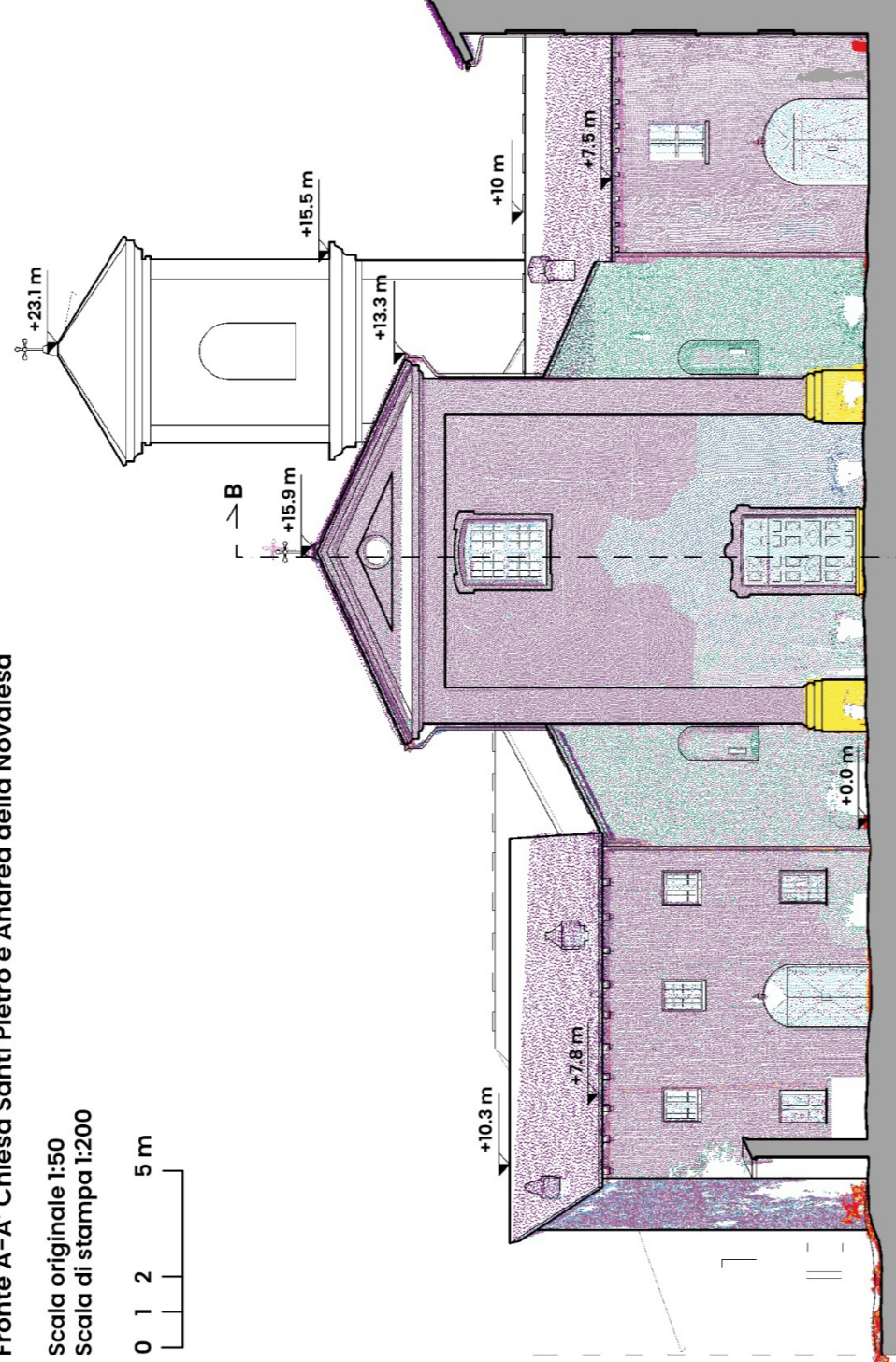
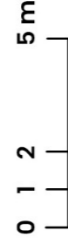
Porzione pianta sagrato abbazia della Novalesa



Fronte B-B'

Fronte A-A' Chiesa Santi Pietro e Andrea della Novalesa

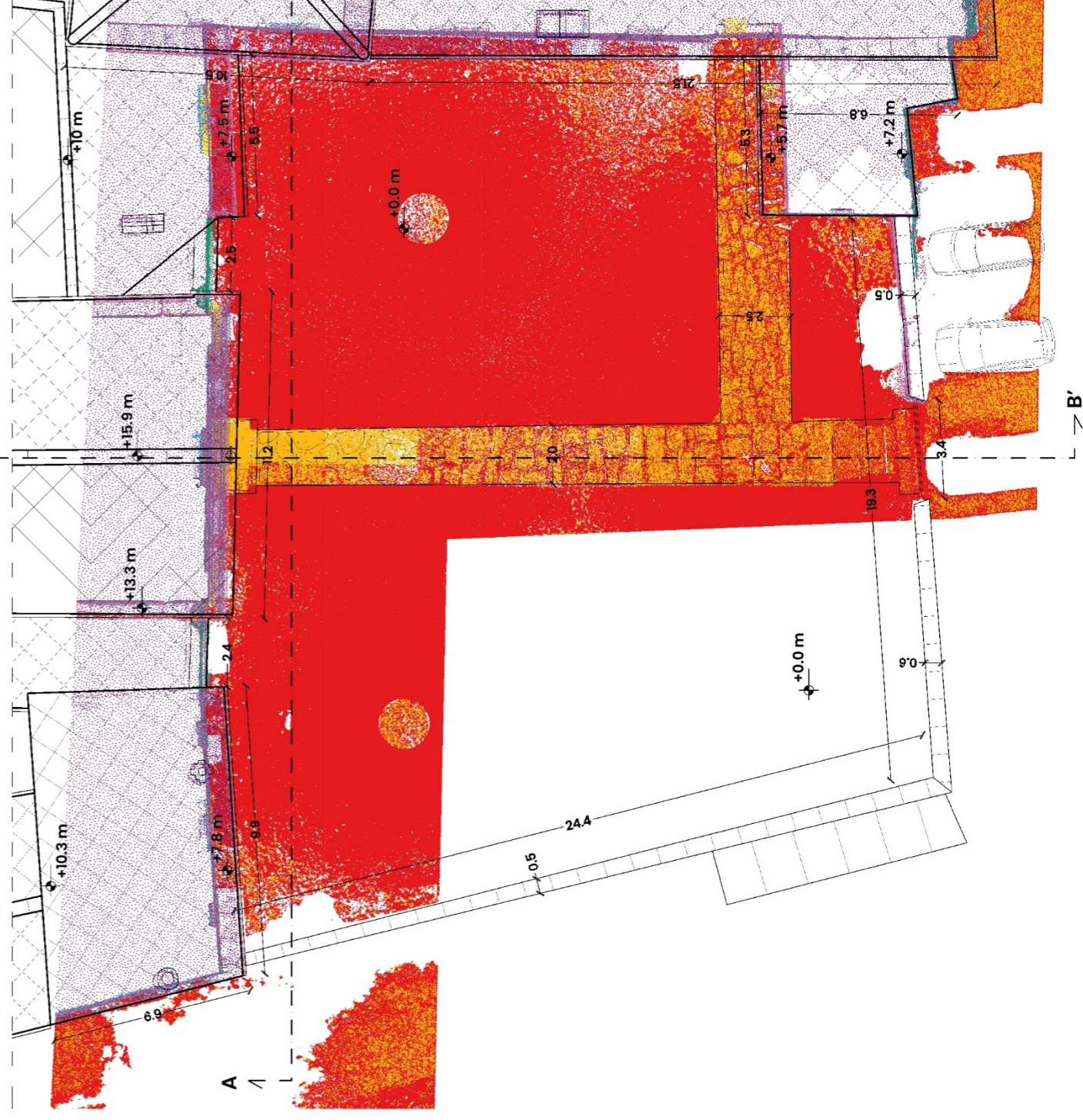
Scala originale 1:50
Scala di stampa 1:200



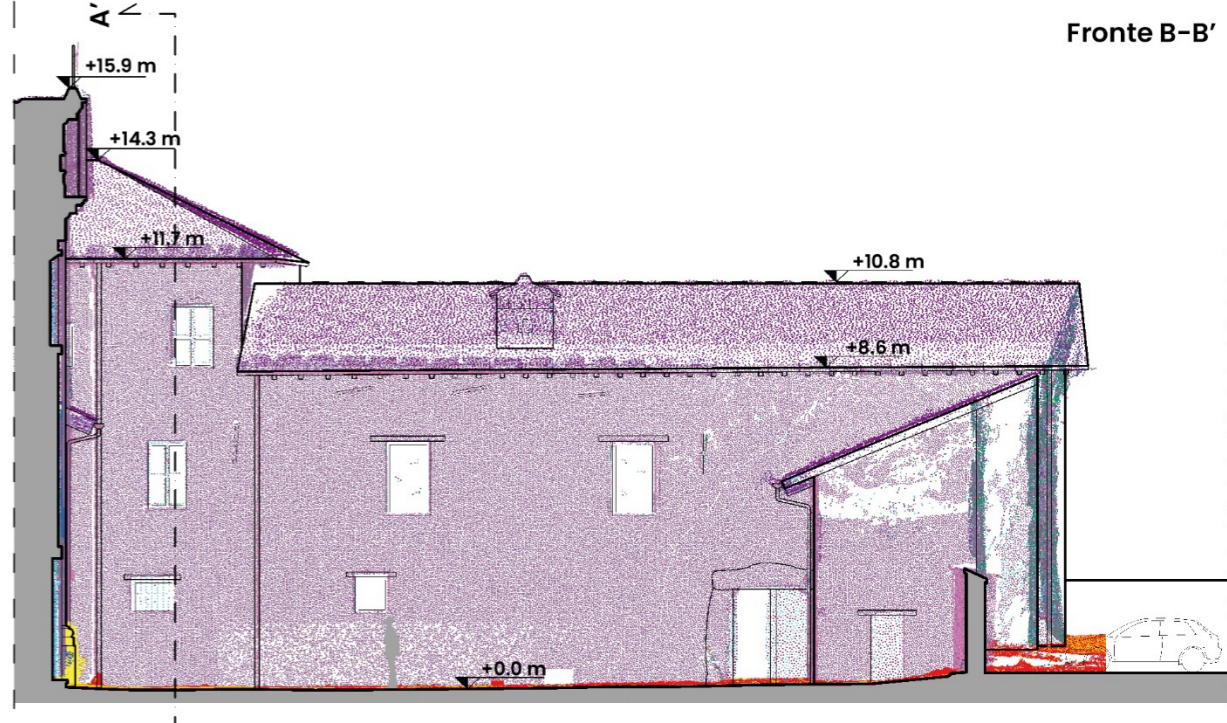
Classi	
0	pietrisco
1	selciato
2	pietra da decoro
3	grondaie pluviali in rame
4	intonaco
5	paramento murario in pietra
6	affreschi
7	infissi lignei
8	puntoni lignei
9	copertura in lose

Classificazione algoritmo RF4PCC
istanze materiali

Porzione pianta sagrato abbazia della Novalesa

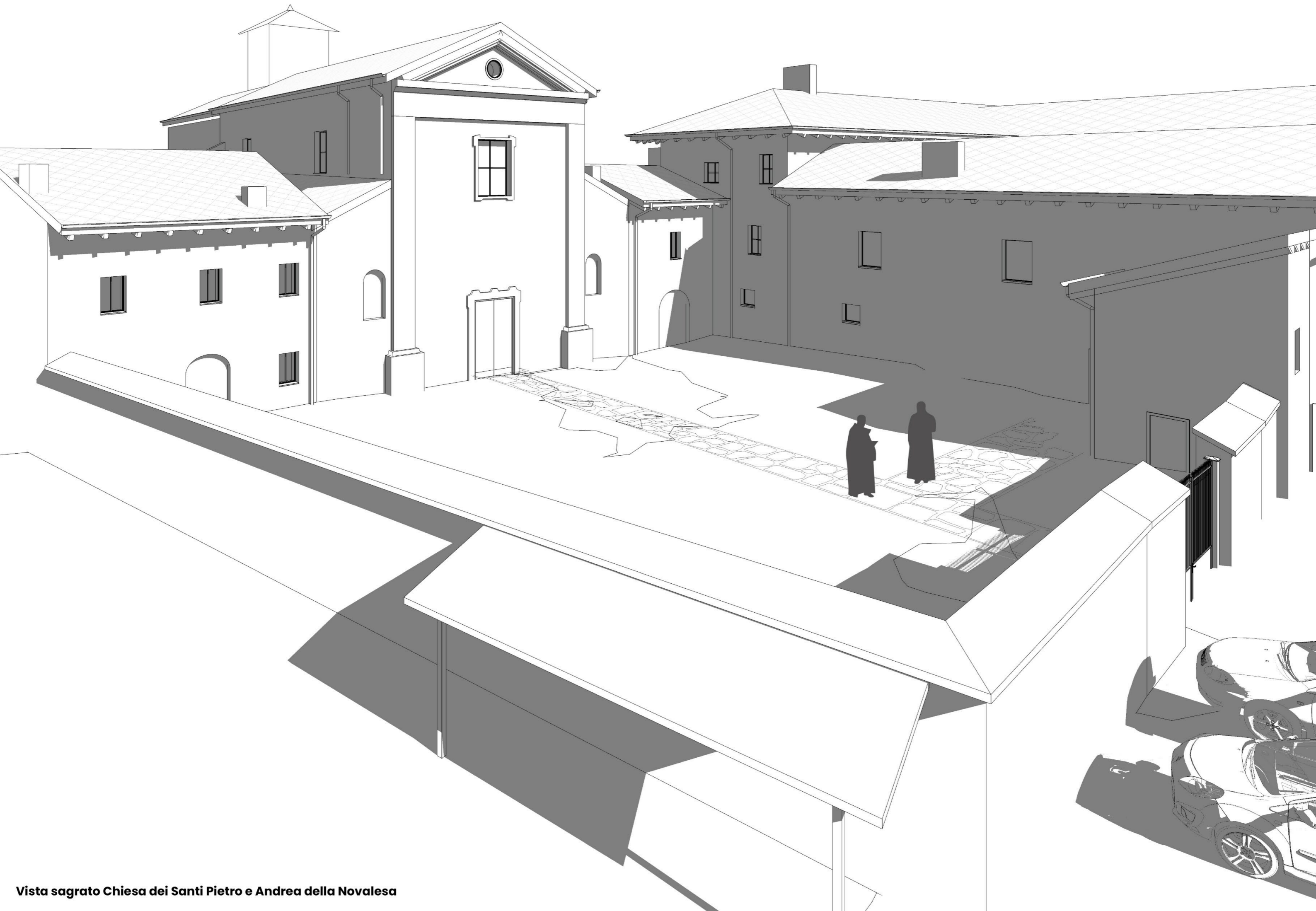


Fronte B-B'





Vista assonometrica sagrato



Vista sagrato Chiesa dei Santi Pietro e Andrea della Novalesa