

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Scienze Geologiche

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Relazione di Laurea

Morfometria della Grotta dell'Orso (Ponte di
Veja, Monti Lessini) mediante laser scanner

Candidato: Giovanni Fantini

Correlatore: Dott. Stefano Fabbri
Relatore: Prof. Jo De Waele

Sessione Marzo 2015
Anno Accademico 2013-2014

Indice

1. Introduzione
2. Area di studio
 - 2.1 Monti Lessini
 - 2.2 Sistema carsico Ponte di Veja
 - 2.3 Grotta dell'Orso
3. Materiali e metodi
 - 3.1 Luce laser
 - 3.2 Laser scanner terrestre
 - 3.3 Errori sistematici del laser scanner
 - 3.4 Progettazione della scansione
 - 3.5 Laser scanner in grotta
 - 3.6 Esperienza in campo
 - 3.7 Elaborazione dati
4. Risultati
5. Discussione e conclusioni
6. Bibliografia

1. Introduzione

E' stato eseguito un rilevamento morfometrico della Grotta dell'Orso (Monti Lessini), attraverso l'uso di un laser scanner terrestre che ci ha permesso di ottenere un modello digitale, tridimensionale della grotta. Attraverso questo modello è stato possibile studiare e ipotizzare la genesi delle forme morfologiche ed eseguire ogni tipo di misurazione dimensionale. Il laser scanning è una nuova tecnica che negli ultimi anni si è aggiunta ai principali metodi di telerilevamento e remote sensing che sono la fotografia aerea, utilizzata già nella prima guerra mondiale e il rilevamento spaziale che utilizza i satelliti. E' un nuovo strumento adibito all'acquisizione di immagini tridimensionali che permette una digitalizzazione e una modellizzazione di oggetti, oltre al rilevamento di aree geografiche aventi qualsiasi tipo di forma e dimensione. Si basa sul metodo di misurazione delle distanze attraverso l'uso di onde elettromagnetiche (LIDAR, light detection and ranging) che permettono di misurare la posizione di un elevato numero di punti. Nel campo degli ambienti ipogei il laser scanning risulta essere un valido metodo per rilevare la morfometria di superfici irregolari, sia orizzontali sia verticali, con un grado di dettaglio difficile da ottenere con le tecniche di rilievo tradizionali.

2. Area di studio

2.1 Monti Lessini

I Monti Lessini Veronesi rappresentano l'estremo promontorio prealpino della Pianura Padano-Veneta, rappresentato dal versante meridionale delle Alpi centro-orientali. Consiste in un altopiano prevalentemente carbonatico con una leggera immersione verso SO e con un'estensione di 800 Km², delimitato ad W dalla Val d'Adige, a N dalla Valle dei Ronchi, ad E dalla dorsale che separa la Valle d'Alpone dalla Valle di Chiampo ed infine, e a S dell'alta Pianura Veronese (Fig.1).

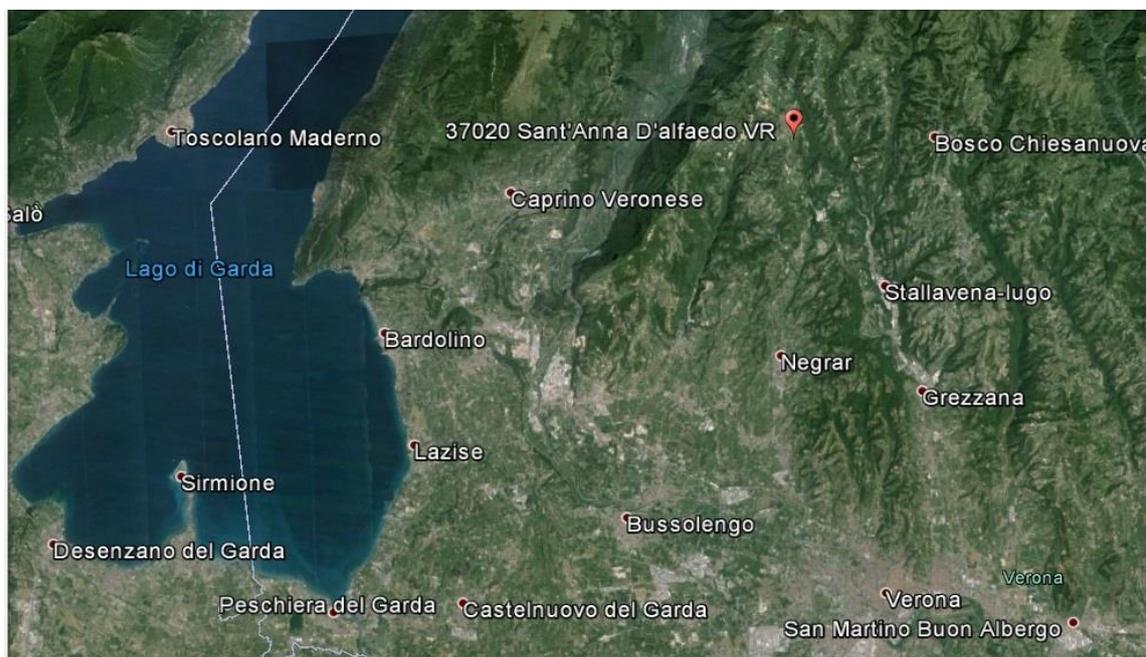


Figura 1- Inquadramento geografico Monti Lessini, Sant'Anna d'Alfaedo.

La genesi del carso è fortemente condizionata sia dalla litologia sia dalla tettonica (Sauro, 1974) che hanno formato un fitto reticolo di fratture e faglie che drenano l'acqua nelle parti più profonde del rilievo Lessineo; per questo vi è un'inconciliabilità fra la morfologia

carsica superficiale molto poco visibile e l'idrografia di tipo carsico. La geologia strutturale del rilievo Lessineo è stata interessata da un cambio di regime tettonico: nel Paleogene era presente una tettonica distensiva che ha portato alla formazione di horst e graben, mentre nel Neogene lo stile strutturale era condizionato da una tettonica compressiva che ha prodotto un accavallamento subvergente e la riattivazione di faglie dirette come faglie trascorrenti e inverse.

La stratigrafia dei Monti Lessini è costituita per la maggior parte da rocce sedimentarie di età compresa tra il Triassico e il Miocene ed hanno una potenza di oltre 1500 m. La formazione più antica è quella dei Calcari grigi (Giurassico inferiore), formata da calcareniti oolitiche in banchi localmente dolomitizzati con colorazioni che variano da marroncino, grigio e bianco con presenza di lumachelle a ostreidi. In seguito si sono depositati nel Giurassico medio i calcari del Gruppo di S. Vigilio (Zorzin et al., 2001), che presenta tre membri: alla base calcari marnosi con selce, il secondo membro è costituito da calcareniti ad oncoliti mentre il membro al tetto è costituito da calcari oolitici bianchi a laminazione obliqua. Seguono i calcari pelagici del Rosso Ammonitico (Giurassico medio/superiore) e la formazione del Biancone, calcari bianchi fittamente stratificati. Questi sono coperti verso l'alto dai Calcari Grigi, argillosi con intercalazioni di marne ed argilliti grigio verdastre. Questa formazione è stata afflitta da una forte tettonica ed è dislocata da un gran numero di faglie. Infine, affiora una formazione appartenente al Cenozoico formata dai Calcari nummulitici (Eocene inferiore/medio); la stessa è suddivisa in due unità per l'imposizione di un livello vulcanoclastico di qualche decina di centimetri. L'unità inferiore ha una fitta stratificazione piano parallela mentre l'unità superiore ha strati più spessi, che danno origine a versanti molto acclivi. I Calcari nummulitici sono caratterizzati in superficie da grandi doline con una conformazione circolare che raggiungono anche i 100 m di diametro (Sauro, 1973).

Il massiccio carbonatico dei Monti Lessini è attraversato da neck e filoni basaltici che si sono intrusi nel Paleogene. Questi depositi intrusivi si presentano spesso alterati con colorazioni che variano dal nero al

bruno scuro, inoltre affiorano prevalentemente vicino a cavità carsiche, come nel caso della Grotta dell'Orso che si è formata proprio in prossimità di un filone basaltico. Insieme a questi si sono messi in posto anche depositi vulcanici effusivi costituiti da piroclastiti ed epiclastiti basaltiche a grana prevalentemente fine, con una stratificazione fittissima. Inoltre sedimenti quaternari limoso argillosi prodotti dall'alterazione delle rocce calcaree si trovano in vallette e cavità carsiche, in alcune zone molto abbondanti. Frequentemente, tali materiali costituiscono il fondo delle doline e occludono i condotti carsici (Zorzin, 1987).

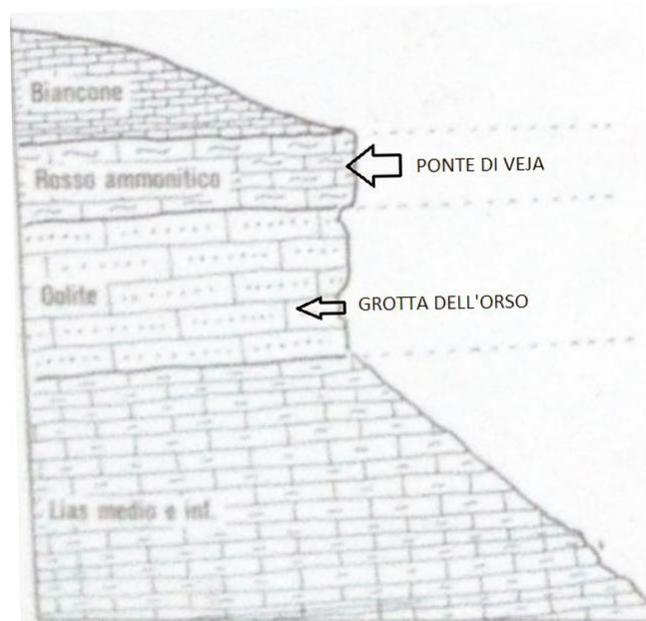


Figura 2 - Colonna stratigrafica dell'affioramento di Ponte di Veja, la freccia in alto indica la litologia che costituisce il Ponte di Veja, la freccia in basso indica la litologia in cui si è formata la Grotta dell'Orso (da Zorzin, 1987).

2.2 Sistema carsico del ponte di Veja

Il ponte di Veja è un grande arco naturale formato dai Calcari del Rosso Ammonitico Veronese che si è formato per crollo di una caverna carsica (Fig. 2); si trova ai confini del comune di Sant'Anna d'Alfaedo (VR) ad una quota di circa 650 m s.l.m. ed è uno dei più noti luoghi naturalistici presenti nei Monti Lessini. Il complesso di grotte è scavato nella formazione dei Calcari oolitici del Giurassico su cui poggia il Rosso Ammonitico che costituisce il ponte di Veja. Inizialmente il sistema carsico, secondo (Rossi e Zorzin, 1990) si sarebbe sviluppato in due settori idrologicamente separati da un dicco basaltico, visibile chiaramente solo nella Grotta dell'Orso. Seguendo l'interpretazione, il bacino idrogeologico delle cavità poste ad oriente rispetto all'intrusione basaltica sarebbe stato smantellato dall'incisione del Vajo della Marciora, che avrebbe catturato le idrografie carsiche di Veja. Il sistema di grotte è composto da svariate cavità verticali, cunicoli spesso impraticabili e ampie grotte che si collocano all'interno della circonferenza di un grande dolina da crollo che si apre sul versante destro del Vajo della Marciora.

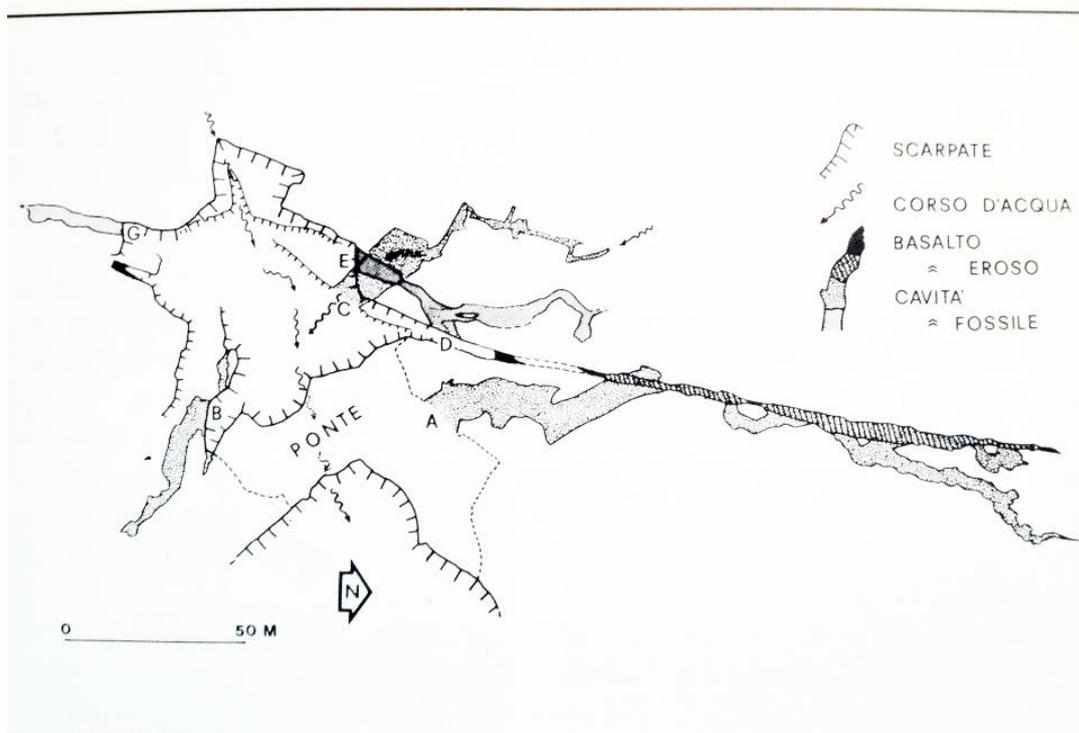


Figura 3 - Pianta del sistema carsico di Veja. Da Rossi e Zorzin (1990).

Tra le grotte che si affacciano sul perimetro di questa grande depressione da crollo ci sono la Grotta dell'Orso (A, Fig.3) che è la cavità più grande ed è l'unica nella quale si può vedere chiaramente il dicco vulcanico, la grotta dell'Acqua (C, Fig.3), la sola con perenne circolazione idrica, la grotta superiore (E, Fig.3), la grotta B (Fig.3) e la Cava d'Ocra (G, Fig.3).

2.3 La Grotta dell'Orso

La Grotta dell'Orso si apre nel versante sud della depressione carsica che si instaura nel Vajo della Marciora, nella formazione dei Calcari oolitici di S.Vigilio (Giurassico). L'ingresso della grotta si apre esattamente sotto il Ponte di Veja ad una altezza di circa 600 m s.l.m.; questa si estende in direzione N-S per tutta la sua lunghezza, circa 180 m, con un assetto suborizzontale (Fig.4).

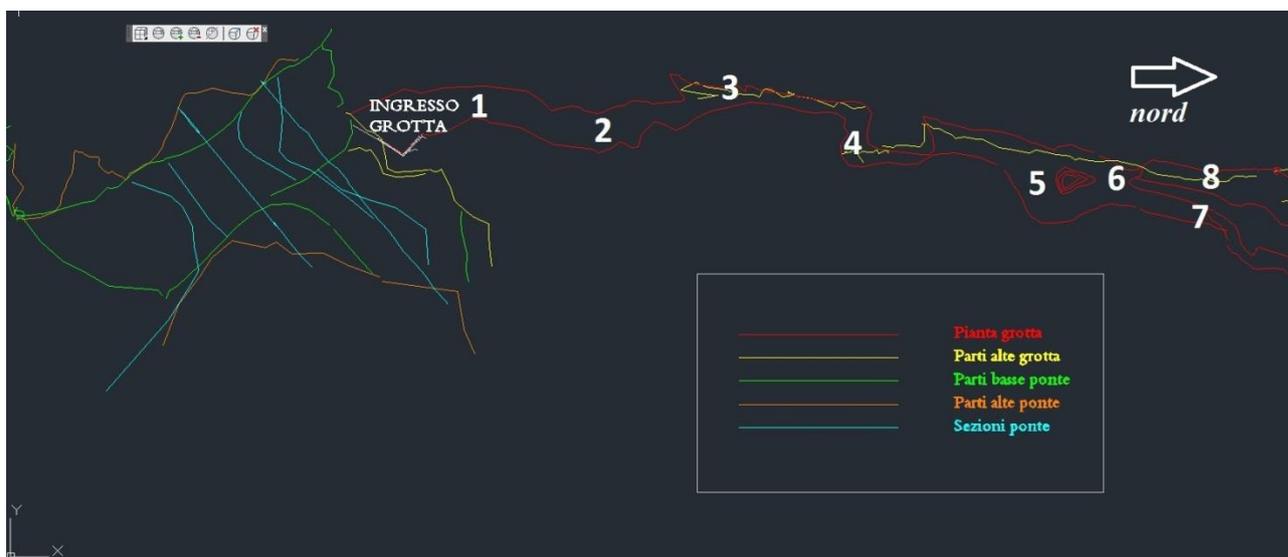


Figura 4 - Numerazione delle varie zone della Grotta dell'Orso.

Nei primi metri non sono presenti tipiche forme di ambiente carsico, come cupole o concrezioni ed il condotto non prosegue in modo rettilineo ma curva verso destra (punto 1 in Fig.4). Dopo circa 30 m dall'ingresso ci si trova davanti ad una "strettoia" (punto 2 in Fig.4) alta 1 m e con una larghezza massima di circa 8 m in cui si possono notare svariate cupole di dimensioni ridotte. Percorrendo la strettoia per circa 20 m si arriva al punto 3 (Fig.4) nella sala che si è formata in prossimità del filone basaltico. La geometria del condotto è stretta e alta ma appena fuori dalla strettoia, alla base, si presenta più allargata con due incavi, uno sulla parete di destra e uno sulla parete di sinistra che presentano una forma a semiluna con a tetto un gran numero di geometrie cupolari.

Quest'area della grotta termina con l'imposizione del dicco basaltico che arriva fino al suolo ed è qui che si ha una interruzione della cavità formatasi sul filone. Dopo un netto cambio di direzione del condotto sulla destra, ci si trova in una zona ricca di cupole. Le più grandi sono molto profonde e sono visibili i segni della colonia di pipistrelli che vi abita al suo interno. Infatti, alla base della cupola principale (punto 4) vi è un deposito di guano che si pensa abbia contribuito aumentando in quest'area la condensazione e quindi il potere corrosivo sulla volta, aumentando il volume delle cupole.

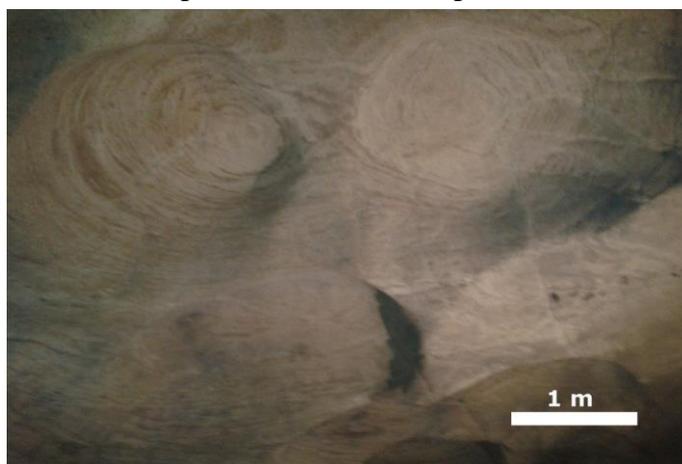


Figura 5 - Cupole di forma sferica ed ellittica.

Le cupole hanno una geometria a nicchia sferica ed ellittica (Osborne, 2004), si formano solo dopo che il condotto si svuota dal flusso d'acqua e sono il risultato dell'accumulo della condensazione in piccole cavità della roccia. La condensazione si crea per presenza di aria ed un'alta percentuale di umidità e viene resa aggressiva dalla presenza di CO_2 prodotta dall'infiltrazione di acqua proveniente dal suolo carico di materia organica e da organismi come pipistrelli. La condensa che rimane intrappolata nella cavità, carica in CO_2 e sottosatura in $CaCO_3$, agisce dissolvendo la $CaCO_3$ della roccia, ampliando sempre di più la nicchia in cui si è accumulata e producendo queste tipiche forme carsiche cupolari (Fig.5). Dopo il punto 4 (Fig.4) la grotta è formata da due condotti principali che si

compenetrano; uno è quello impostato lungo il filone basaltico ed ha una conformazione rettilinea in direzione N/S, l'altro si presenta con una geometria meandriforme e rimane sulla parte destra (rivolgendosi a nord) della grotta. In seguito (punto 5 in Fig.4) ci si trova in una sala di forma subcircolare, sul cui tetto è ben evidente l'effetto della dissoluzione per condensazione rappresentata dalla presenza di moltissime cupole di grandi dimensioni. Questa sala presenta al centro una colonna che divide la cavità del filone dal condotto di destra. Giungendo al punto 6 (Fig. 4) si ha la biforcazione a forma di Y, che divide definitivamente la grotta in due rami principali, quello del filone (ramo F) e quello di destra (ramo D) che si pensa si sia formato posteriormente al ramo F, per la presenza di un flusso d'acqua freatica, ciò è testimoniato dalla morfologia ellittica del condotto.

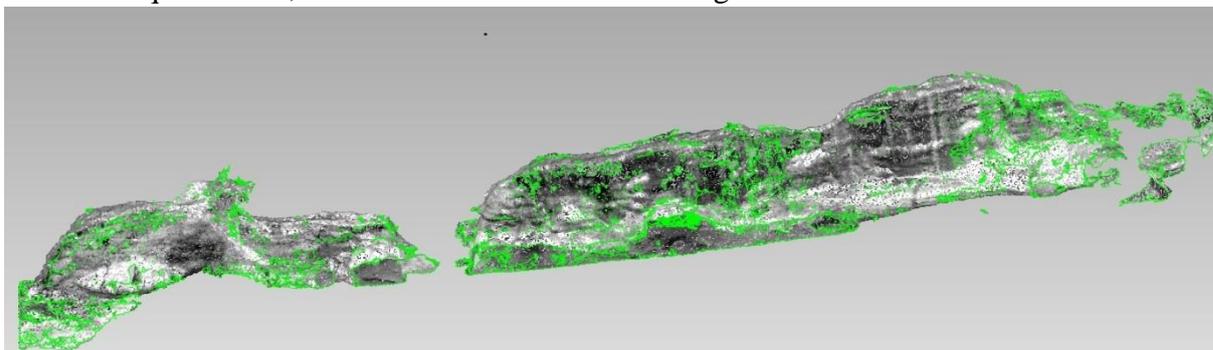


Figura 6 – Condotto del filone.

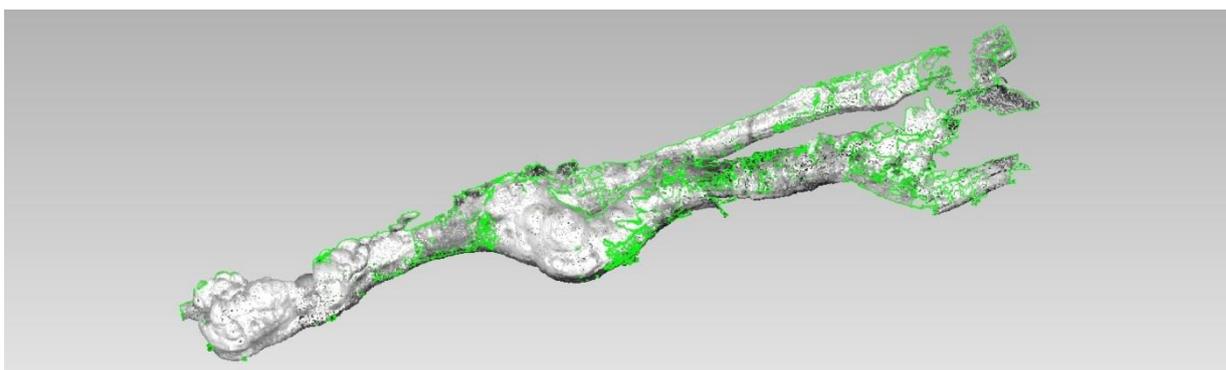


Figura 7 – Condotto di destra.

Nel ramo D si può notare la presenza di lineamenti prodotti dalla stratificazione, con geometrie tubolari, che si instaurano probabilmente lungo uno stesso giunto di strato. Questo interstrato si pensa fosse caratterizzato da flussi d'acqua che hanno portato alla formazione dei tubi. Inoltre negli ultimi metri del ramo D, dopo il punto 7 (Fig.4), si può vedere l'unico speleotema degno di nota della Grotta dell'Orso, che consiste in una colata di calcite che si è formata per scivolamento superficiale di acqua sovrassatura in CaCO_3 che precipitando ha formato questa concrezione. Le aree della grotta che si instaurano sotto al filone hanno generalmente un profilo a "V" rovesciata, quindi ha un evidente restringimento nella parte alta che termina con il filone basaltico. Il ramo F però si presenta più allargato da una concavità alla base della parete di destra, prodotta probabilmente nel momento dell'unione dei due rami. Arrivando in fondo al ramo F si è all'incirca ad una distanza, in linea d'aria, di 150 m dall'ingresso. Secondo studi eseguiti da (Rossi e Zorzin, 1990) l'età dell'intrusione basaltica risulta di 38.2 milioni di anni con un errore di circa 1.6 milioni di anni, che corrisponde all'Eocene superiore. Dallo studio della morfologia della grotta, si presume che l'intrusione si sia iniettata in una cavità preesistente, ma che poi, a causa di una successiva ripresa della carsificazione sia stata erosa nuovamente.

3. Materiali e metodi

3.1 Luce laser

La tecnica del remote sensing è divisa in due branche principali, passiva e attiva. La prima si basa sulla possibilità di catturare le radiazioni di catturare la radiazione elettromagnetica ambientale emessa dai diversi oggetti, attraverso ad esempio in materiali fotosensibili, quella attiva invece include la possibilità di emettere radiazioni, e leggerne poi il segnale di ritorno. Dal principio, ipotizzato per la prima volta da A. Einstein nel 1917, secondo cui è possibile energizzare un atomo con un raggio di luce ad alta energia prodotta da un raggio di luce a una certa frequenza, è stata possibile l'invenzione del raggio laser. Il L.A.S.E.R., termine che deriva dall'acronimo di "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" è una apparecchiatura che trasforma una forma di energia (elettrica, ottica, chimica, nucleare o termica) in un fascio monocromatica e coerente di radiazioni elettromagnetiche ad elevata intensità. Il dispositivo laser genera una luce amplificata che gli permette di distinguere le diverse lunghezze d'onda della luce che viene riflessa da qualsiasi tipo di materiale. Per raggiungere un'elevata energia luminosa questo dispositivo deve possedere determinate caratteristiche:

- Emissione di luce con un solo tipo di frequenza ovvero, deve essere monocromatica.
- La sua onda luminosa deve avere un'estrema direzionalità, ossia non si deve disperdere in tutte le direzioni in modo che possa coprire grandi distanze.
- Deve emettere luce composta da onde con la stessa frequenza e fase che, sommandosi, producono un fascio di luce ad elevata intensità e potenza (coerenza temporale).

Il laser può utilizzare diversi tipi di radiazioni luminose che possono essere, a seconda della lunghezza d'onda: ultravioletta (λ compresa tra i 200 e 400 nm), visibile (tra i 400 e i 700 nm), infrarossa (tra i 300 e i 700 nm).

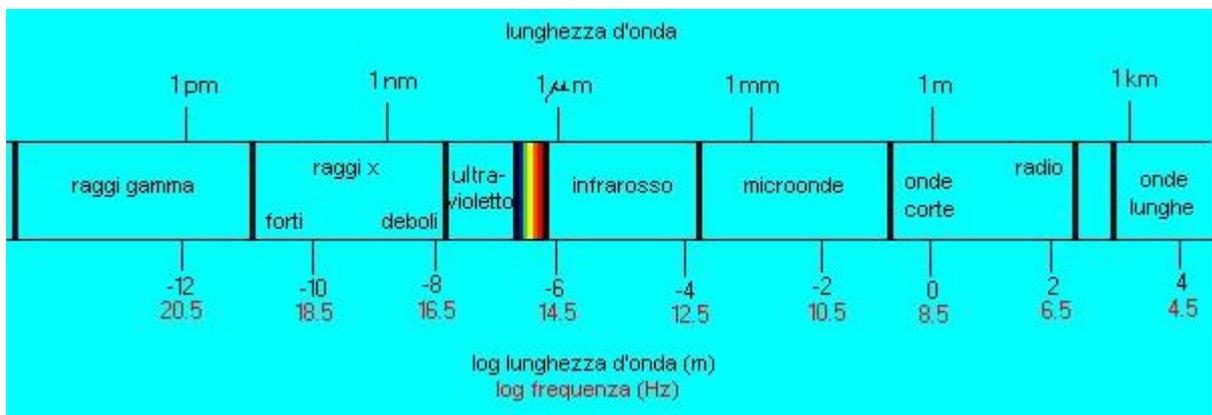


Figura 8-Schema dello spettro elettromagnetico.

Dal momento che una radiazione colpisce una superficie, viene sia assorbita sia trasmessa e in parte viene riflessa. Ogni tipo di materiale ha un rapporto diverso di assorbività (α), riflettività (ρ), trasmittività (T) che sono parametri adimensionali che dipendono dalle caratteristiche fisico-chimiche dell'oggetto e definiscono le interazioni tra energia e materia. Il dispositivo laser è sensibile al parametro di riflettività, permettendogli di definire su che tipo di materiale è stato proiettato. La riflessione dell'energia, calcolata come il rapporto tra $E_{\text{riflessa}}/E_{\text{incidente}}$, presenta due estremi diffusa o speculare, nella prima il raggio riflesso si disperde in tutte le direzioni, nella seconda forma un raggio ben definito, unidirezionale.

La differenza tra la riflessione diffusa e speculare si basa sul concetto di rugosità (criterio di Rayleigh), che dipende dalla geometria della superficie riflettente, per cui una superficie è considerata rugosa se:

$$\Delta h \geq \lambda / 8 \cos \Theta$$

dove:

Δh è la dimensione verticale media delle asperità della superficie

λ è la lunghezza d'onda della radiazione incidente (m)

Θ è l'angolo di incidenza dell'onda elettromagnetica rispetto la verticale (rad).

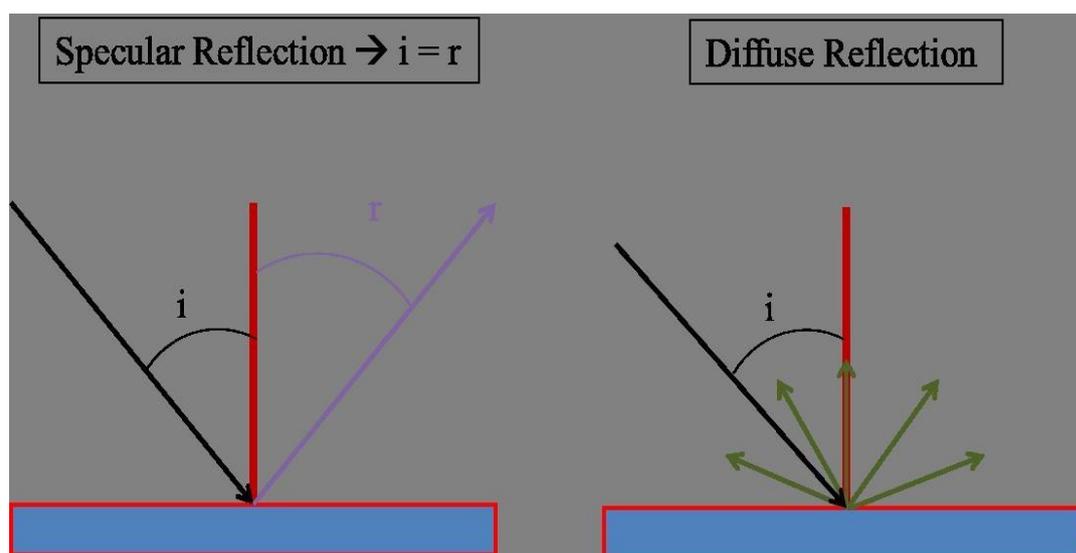


Figura 9 - Schema della riflessione speculare diffusa; i : valore angolo di incidenza, r : valore angolo di riflessione (da Fabbri, 2015).

In generale superfici perfettamente lisce riflettono in modo speculare, mentre quelle con un alto coefficiente di rugosità disperdono la luce riflessa in tutte le direzioni e vengono chiamate superfici “lambertiane”. I materiali reali, normalmente non hanno una riflessione perfettamente speculare o diffusa ma si comportano in modo intermedio (Tab. 1).

Tabella 1 - Valori significativi di riflettività per tutti i materiali comuni che si possono presentare all'interno di una scansione laser terrestre:

Materiale	Riflettività
Carta bianca	Superiore al 100%
Legno asciutto	94%
Neve	80-90%
Calcere, argilla	Superiore al 75%
Alberi a foglia	Mediamente 60%
Alberi a aghifoglie	Mediamente 30%
Sabbia	Mediamente 50%
Calcestruzzo liscio	24%
Asfalto con ciottoli	17%
Lava	8%
Neoprene di colore nero	5%
Gomma nera	2%
Plastica opaca bianca	110%
Plastica opaca nera	17%
Plastica	Mediamente 50%
Foglio riflettente tipo 3M2000X	1250%

I laser vengono classificati a seconda della natura del materiale attivo utilizzato che è, in sostanza, ciò che produce la radiazione laser. La natura di questo materiale può essere: stato solido (es. barrette di cristallo di rubino), gassoso (es. elio-neon), liquido, elettroni liberi di un plasma che producono radiazione per il movimento a spirale lungo le linee del campo magnetico e infine a semiconduttori che sono basati su una giunzione tra semiconduttori dotati di diversa conducibilità elettrica. Il semiconduttore più utilizzato è l'arseniuro di gallio (GaAs). Quest'ultimo, nell'ambito degli strumenti a scansione laser per rilevamenti geodetici è quello usato per la maggiore.

3.2 Laser scanner

La tecnica del Laser scanning viene utilizzata per il rilevamento ambientale ed è basata sulle caratteristiche dell'ottica della luce laser. Grazie a questa tecnica si è in grado di riprodurre l'ambiente in modo tridimensionale ottenendo una riproduzione digitale topografica del mondo reale. Il laser scanner terrestre oltre al campo del rilevamento morfologico-ambientale, ha una grande varietà di applicazioni: ingegneria, pianificazione del territorio, cartografia, architettura, monitoraggio del cambiamento delle dinamiche ambientali e molti altri. Lo strumento viene definito scanner poiché l'acquisizione avviene secondo specifici criteri di organizzazione dei dati raccolti analoghi a quelli degli scanner tradizionali ossia:

- capacità di operare in modo automatico e sistematico;
- velocità d'acquisizione
- possibilità di avere accesso ai dati in tempo reale.

Sono considerati scanner 3D tutti quegli strumenti in grado di acquisire le coordinate spaziali di una data regione o della superficie di un oggetto, attraverso la proiezione di un raggio laser su una superficie e analizzando il segnale di ritorno che viene calcolato basandosi sul TOF "Time Of Flight" cioè il tempo che impiega il segnale emesso a ritornare allo strumento.

Semplificando il calcolo può essere descritto come:

$$D = \text{tempo di volo} \times \text{velocità della luce} / 2$$

In questo modo lo strumento percepisce la distanza dell'oggetto. La sua posizione nello spazio viene poi calcolata attraverso una triangolazione che avviene all'interno dello strumento, conoscendo poi la distanza fissa tra emettitore e ricevitore del laser e gli angoli, l'angolo che si forma tra il raggio emesso e la base (segmento che unisce i due diodi, emettitore e ricevitore) dello strumento e quello che si forma tra il raggio riflesso e la base per il famoso teorema di Euclide, si può ricostruire l'intero triangolo (Fig.10).

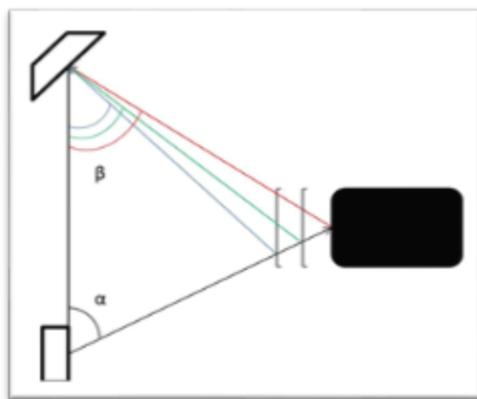


Figura 10 - Schema della triangolazione. α è l'angolo del raggio emesso, β è l'angolo del raggio riflesso calcolata dalla camera (da Fabbri, 2015).

Questo procedimento permette di ottenere le coordinate spaziali di un grande numero di punti con precisioni molto elevate (sub-millimetriche) che andranno a formare la “point cloud” ovvero una nuvola di punti ordinata nello spazio. La griglia ordinata di punti è prodotta dalla rotazione di specchi interni e dalla rotazione dello stesso strumento che permettono il movimento del raggio laser, scansionando in modo regolare l'oggetto da rilevare. Oltre alle coordinate spaziali alcuni laser scanner integrano i dati con la riflettanza che permette di conoscere il materiale soggetto della scansione in base alle differenti proprietà ottiche. Il rilevamento morfometrico della grotta dell'Orso è stato eseguito con un laser scanner CAM2 della FARO che sfrutta la tecnologia laser a infrarossi ed ha le seguenti caratteristiche (Tab. 2, Fig. 11).



Figura 11- CAM2 Laser scanner focus^{3D}

Tabella 2 - CAM2 Laser Scanner Focus^{3D}

Ranging unit	Deflection unit
Unambiguity interval: 153,49 m	Campo visivo verticale: 305° Campo visivo orizzontale: 360°
Range Focus3D: 0,6 m - 120 m indoor o outdoor con poca luce ambientale e incidenza normale su superficie riflettente (90%)	Risoluzione verticale: 0,009° (40.960 3D-pixel a 360°) Risoluzione orizzontale: 0,009° (40.960 3D-pixel a 360°)
Range Focus3D: 0,6 m - 20 m con incidenza normale su superfici opacheriflettenti >10%	Max. velocità di scansione verticale: 5820 rpm o 97 Hz
Velocità di misura: 122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000 punti/secondi	Potenza laser : 20 mW (laser classe 3R)
Errore di distanza lineare: ±2 mm a 10 m e 25 m, con una riflettività del 90% e 10%	Lunghezza d'onda: 905 nm
Rumore: 10 m - dati grezzi: 0,6 mm 90% refl. 1,2 mm (dark scan) 10% refl. 10 m - rumore filtrato: 0,3 mm 90% refl. 0,6 mm 10% refl. 25 m - dati grezzi: 0,95 mm 90% refl. 2,2 mm 10% refl. 25 m: rumore filtrato: 0,5 mm 90% refl. 1,1 mm 10% refl.	Divergenza del raggio: 0,16 mrad (0,009°) Diametro del raggio (in uscita): 3,8 mm, circular
Peso: 5,0 kg	Sensore di inclinazione a due assi: precisione 0,015°; range ±5
Dimensioni: 240 x 200 x 100 mm	

3.3 Errori sistematici del laser scanner

Lo sviluppo della tecnica del laser scanning ha offerto molti vantaggi semplificando notevolmente il lavoro nei suoi campi di applicazione. Oltre a essere automatizzata e adatta a qualsiasi tipo di superficie, non necessita della luce solare e conferisce la possibilità di ottenere un'alta densità di misure ottenendo modelli digitali con risultati molto accurati, in tempi relativamente brevi. Tuttavia questo dispositivo è affetto da errori sistematici che dipendono da quattro cause principali relative allo strumento, all'oggetto, alle condizioni ambientali, alla distorsione data dal movimento e a errori di metodo.

- **Strumentali:** errori dovuti alle caratteristiche intrinseche del dispositivo. Il primo fra tutti è dovuto ad un elevato angolo di incidenza del raggio sull'oggetto che non permette di calcolare una distanza reale del punto. Un altro errore strumentale comune si presenta durante la scansione di un angolo perché produce due impulsi differenti da ricevere, aumentando l'effetto del rumore.
- **Riflessione dell'oggetto:** il parametro di riflettanza dell'oggetto determina la qualità della misura. Ogni materiale ha un valore diverso di riflettività; quelli con alti valori di riflettanza restituiscono un range di misure precise; diversamente, se l'oggetto ha una superficie a bassa riflettanza un'ampia parte dell'energia del laser non viene riflessa indietro al sensore.
- **Condizioni ambientali:** la luce laser passa attraverso l'aria, quindi la sua velocità è fortemente dipendente dalla densità dell'aria che è influenzata da temperatura, umidità e pressione; questa può portare errori di distorsione del segnale di ritorno. L'alta temperatura può portare un surriscaldamento delle componenti interne dello strumento che dilatandosi provocano distorsioni durante il processo di scansione, oltre a questo comporta anche un aumento della temperatura della superficie che diventa una risorsa di radiazioni e può agire come fonte di rumore. Una luce ambientale intensa (ad esempio la luce solare) può ridurre il range effettivo dello scanner a distanze minori mentre con bassa luce ambientale il range può essere molto superiore. Inoltre a temperature più basse di -10°C molte componenti del laser scanner non funzionano.
- **Distorsione dovuta a movimento:** il semplice movimento del dispositivo, per mal posizionamento o per semplici cause accidentali e/o ambientali, provoca ovviamente una distorsione della scansione. Un'altra causa comune d'errore si presenta quando i target si muovono, che avviene solitamente per motivi di condizioni meteorologiche sfavorevoli.
- **Errori di metodo:** questo gruppo include errori emersi dalla scelta delle impostazioni del laser scanner, come la sbagliata definizione della densità dei punti laser o del range della scansione (Staiger, 2002).

3.4 Progettazione della scansione

La progettazione della scansione si basa su due fattori fondamentali che sono la tipologia di oggetto da rilevare e l'angolo di vista del laser scanner. Le tipologie di oggetti da rilevare possono essere:

- Oggetto convesso chiuso (es. edificio), ovvero viene rilevato dall'esterno e richiede di muoversi attorno all'oggetto per vederne ogni sua porzione.
- Oggetto concavo chiuso (es. grotta) che richiede di eseguire scansioni muovendosi all'interno dell'oggetto, prestando attenzione ad acquisire tutte le zone d'ombra.
- Oggetto concavo o convesso aperto, che richiede scansioni parallele all'oggetto; è questo il caso di cave, frane o facciate di edifici.

L'angolo di vista del laser scanner determina la definizione del numero di scansioni del rilevamento. Un laser ruotante possiede un angolo di vista di 360° (con una limitazione verticale di 60° sulla normale verso terra) e permette di diminuire molto il numero di

scansioni, soprattutto quando si ha a che fare con un rilevamento interno all'oggetto. Per eseguire un ottimo rilevamento con il laser scanner è necessario prestare attenzione a determinati accorgimenti:

- La posizione del laser scanner va scelta in modo da garantire la maggior visibilità dell'area da scansionare, ovvero ridurre al minimo la presenza di ostacoli che creino ombre sull'oggetto.
- Verificare che l'angolo di incidenza del laser sull'oggetto non sia troppo elevato, perché può accadere che il segnale di ritorno non sia corretto o addirittura non venga effettuata la misura.
- Assicurarci che ci sia una buona sovrapposizione tra le scansioni in modo da garantire la completezza del rilevamento.
- Le scansioni devono essere eseguite ad una distanza mediamente costante per far sì che ci sia una completezza geometrica del rilievo.
- Per ottenere un sistema di riferimento univoco e locale, da ogni punto di scansione dovranno essere visibili almeno tre target.

3.5 Laser scanner in grotta

Il limite più grande nell'applicazione del laser al monitoraggio ambientale, fino a qualche decennio fa era il costo e le dimensioni dello stesso strumento. La diminuzione dei prezzi e delle dimensioni dei laser scanner tridimensionali, ha portato numerosi esempi del suo uso in ambienti ipogei. Uno tra i primi esempi è rappresentato da "*New cave survey visualization methods*" di (Marais, 2005), questo progetto si limitava alla ricostruzione tridimensionale di geometrie di semplici morfologie di grotta, come anche nel progetto di studio di una grotta Paleolitica eseguito da (Gonzalez e Aguilera et al. 2009).

Successivamente la tecnica 3D del laser scanning inizia a essere utilizzata per rispondere a specifiche domande scientifiche, come calcolo dei volumi di roccia dissolta dall'effetto carsismo e dei volumi di grotte formate nei ghiacci (Milius e Petters, 2011; Petters e Milius, 2012) oppure, come nel progetto eseguito da Lyons e Baral (2012) che hanno fatto una analisi di stabilità della grotta chiamata "*coronado cave*". Con il progressivo miglioramento della tecnica del laser scanning, si è potuto rilevare anche grotte con superfici molto complesse, come nel caso delle grotte messicane di Naica (Canavese et al., 2008) dove sono riusciti a scansionare giganteschi cristalli di selenite che si trovavano all'interno della grotta. Inoltre con il laser scanner terrestre è stato possibile eseguire studi sulle popolazioni di pipistrelli in grotta (Azmy et al., 2011).

3.6 Esperienza in campo

Nel giorno di lunedì 29 Dicembre 2014, l'autore ed uno staff formato da Stefano Fabbri correlatore della presente tesi e dottorando dell'Università di Bologna, Francesco Sauro e speleologi Veronesi, si sono recati al Ponte di Veja (Fig.12) che si trova nel comune di Sant'Anna d'Alfaedo (VR).

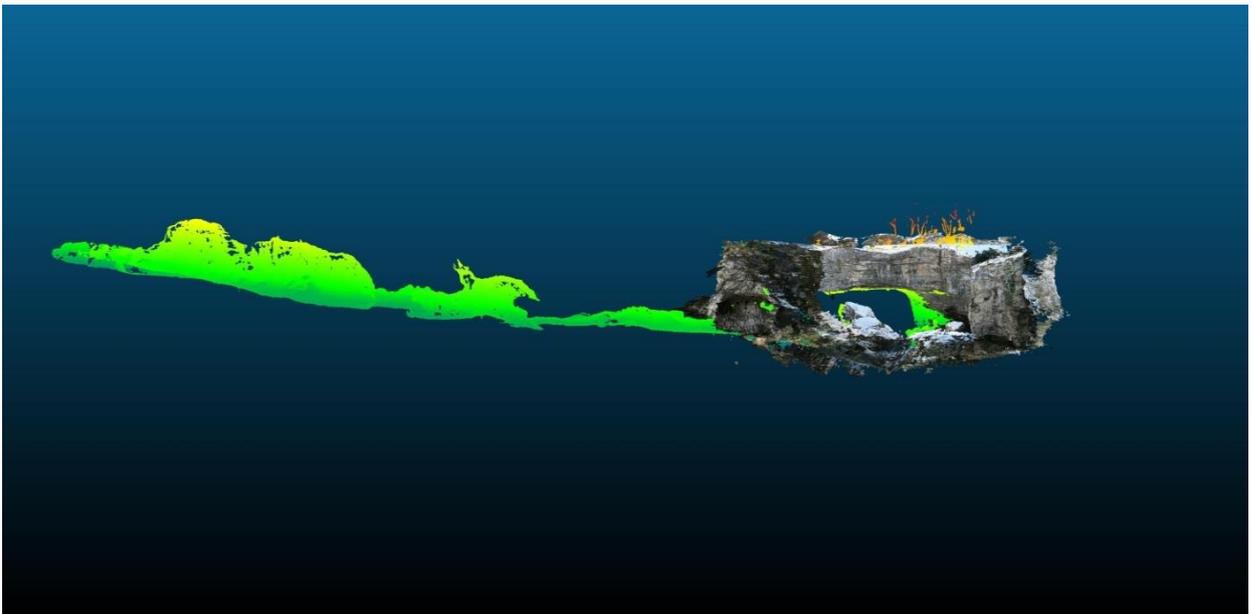


Figura 12 - Foto del Ponte di Veja, ricostruita tramite tecnica di fotogrammetria tridimensionale moderna, allineata con il DTM della Grotta dell'Orso.



Figura 13 – Prima esplorazione della grotta.

Dopo una prima esplorazione della cavità (Fig.13) dove si è deciso come impostare il progetto di rilevamento, sono state eseguite le prime scansioni partendo dal fondo della grotta, precisamente dal ramo destro (ramo D), per arrivare all'ingresso con un totale di 16 scansioni. Ogni scansione ha avuto una durata di circa cinque minuti in base ai parametri di risoluzione impostati sullo strumento. Per avere un riferimento e conoscere la distanza tra una scansione e l'altra, si è utilizzato un distanziometro laser. Un operatore con in mano un target si posiziona nel punto della successiva scansione e in seguito si è puntato il distanziometro sul target ottenendo la distanza e l'angolazione. Sono stati posizionati tre target per ogni scansione in modo da avere un punto di riferimento locale e univoco tra le varie scansioni. La grotta essendo il risultato dei numerosi processi erosivi e corrosivi, si presenta ricca di protuberanze e discontinuità che creano aree d'ombra aumentando la difficoltà nel rilevamento con il laser scanner.

Proprio per questo si sono avuti dei problemi con il posizionamento dei target che non sono stati sempre ben rilevati dal laser scanner, infatti non sono stati utilizzati per la fase di allineamento delle scansioni durante l'elaborazione dei dati. Un'altra difficoltà è insorta nel rilievo della strettoia alta circa 1 m in cui si sono riscontrati problemi nel posizionamento del laser a causa dell'eccessiva presenza di aree in ombra. Infine durante l'ultima scansione, dove si rilevava l'ingresso della grotta, il laser che era stato posizionato troppo in prossimità della parete della grotta, ha completato la scansione solo dopo il terzo tentativo.

3.7 Elaborazione dati

Al termine delle operazioni di acquisizione si è potuto procedere al trattamento del dato laser per l'ottenimento del prodotto finale che consiste in un modello digitale tridimensionale della Grotta dell'Orso. La nuvola di punti finali ottenuta, contiene sia i

punti a coordinata misurata sia punti nulli in cui lo scanner non ha rilevato nulla. Quindi il primo passo è stato quello di caricare tutte le scansioni su SCENE, software progettato specificatamente per il CAM2 focus^{3D} in grado di preparare i dati di scansione per l'elaborazione finale.

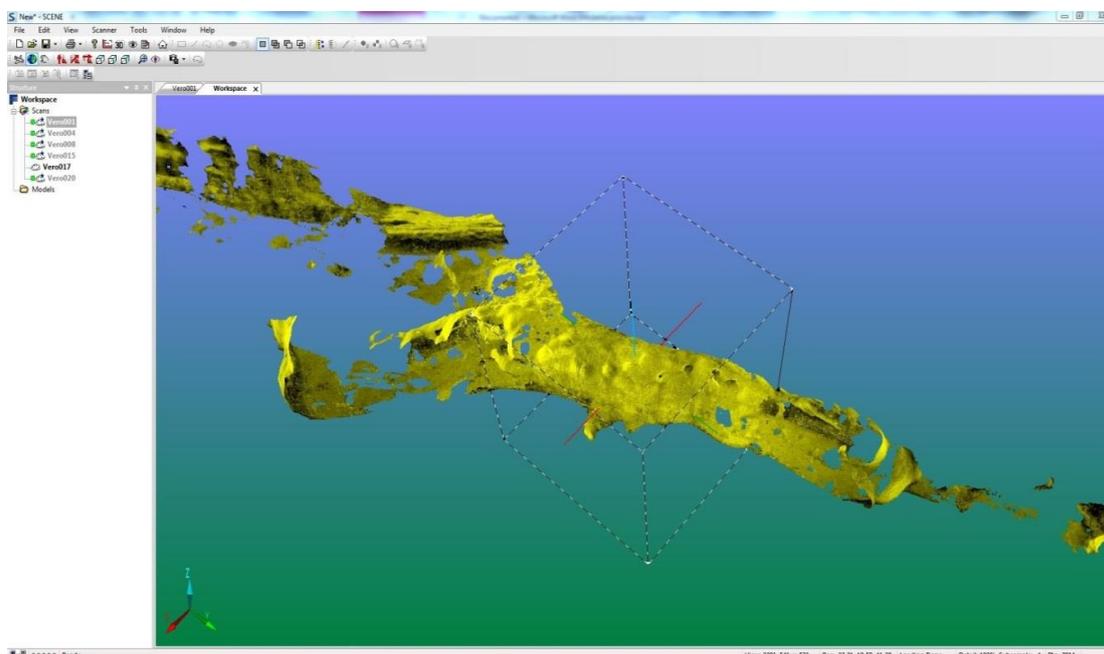


Figura 14 - "pre-processing" in Geomagic.

Per eseguire l'operazione di "pre-processing" (Fig.14) si compiono due operazioni di filtraggio dei punti: la prima (*dark scan*) elimina tutti i punti scuri, ovvero il software permette di assegnare un peso ai vari fattori che influenzano la qualità dei dati laser rilevati e scartare punti con un valore di riflettanza inferiore alla soglia impostata. La seconda è una operazione di griglia ovvero una rarefazione della nuvola di punti che però a differenza della prima non seleziona una tipologia particolare di punti, ma li elimina secondo uno schema fisso. Successivamente si fa una collocazione locale in cui viene determinata la posizione di alcuni target grazie alla differenza di riflettanza tra le parti nere e bianche del target, così facendo viene creata una lista di coordinate 3D in un sistema di riferimento univoco. In seguito si arriva alla fase di allineamento delle scansioni in GEOMAGIC, software adatto alla creazione di modelli 3D di oggetti fisici, sono stati esportati da SCENE i file della nuvola di punti in formato XYZ (*Ascii files*) una matrice che riporta la posizione di ogni punto nel sistema di coordinate XYZ. Una volta caricati tutti i dati laser su Geomagic è possibile procedere con la fase di registrazione con cui si ricostruisce la completa tridimensionalità della grotta attraverso l'unione di più scansioni; prima però bisogna procedere con una ulteriore operazione di sfoltimento di tutte le scansioni per eliminare i punti in eccesso e alleggerire i file, la rarefazione è stata eseguita con una spaziatura di 1 mm.

L'allineamento delle scansioni avviene attraverso l'individuazione semi-automatica di punti comuni (*point-based registration*) ovvero la fase di pre-registrazione in cui è sufficiente individuare un minimo di tre e massimo di nove punti comuni a due scansioni, che permettono di avvicinarle tra loro (Fig.15).

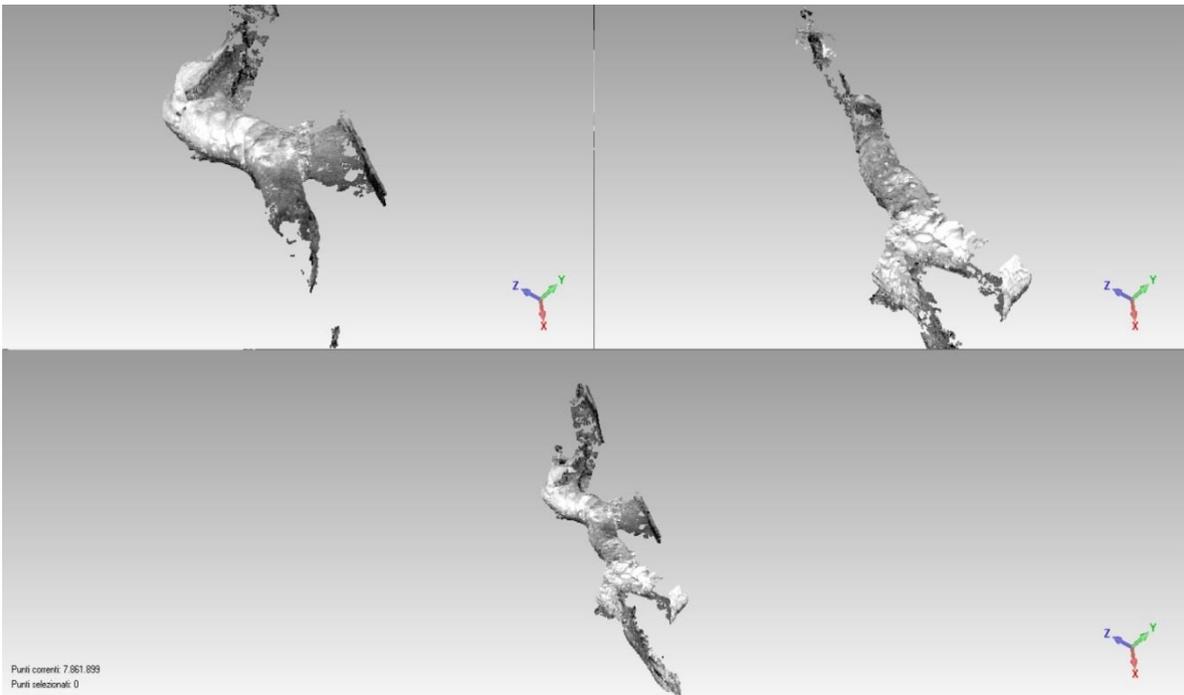


Figura 15 – “Point-based registration” in Geomagic. Sopra le due scansioni separate e sotto l'unione tra esse.

Successivamente è possibile utilizzare il metodo di registrazione globale che utilizza un algoritmo interattivo chiamato ICP (*Iterative Closest Point*). Questa metodologia parte dal parziale allineamento così ottenuto per poi iterativamente affinare la sovrapposizione delle scansioni; la procedura va ripetuta tra le varie scansioni e ogni volta che si ottiene un allineamento di due scansioni, si uniscono creando un unico oggetto con la funzione “*combine point objects*”. In seguito si passa alla fase di triangolazione (*meshing* in Fig.16) che trasforma un insieme di punti 3D in una superficie costituita da triangoli che connettono tra loro i vari punti.

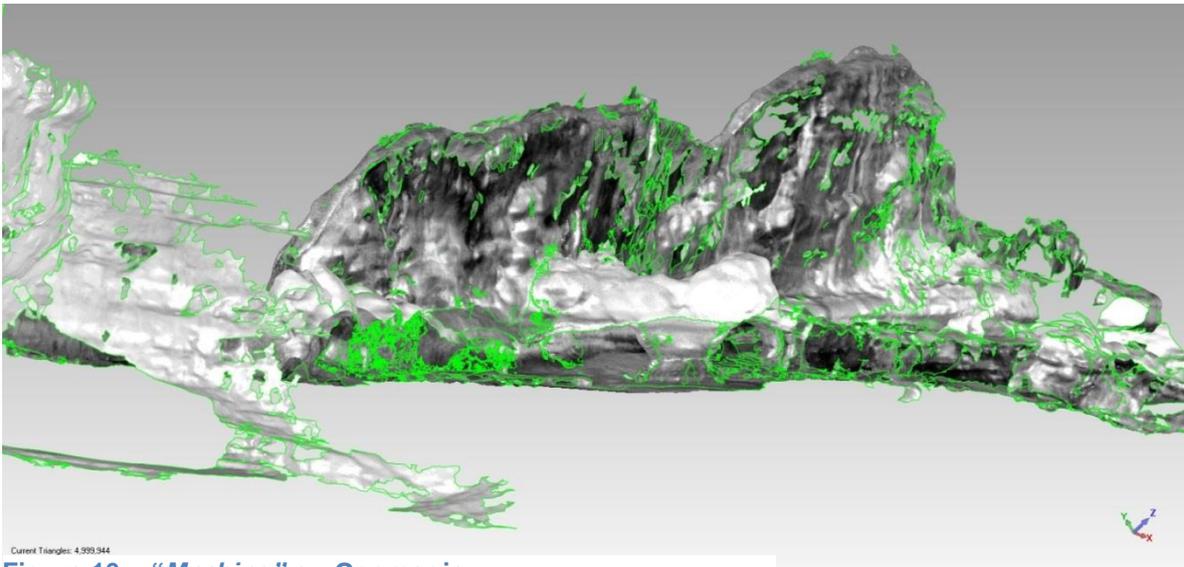


Figura 16 – “Meshing” su Geomagic.

Anche questa fase di meshing passa prima per una filtrazione dei dati laser, dove si eliminano tutti i punti troppo lontani dal modello, chiamati “*disconnected components*” e si eliminano gli “*outliers*” che sono punti marginali inutili. Inoltre con la funzione “*reduce noise*” che utilizza un algoritmo, si elimina automaticamente tutto il rumore di fondo creato dagli errori. Infine per preparare la nuvola di punti alla fase di meshing si usa il calcolo

delle normali locali: per ogni punto 3D è possibile rilevare la giacitura del piano locale centrato su ciascun punto battuto dal laser scanner e interpolare i punti limitrofi portandoli sul piano del punto centrale. A questo punto si può applicare il metodo del “*meshing*” al nostro modello (fig.16), trasformando la nuvola di punti in una superficie continua, su cui è stato possibile eseguire misure sulle varie aree della grotta.

4. Risultati

Il trattamento dei dati laser rilevati in campagna, mediante l'utilizzo del laser scanner terrestre, ci ha permesso di ottenere un modello digitale 3D chiamato D.T.M che significa "Digital Terrain Model" (Fig.17).

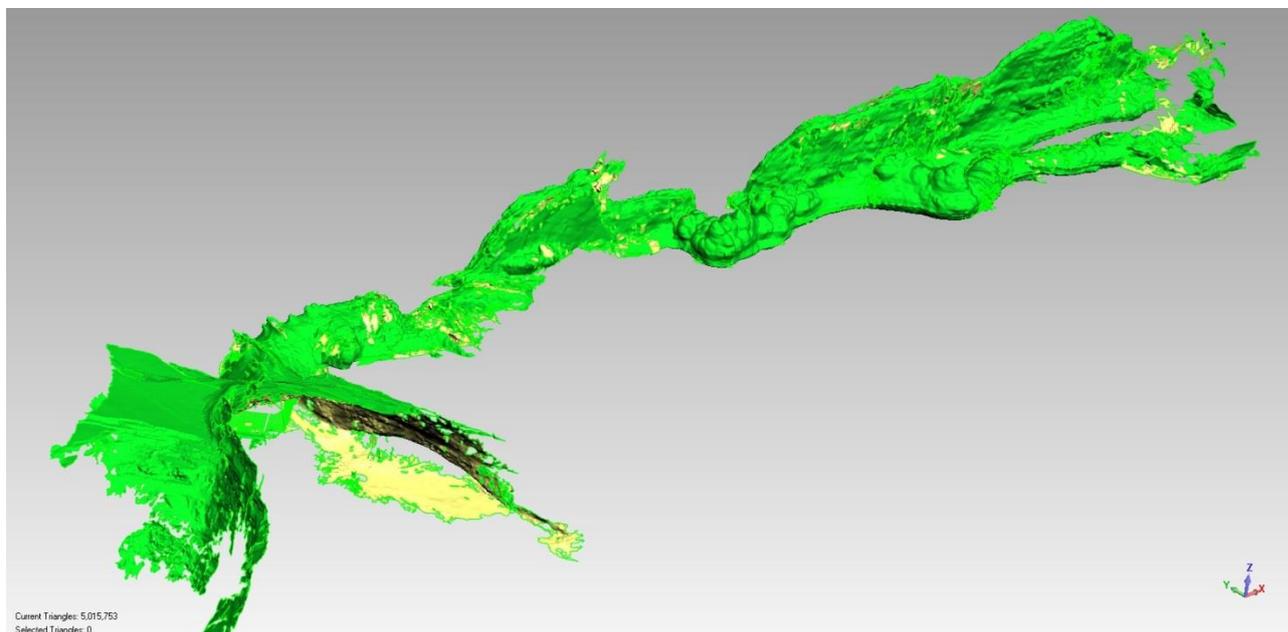


Figura 17- D.T.M. della Grotta dell'Orso.

Il modello morfologico tridimensionale della Grotta dell'Orso ci ha reso possibile, grazie alle funzionalità del software Geomagic, una rapida acquisizione di informazioni dimensionali di qualsiasi tipo (Tab. 3). Per le misurazioni dei volumi della Grotta dell'Orso si è utilizzato il software Meshlab che è un programma open source designato per l'elaborazione di superfici continue ossia "mesh" (Cignoni, 2008) e con la funzione "quality measures and computation" e "compute geometric" il sistema crea una "bounding box" con cui è possibile calcolare superficie e volume dell'oggetto, inoltre permette di definire il baricentro di una geometria chiusa.

Tabella 3 - Dati D.T.M (Digital Terrain Model) della grotta dell'Orso.

Volume (m ³)	19 676
Superficie (m ²)	7 364
N° punti totali	26 009 907
Distanza punti (mm)	7,6
Durata scansione (min)	5'04''
N° scansioni totali	16

Sono state effettuate nove sezioni verticali dell'intera grotta ad una distanza di 17 m l'una dall'altra, misurando altezza, larghezza, volume e superficie (Fig.18 e Tab. 4 e 5).

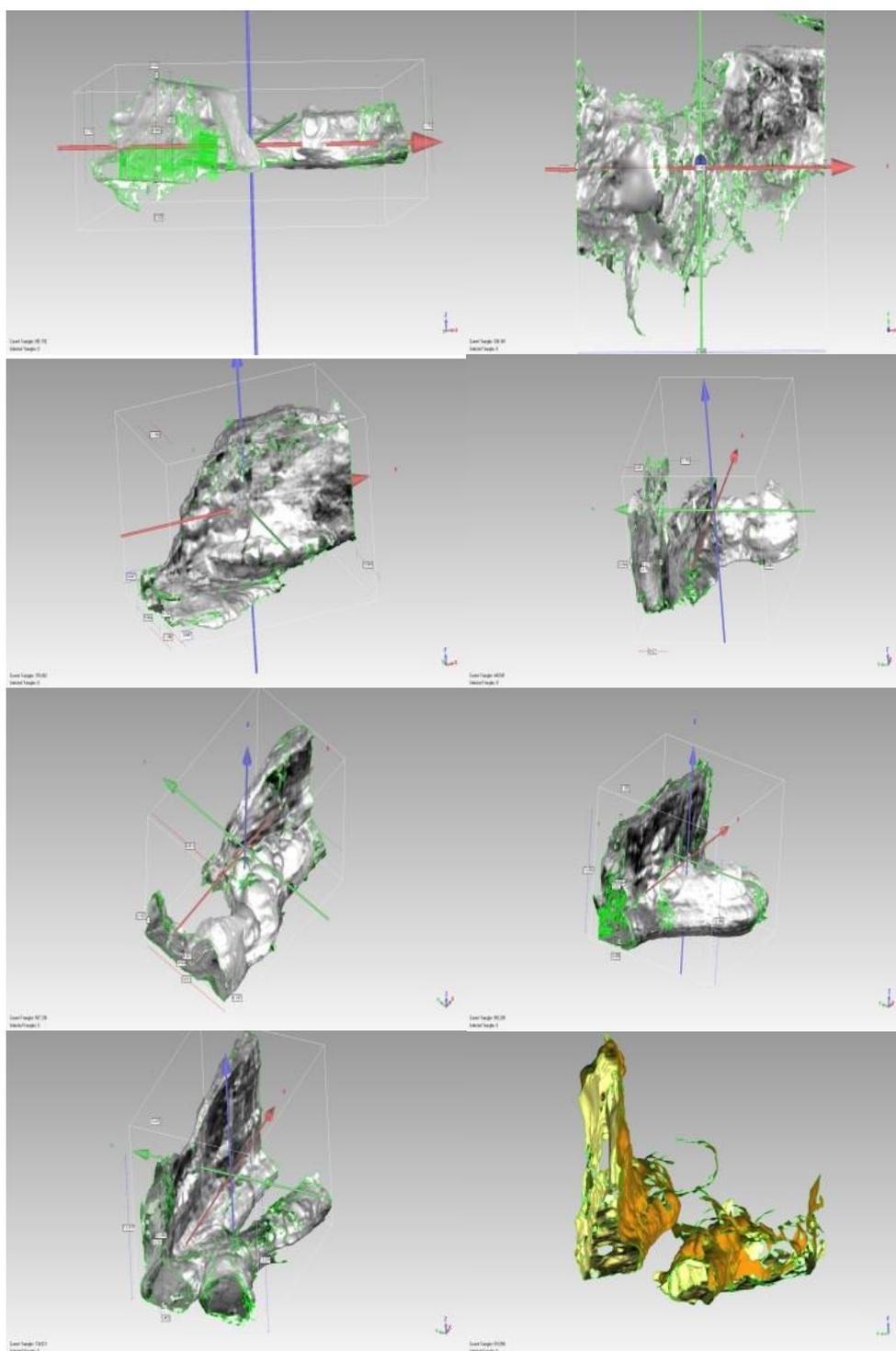


Figura 18 - Misurazioni dimensionali delle sezioni dalla 1 alla 8.

Tabella 4 – Volume e superficie delle sezioni eseguite sulla Grotta dell’Orso, volume e superficie dei due condotti principali, condotto F (condotto filone) e condotto DX (condotto di destra).

	Volume (m³)	Superficie (m²)
Condotto F	13569,5	2792,4
Condotto DX	2562,4	1377,3
Sezione 1	701,1	809,4
Sezione 2	380,5	290,2
Sezione 3	1032,8	544,0
Sezione 4	703,9	461,7
Sezione 5	1056,2	543,8
Sezione 6	493,4	1030,8
Sezione 7	2174,7	994,5
Sezione 8a	839,31	311,1
Sezione 8b	7117,2	532,8

Tabella 5 – Misure dimensionali delle sezioni eseguite sulla Grotta dell’Orso.

Sezioni	1	2	3	4	5	6	7	8a	8b
Altezza (m)	8,5	3,6	1,3	10,5	5,1	12,1	13,4	2,7	13,6
Larghezza(m)	10,6	13,4	5,7	3,2	9,9	5,4	11,8	3,7	5,3
Distanza (m)	30	47	64	81	98	115	132	149	149

Una caratteristica della Grotta dell’Orso sono le cupole, di cui ne sono state riconosciute sette cupole principali. Su queste cavità emisferiche sulla volta sono state realizzate misure del volume e del diametro (Tab. 6) attraverso l'utilizzo di sfere che sono state inserite all'interno di esse per mezzo di una funzione di Geomagic (fit) che ti permette di creare delle sfere con la stessa area della superficie che selezioni (Fig. 19).

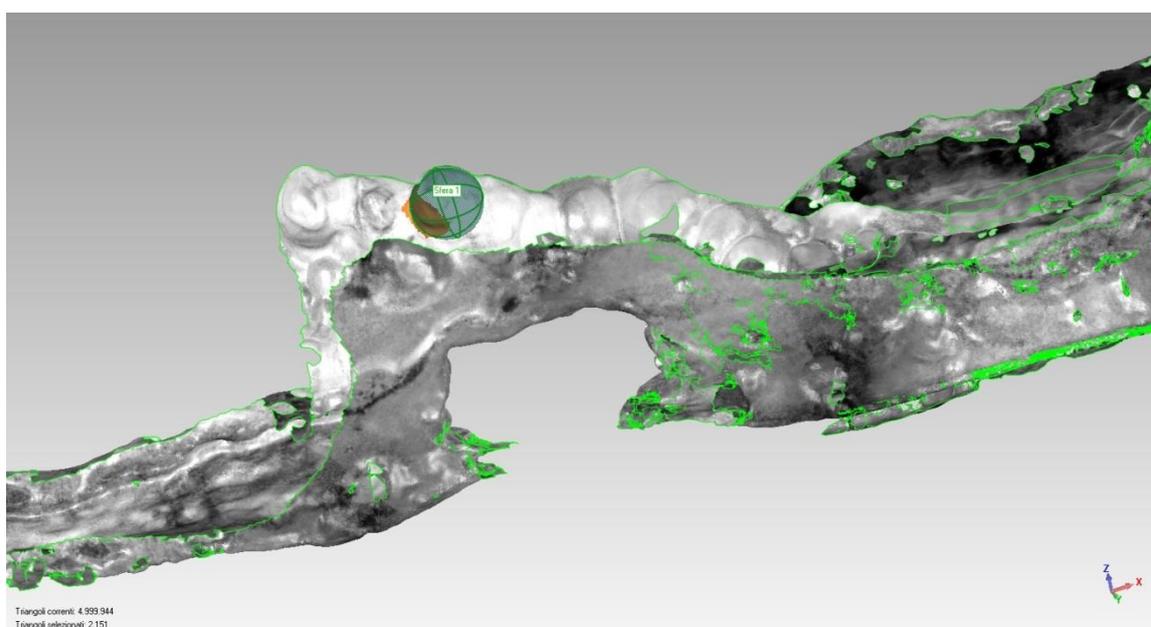


Figura 19 – Misurazione del volume delle cupole in Geomagic.

Tabella 6 - Volume cupola (m³): $\text{volume sfera}/2=(4/3\pi r^3)/2$

Cupole	1	2	3	4	5	6	7
Diametro(m)	2,4	1,7	1,8	2,6	2,3	3,6	3,1
Volume (m³)	3,8	1,4	1,6	4,6	3,3	12,8	7,5
Distanza da ingresso (m)	78	77	79	103	105	106	107

Inoltre, durante il rilevamento in campagna, è stata notata la presenza di morfologie a tubo ed è stata avanzata l'ipotesi che esse si instauravano tutte lungo il lineamento di un interstrato (Fig. 20). Per confermare l'ipotesi è stato definito un piano negli assi XY passante per il centro dei tubi con un'inclinazione nell'asse X di $-9,5^\circ$ mentre nell'asse Y di $-4,0^\circ$, ottenendo un risultato positivo, ovvero tutte le morfologie a tubo si sono formate sullo stesso lineamento e ciò testimonia la presenza di un flusso d'acqua all'interno dell'interstrato.

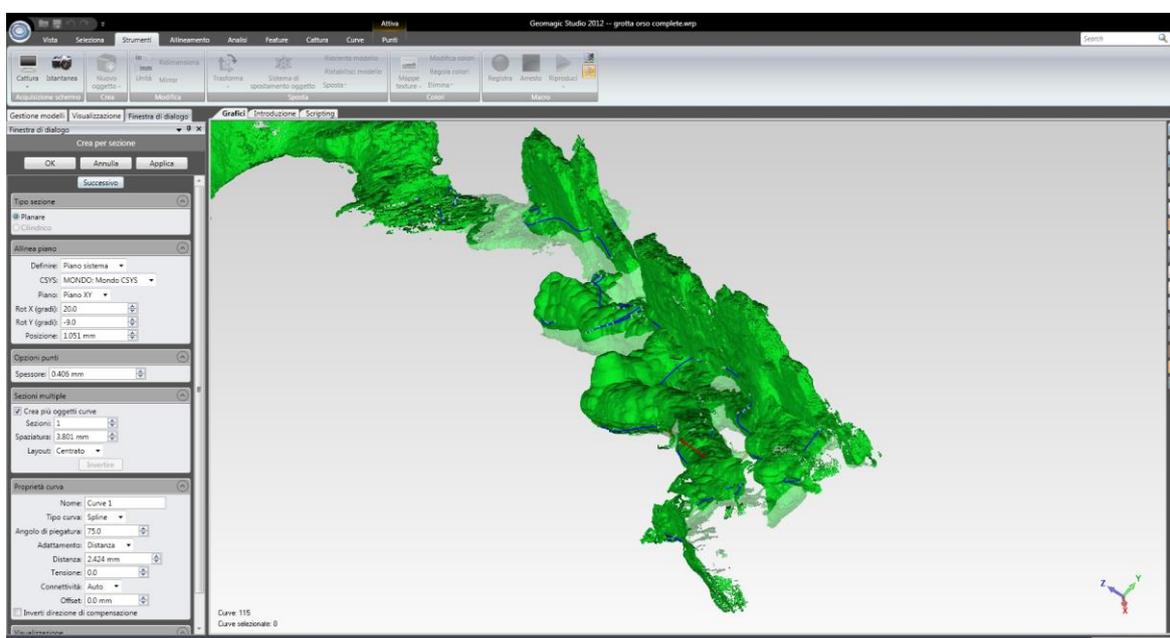


Figura 20 – Definizione di un piano lungo uno stesso interstrato; rotazione in X: $-9,5^\circ$, rotazione in Y: $-4,0^\circ$.

Infine per capire in quale area della grotta ha agito maggiormente la dissoluzione, abbiamo suddiviso in sei sezioni il condotto di destra tramite la definizione di piani lungo gli assi YZ, distanziati dieci metri l'uno dall'altro (Fig. 21 e Tab. 7).

Tabella 7 - Volume e superficie delle sezioni eseguite lungo il condotto di destra

Sezioni condotto DX	Volume (m³)	Superficie (m²)
Sezione D1	787,4	226,1
Sezione D2	277,8	141,2
Sezione D3	4616,8	141,5
Sezione D4	1346,3	331,8
Sezione D5	1003,2	193,1
Sezione D6	761,4	173,9

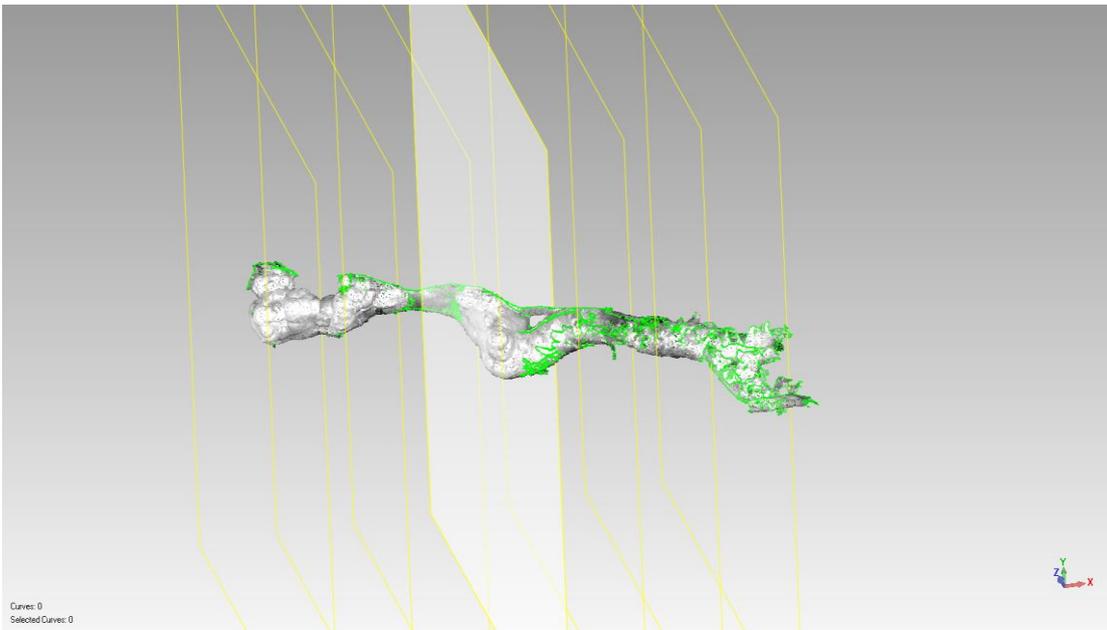


Figura 21 – Definizione di piani lungo gli assi YZ per dividere il condotto di DX in 6 sezioni, Geomagic.

5. *Discussione e conclusioni*

L'analisi effettuata sul “*digital terrain model*” della Grotta dell'Orso ha evidenziato due ambienti distinti e ciò è dimostrato dalle diverse morfologie che li caratterizzano. Per cui il condotto del filone basaltico e il condotto di destra si sono formati in due diversi momenti della storia della grotta. Nella prima fase (Fig.23), circa 38 milioni di anni fa è avvenuta l'intrusione magmatica in una frattura preesistente che ha provocato una parziale calcinazione del calcare al contatto. Successivamente ha inizio il primo evento carsico, dove l'acqua che percola tra il filone e la roccia incassante per erosione e dissoluzione ha formato la cavità che si è instaurata in prossimità del filone (seconda fase). In seguito, un secondo evento carsico ha portato alla creazione di un condotto freatico, testimoniato dalla geometria ellittica e dalla presenza di “tubi” sviluppati lungo l'interstrato (ramo D, Fig.22). Questi ultimi si sono allargati per l'effetto della miscelazione tra due soluzioni a diversa saturazione (Bogli., 1964). Il condotto freatico ha intercettato la cavità del filone ed è quindi più giovane.



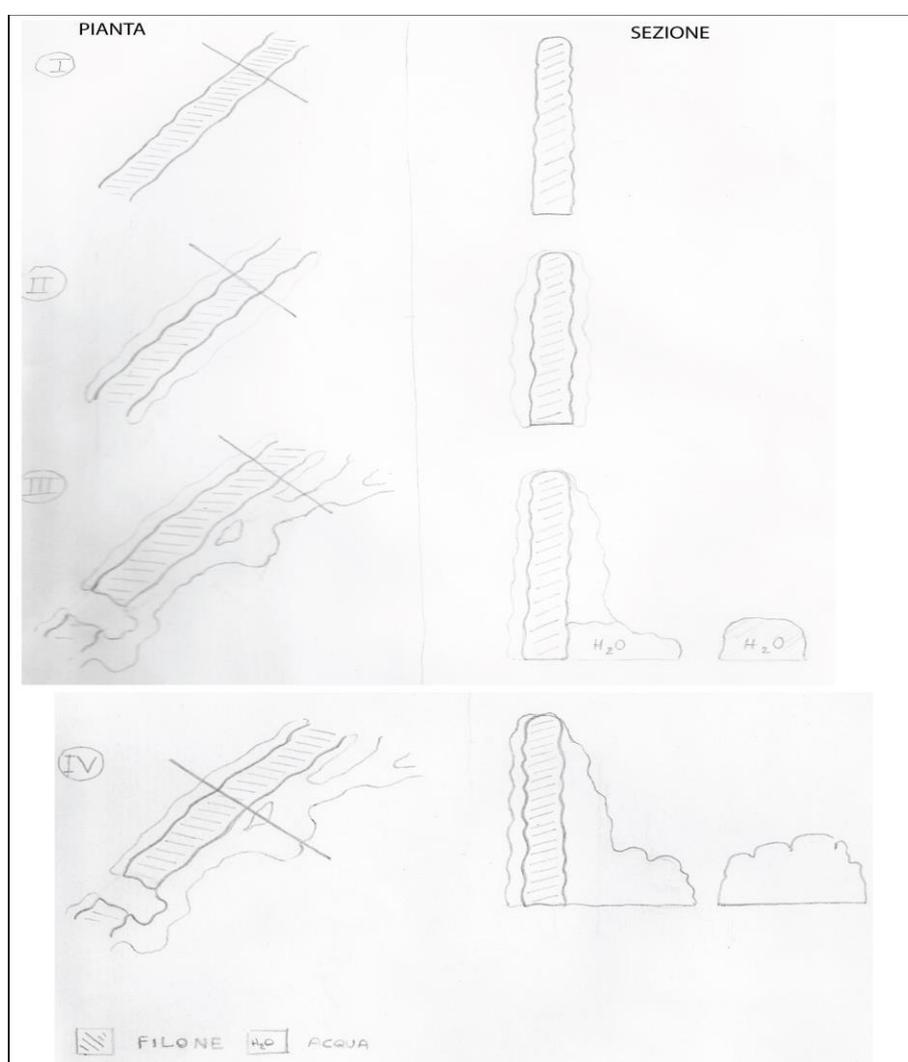
Figura 22 – Condotto freatico (ramo D); è visibile il giunto di strato con presenza di geometrie a forma di “tubo”.

L'acqua portata dal condotto freatico ha riempito la base della cavità ai piedi del filone erodendo e provocandone l'allargamento, senza mai scavalcare il filone (terza fase, Fig.23). Quando l'incisione del Vajo della Marciora ha intercettato questo reticolo carsico di Veja, aprendo l'ingresso attuale, il condotto si è svuotato dal flusso d'acqua permettendo all'aria di entrare e portando così l'effetto della condensazione (quarta fase, Fig.23). L'aria prima di arrivare nella parte centrale della cavità deve attraversare una strettoia in cui subisce un aumento di pressione; successivamente entra in un spazio molto grande che porta a una decompressione repentina. Questo fenomeno porta ad una diminuzione della temperatura che provoca condensazione.

La condensa, che consiste in acqua distillata ovvero sottosatura in CaCO_3 , corrode la roccia formando sulla volta del condotto tipiche forme a cupola (Dublyanski e Dublyanski, 1998). La condensazione negli ambienti ipogei è condizionata dalla latitudine e dall'altitudine ed ha un forte impatto sulla morfologia delle cavità (De Waele et al., 2014). Nella Grotta dell'Orso si sono notate due aree con un volume maggiore e con cupole di dimensioni più grandi rispetto al resto della cavità. Ciò è da attribuire alla presenza di pipistrelli che hanno individuato come posto ideale per le loro colonie di ibernazione queste aree della grotta che si collocano precisamente in prossimità delle due curve

principali del condotto di destra (punto 4 e punto 5 in Fig. 4). L'effetto microclimatico prodotto dalle colonie di pipistrelli ha un impatto sulla dissoluzione della roccia e sulla modellazione delle cupole. Infatti in studi precedenti (Lundberg et al., 2008) si è visto come le cupole dove si instaurano i pipistrelli abbiano una temperatura maggiore rispetto a quelle senza. Questo effetto è prodotto dal metabolismo dei pipistrelli che facilitano l'ingresso di CO_2 nell'aria e nella condensa provocando un aumento dell'aggressività della corrosione. Questo meccanismo di "bio-corrosione" ha portato ad avere nelle aree centrali della grotta percentuali di dissoluzione maggiori rispetto alle aree periferiche e ha contribuito a comprendere come il comportamento dei chiroteri influisca sulla forma e sul volume delle cupole.

Il rilievo laser scanner in grotta ha consentito di ottenere misurazioni volumetriche e dimensionali molto precise che hanno agevolato molto l'analisi morfometrica. Dalle misure laser scanner è stato possibile ipotizzare alcuni scenari evolutivi di questa grotta tra le più interessanti dei Monti Lessini.



6. Bibliografia

AZMY S.N., SAH S.A., SHAFIE N.J., ARIFFIN A., MAJID Z., ISMAIL N.A. & SHAMSIR S., 2012 - Counting in the dark: Non-intrusive laser scanning for population counting and identifying roosting bats. *Scientific Reports* 2: 524 | DOI: 10.1038/srep00524

BOGLI A. (1964)- Corrosion par mélange des eaux. *International journal of speleology*, 1, 61-70.

BORNAZ L., 2004. *La tecnica del laser scanning terrestre*. Udine.pp.24.

DUBLYANSKY V.N., DUBLYANSKY Y.V., 1998 - The problem of condensation in karst studies. *J. Caves Karst Stud.* 60 (1), 3–17.

GÁZQUEZ F., CALAFORRA J.M., FORTI P., DE WAELE J., SANNA L., 2015. The role of condensation in the evolution of dissolutional forms in gypsum caves: Study case in the karst of Sorbas (SE Spain). *Geomorphology* 229, 100-111.

GONZÁLEZ-AGUILERA D., MUÑOZ A.L., LAHOZ J.G., HERRERO J.S., CORCHÓN M.S. & GARCÍA E., 2009. Recording and modeling Paleolithic caves through laser scanning. 2009 International Conference on Advanced Geographic Information Systems & Web Services: 19-26

LUNDBERG J., MCFARLANE D A., 2009. Bats and bell holes: The microclimatic impact of bat roosting, using a case study from Runaway Bay Caves, Jamaica. *Geomorphology* 106, 78-85.

LYONS-BARAL J., 2012. Using terrestrial LiDAR to map and evaluate hazards of Coronado Cave, Coronado National Memorial, Cochise County, AZ. *Arizona Geology Magazine*, Summer 2012: 1-4. Marais W, 2005. New cave survey visualization methods. *Position IT* 2005: 29-32.

MILIUS J. & PETERS C., 2012. Eisriesenwelt – From Laser Scanning to Photo-Realistic 3D Model of the Biggest Ice Cave on Earth. In: Jekel, T. et al., (Eds.). *GI-Forum 2012: Geovisualization, Society and Learning*; WichmannVerlag, Heidelberg: Salzburg, Austria, 2012; pp. 513-523.

OSBORNE R.A.L., 2004. The troubles with cupolas. *School of Development and Learning*, A35, University of Sydney, N.S.W. 2006, Australia, 36 pp.

PETERS C., MILIUS J., BUCHROITHNER M.F, 2011. Eisriesenwelt: Terrestrial Laser Scanning and 3D Visualisation of the Largest Ice Cave on Earth. In: *Proceedings European LiDAR Mapping Forum*, Salzburg, Austria, 10 pp.

STAIGER R., 2002. *Laser Scanning in an Industrial Environment*. FIG – Congress, Washington, D.C. USA, April, 2002.

SAURO U., 1973 - Il paesaggio degli Alti Lessini. *Museo Civ. Stor. Nat. Verona*, Mem. VI, 234 p.

SAURO U., 1974 - Aspetti dell'evoluzione carsica legata a particolari condizioni litologiche e tettoniche negli Alti Lessini. *Boll. Soc. Geol. It.*, 93: 945-969

SGREZZAROLI M., VASSENA G.P.M., 2007. Tecniche di rilevamento tradizionale tramite laser scanner. Volume 1 – Gexel, università di Brescia.

ZORZIN R., ALLEGREZZA A., 2001. Qualità di alcuni acquiferi dell'altopiano Carbonatico dei Monti Lessini veronesi (VR). Museo Civico di Storia Naturale di Verona, 12 pp.

ZORZIN R., ROSSI G., 1990. Veja: un ponte vecchio 40 milioni di anni? Lessinia – ieri oggi domani, quaderno culturale, Verona pp.189-199.

ZORZIN R., 1987. Studio geologico dei dintorni di S.Anna d'Alfaedo. La Lessinia – ieri oggi domani, quaderno culturale. pp. 47-54, Vago di Lavagno – Verona.

RINGRAZIAMENTI

Jo de waele, Stefano Fabbri, Francesco Sauro, Rossi Guido, Tommaso Santagata, i miei fratelli coinquilini andrea stomaci, Pierfrancesco Pacinelli,