POLITECNICO
MILANO 1863

Lab MGF

Metodi geomatici per il controllo delle dighe

ITCOLD

ITYP

R. Barzaghi, C.I. De Gaetani, L. Pinto, M. Reguzzoni, L. Rossi



2024

Dam Day

Dighe e serbatoi in Italia

LabMGF @ DICA PoliMI

Il **Laboratorio di Misure Geodetiche e Fotogrammetriche (LabMGF)** è un laboratorio di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA) del Politecnico di Milano.

I nostri lavori di ricerca si focalizzano sullo sviluppo di tecniche **geodetiche** e **fotogrammetriche** per applicazioni civili e ambientali.



Lorenzo Rossi
Ricercatore t.d.



Riccardo Barzaghi
Professore ordinario



Carlo De Gaetani
Ricercatore t.d.



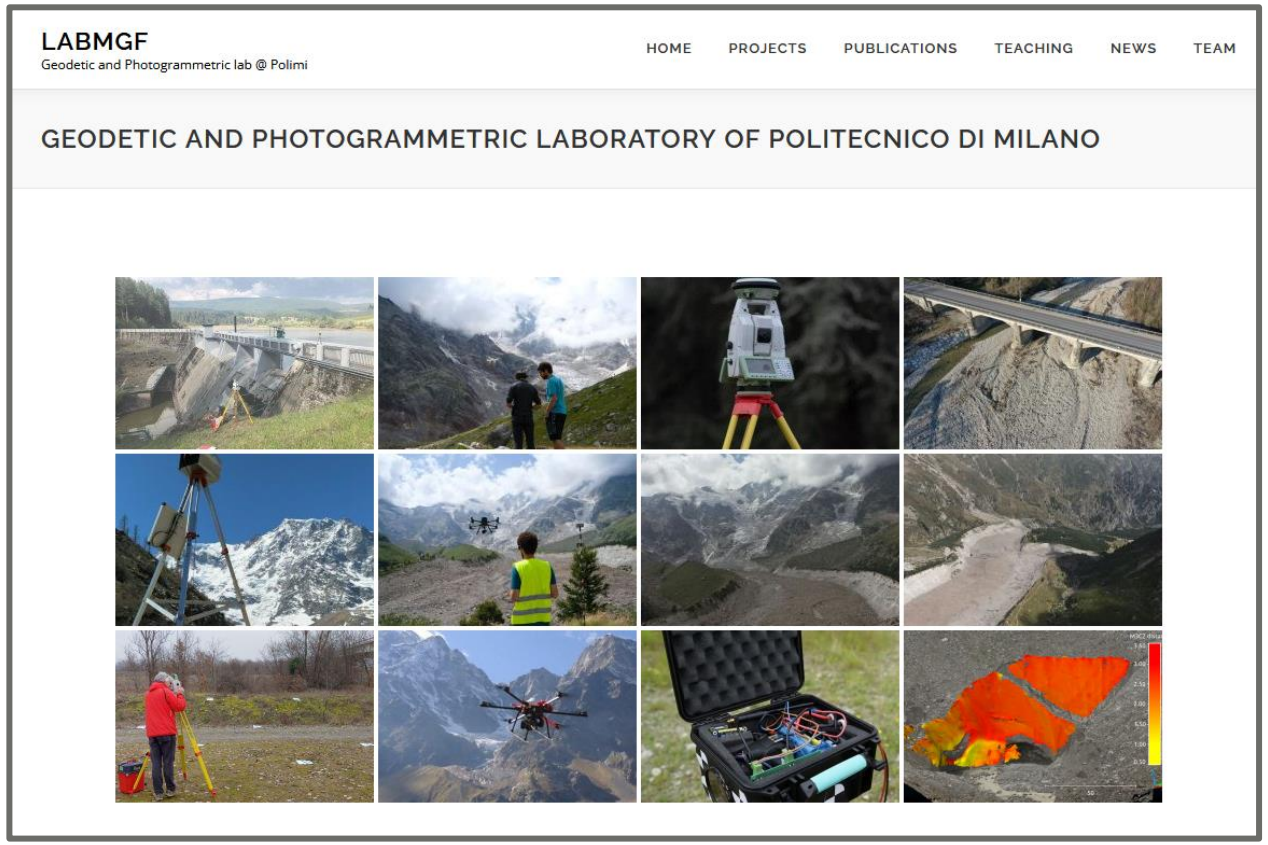
Livio Pinto
Professore ordinario



Mirko Reguzzoni
Professore associato

\+
1 assegnista
4 dottorandi

LabMGF @ DICA PoliMI



SCAN ME !

Posizionamento statico e cinematico di alta precisione

Monitoraggio di edifici e infrastrutture, territorio e deformazioni

Modellazione e **mappatura 3D** di terreni, strutture e infrastrutture

Collaudo e **verifica** della cartografia e dei database geografici

RILIEVO, ISPEZIONE E MONITORAGGIO DELLE DIGHE CON METODI GEOMATICI

Rilievo e ispezione

Determinazione della geometria con alta risoluzione e precisione ed ispezione visiva dello stato di fatto del/dei manufatti

Monitoraggio delle deformazioni

Determinazione degli spostamenti e delle deformazioni geometriche di medio/lungo periodo della struttura con elevata precisione



Metodi classici

Stazione totale
Livellazione geometrica

Metodi fotogrammetrici

Fotogrammetria da terra/drone
Laser Scanner da terra/drone

Metodi satellitari

GNSS
SAR

RILEVAMENTO DIRETTO

Il rilievo delle strutture viene eseguito in tre modi per garantire la **qualità e completezza geometrica** del rilievo.

- Con **Multistation** (stazione totale con funzioni di misurazione della nuvola di punti tramite laser scanner) secondo uno schema geometrico di rilievo topografico classico,
- con **laser scanner terrestre e/o da drone**,
- con **fotogrammetria terrestre e/o da drone**.



(Gaspari et al, 2022)

RETE TOPOGRAFICA E MISURE LASER SCANNER



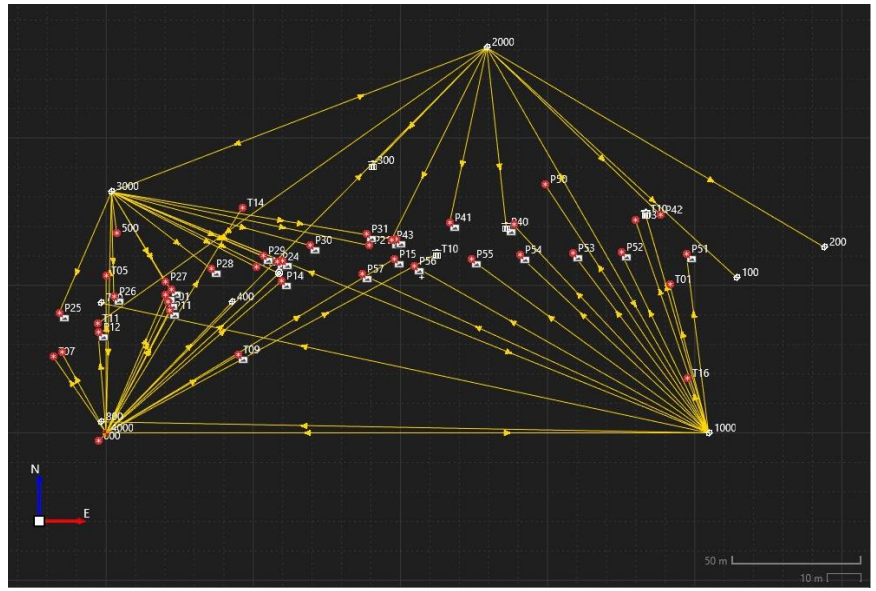


Un rilievo topografico tradizionale richiede una **rete di punti** materializzata, rilevata e compensata rigorosamente in modo statistico, ed inquadrata in un sistema cartografico.

La rete topografica viene realizzata utilizzando una **stazione totale** per determinare le coordinate dei punti di scansione e dei target di riferimento.

La procedura di scansione e acquisizione delle nuvole di punti viene eseguita con Multistation o Laser Scanner Terrestre (TLS) di alta precisione.

Almeno 3 target sono misurati con ricevitori GNSS per l'inquadramento nel sistema di riferimento nazionale.



FOTOGRAMMETRIA DA DRONE







Il rilievo fotogrammetrico consiste nel suddividere l'acquisizione delle immagini in due blocchi:

- un **volo nadirale** (1-2 cm Ground Sample Distance), utile per acquisire immagini dell'intera struttura e della morfologia del terreno circostante
- un **volo manuale**, in cui vengono rilevati gli elementi laterali della struttura. Questo blocco include immagini prese da diverse angolazioni e con GSD inferiori al centimetro, ottenendo una nuvola di punti più densa rispetto alle nuvole TLS.

I due blocchi di immagini vengono elaborati congiuntamente da un software di elaborazione fotogrammetrica tradizionale **Structure from Motion**.



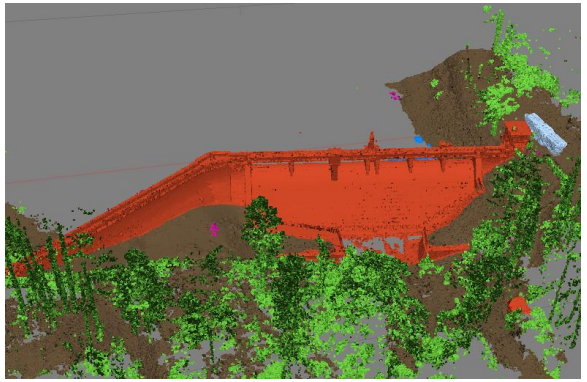
MODELLO TRIDIMENSIONALE: NUVOLA DI PUNTI

- I dati acquisiti sul campo con le diverse tecnologie vengono elaborati ed integrati tramite alcuni software specifici, che permettono anche di valutarne l'accuratezza.
- In particolare, nel caso dei dati fotogrammetrici, viene valutato l'errore medio su alcuni check point misurati anche con la stazione totale.
- La nuvole di punti risultanti da fotogrammetria e TLS vengono comparate e cross-validate nella zona di sovrapposizione attraverso tecniche di misura della distanza nuvola a nuvola (cloud-to-cloud distance).
- La nuvola di punti finale può anche essere classificata in base alle esigenze del progetto.

RGB



Classificata





ISPEZIONE SU MODELLO TRIDIMENSIONALE

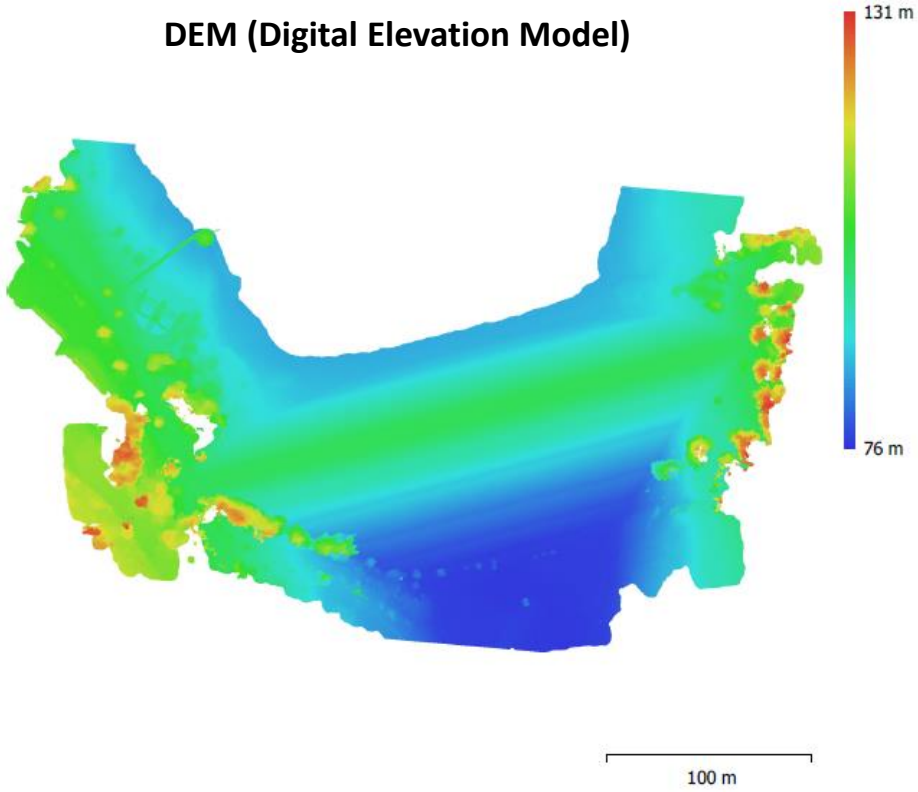


Il modello tridimensionale può essere ispezionato a partire dalle immagini acquisite, permettendo di evidenziare e valutare eventuali criticità anche dal punto di vista quantitativo

MAPPE E CARTOGRAFIA

Immagini, **TLS**, **LiDAR** e altri sensori, integrati su **UAV** per l'acquisizione dei dati e la georeferenziazione con le osservazioni **GNSS**, garantiscono la realizzazione di **prodotti 2D** dettagliati quali ortofoto e modelli digitali di elevazione (con risoluzioni centimetriche).

DEM (Digital Elevation Model)

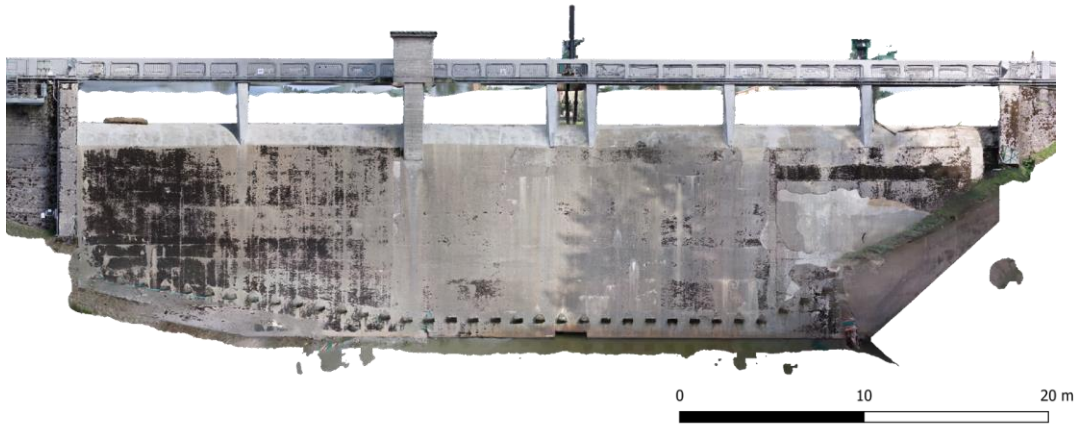


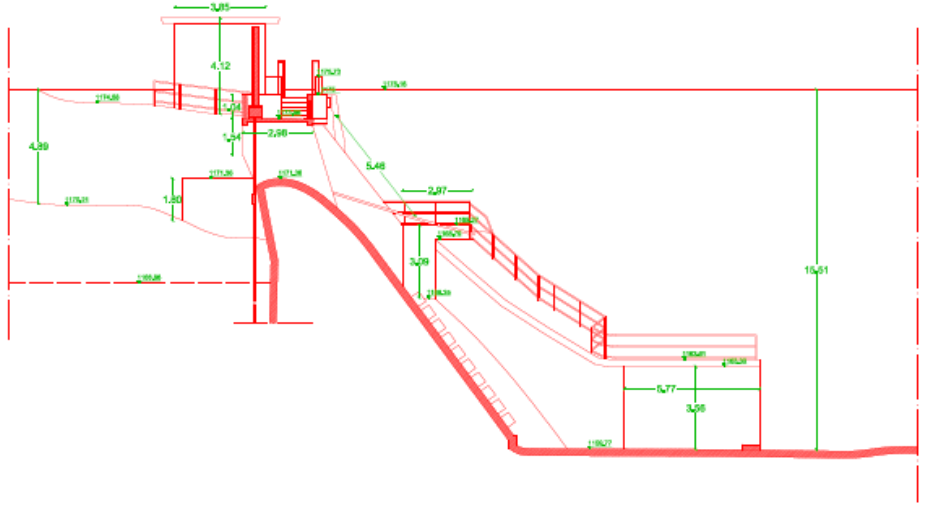
Ortofoto

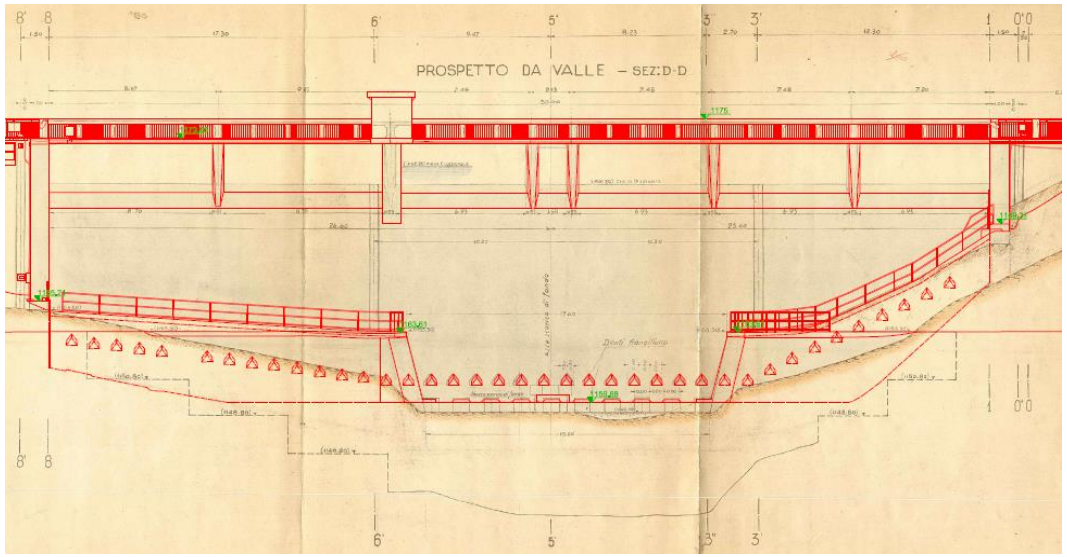


RAPPRESENTAZIONE DELLO STATO DI FATTO

A partire dalle nuvole di punti e dalle ortofoto e modelli digitali è possibile produrre disegni CAD e modelli BIM

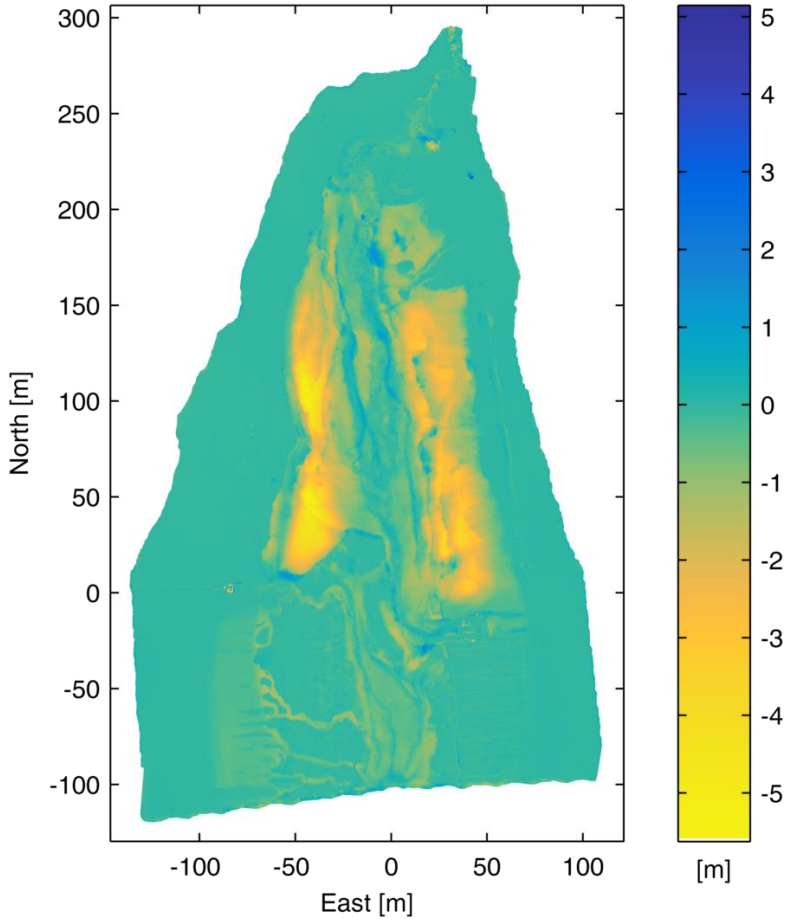






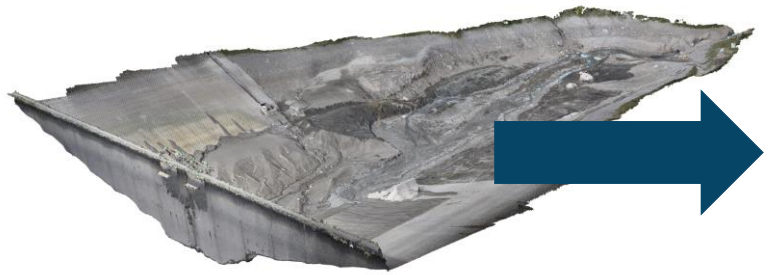
CALCOLO DI VOLUMI CON RILIEVI MULTITEMPORALI

Differenza di quota (30 vs. 21 sett.)

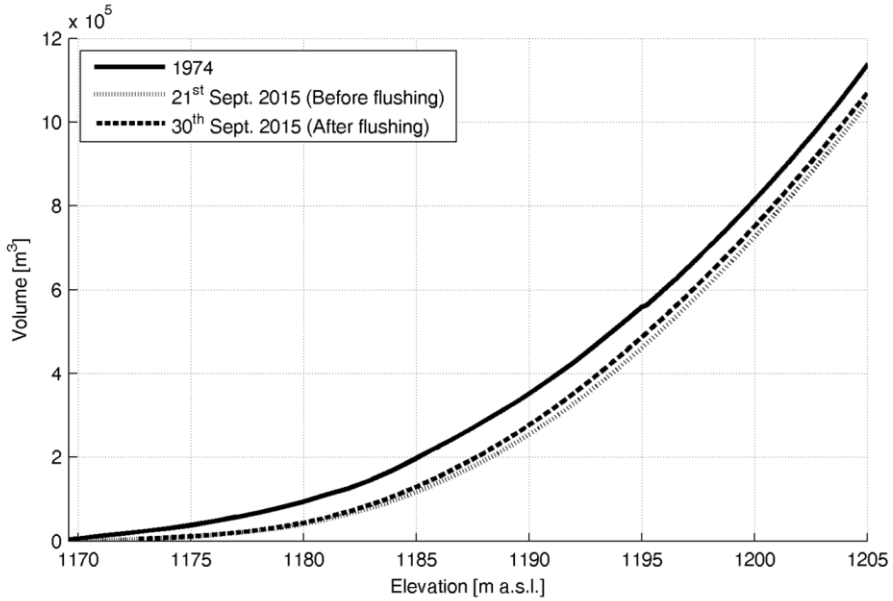


Sfruttando rilievi multi-temporali ad invaso vuoto è possibile calcolare il volume di sedimenti rimosso durante operazioni di flushing (accuratezza di stima ~2% del volume complessivo)

Avendo a disposizione il modello 3D dell'invaso, è inoltre possibile valutare l'impatto delle operazioni sulla curva di invaso



(Pagliari et al, 2016)



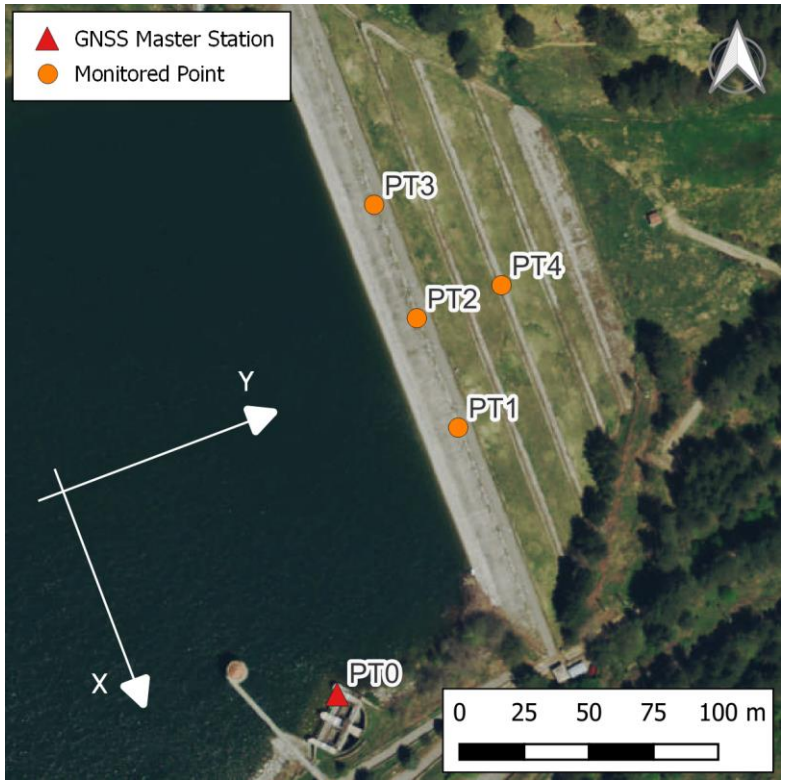
MONITORAGGIO DEFORMAZIONI CON GNSS

Lo scopo è quello di monitorare le deformazioni della struttura sul medio/lungo periodo.

Il sistema di monitoraggio è così composto:

- Antenne GNSS in punti caratteristici della struttura, ciascuna collegata al proprio ricevitore
- Antenna di riferimento situata in un punto stabile da usarsi origine del sistema di riferimento locale nel quale si monitorano le deformazioni

e permette di calcolare lo spostamento giornaliero (o su intervalli di alcune ore) medio dei punti di interesse rispetto alla stazione master.



È possibile usare strumentazione low-cost (~2000 €/punto per la strumentazione e servizio di processamento) garantendo comunque alta precisione (millimetrica o sub-millimetrica)

MONUMENTAZIONE DEI RICEVITORI/ANTENNE

- Pilastrini d’acciaio di supporto per le antenne
- Monumentazione dei pilastri su elementi resi solidali con la struttura
- Ricevitore installato fino a 50 m dall’antenna all’interno dell’unità di controllo (CU)
- Ogni CU può controllare più ricevitori, minimizzando la necessità di punti di alimentazione da rete elettrica o pannello solare
- Necessità di buona visibilità del cielo senza ostacoli in prossimità





ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI

La procedura di filtraggio e interpretazione delle serie temporali delle coordinate stimate dei punti consiste nei seguenti passi:

- Calcolo della posizione giornaliera (o su intervalli di alcune ore) di ciascun punto (rispetto alla stazione master)

- Stima del comportamento di lungo periodo per interpolazione polinomiale ai minimi quadrati, con test statistico (t-Student) per l'individuazione del grado ottimale del polinomio. Se sono significative, vengono incluse le componenti armoniche prevalenti, ad esempio con analisi nel campo delle frequenze tramite trasformata di Fourier

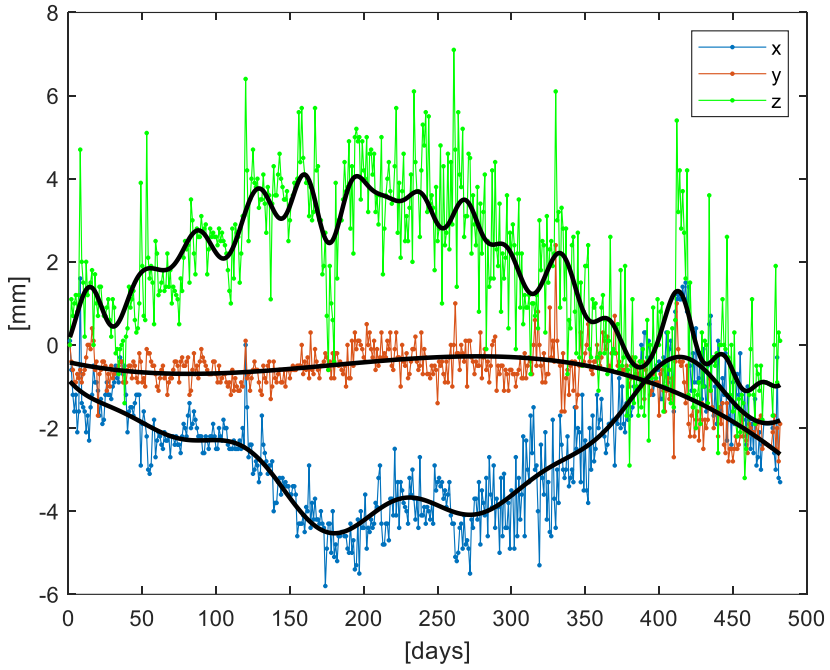
- Rimozione di eventuali outlier rispetto al modello di lungo periodo tramite test statistici

- Stima del comportamento di medio/breve periodo tramite analisi della funzione di covarianza dei residui e loro interpolazione per collocazione.

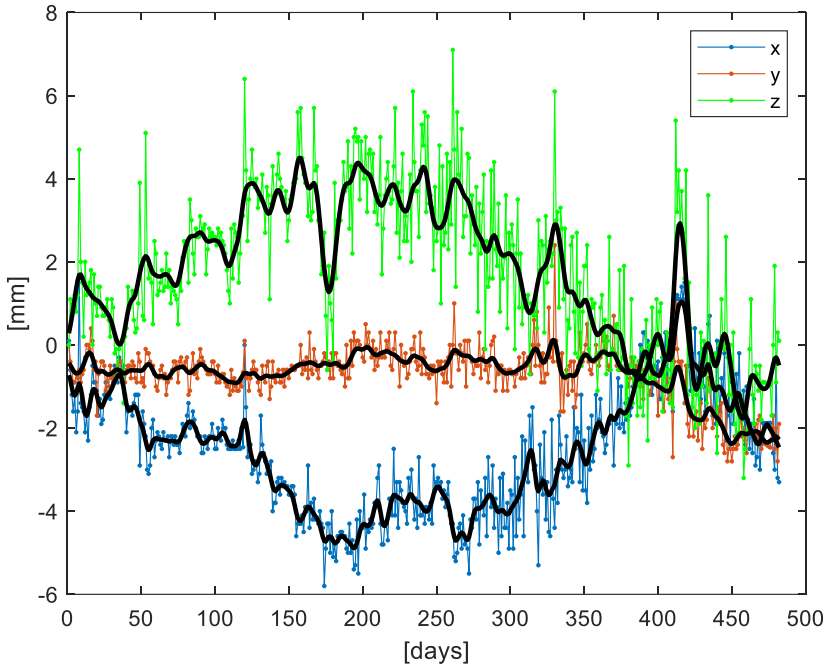
La somma dei modelli di comportamento di lungo e medio/breve periodo dà luogo ad una serie temporale filtrata che descrive il movimento del punto considerato

STIMA DELLO SPOSTAMENTO 3D PER UN PUNTO

Andamento di lungo periodo
(modello polinomiale)



Andamento complessivo
(interpolazione stocastica)



Residuals (RMS)

x 0.5 mm

y 0.3 mm

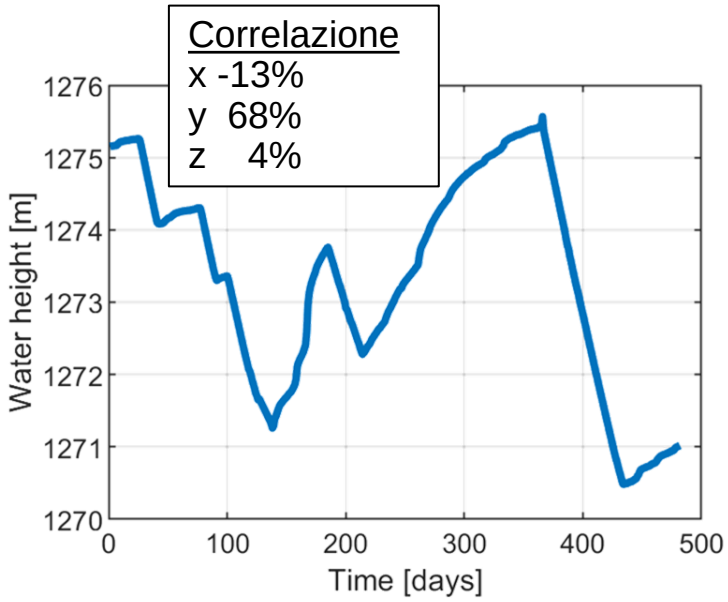
z 0.9 mm

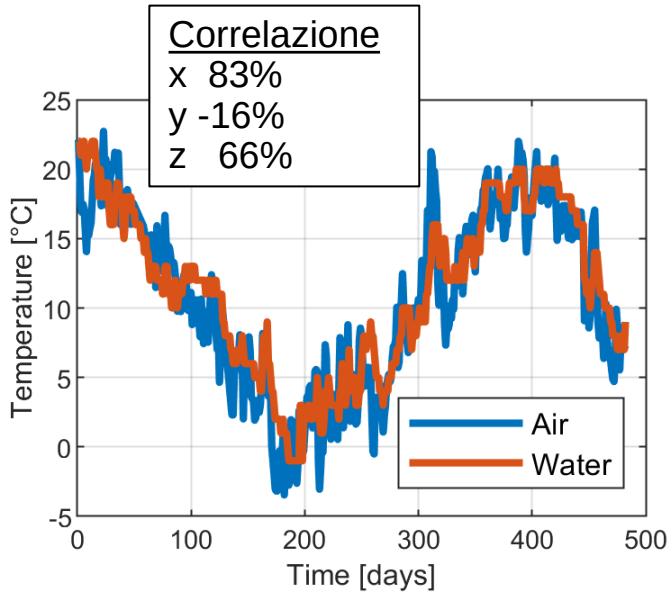
L'interpolazione stocastica permette di valutare l'effetto delle deformazioni con accuratezze millimetriche o sub-millimetriche

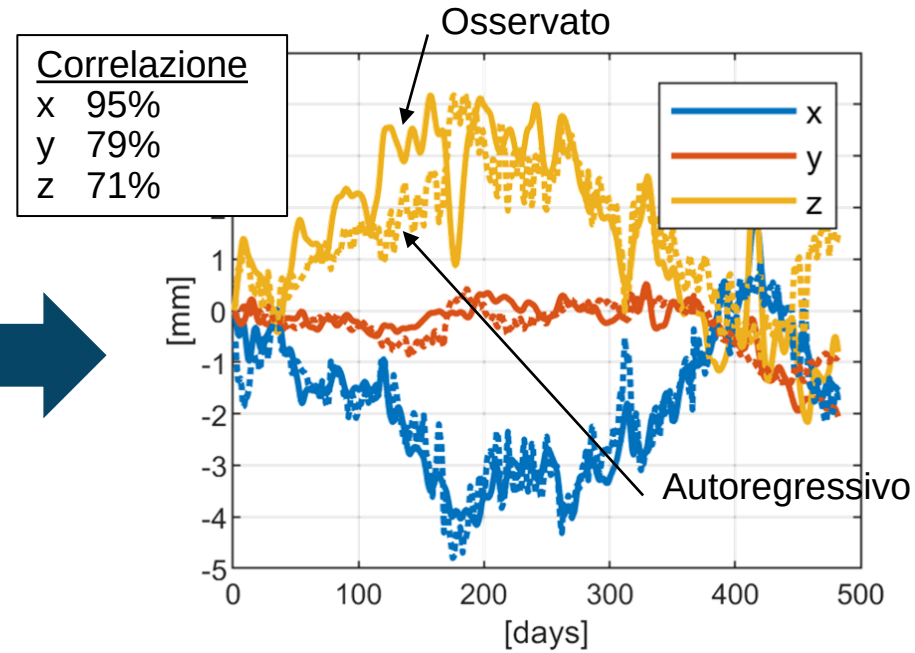
(Reguzzoni et al, 2022)

CORRELAZIONE CON DATI AMBIENTALI

È possibile correlare lo spostamento osservato del punto con dati esterni, quali il livello dell'invaso, la temperatura dell'aria o dell'acqua, ecc. attraverso modelli autoregressivi.







Valutando il valore residuo di spostamento tra il modello autoregressivo ed il modello di spostamento stimato si possono evidenziare anomalie nel comportamento della struttura

CONCLUSIONI

- Le moderne tecniche geomatiche permettono la creazione di modelli tridimensionali calcolati a partire da rilievi integrati fotogrammetrici e laser scanner con accuratezze e risoluzioni centimetriche
- Il modello tridimensionale del manufatto rende possibile la conoscenza della geometria effettiva, così come l'ispezione per la valutazione dello stato di conservazione e può essere alla base della realizzazione di un modello BIM
- Il monitoraggio delle deformazioni di lungo periodo e la loro correlazione con dati ambientali permette di valutare lo stato delle struttura e di attivare procedure di allerta in caso di anomalie riscontrate nelle deformazioni attese