



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali – TESAF

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN

Scienze Forestali e Ambientali

**Impiego di uno skidder in ambito montano: analisi dell'eco-
efficienza tramite sistema di telemetria**

Relatore

Prof. Stefano Grigolato

Correlatore

Dott. Narcis Mihail Bacescu

Laureando

Omar Piol

Matricola n. 2056333

A.A. 2023-2024

Sommario

Riassunto	3
Abstract	3
1. Introduzione	6
1.1 Sistemi di esbosco	7
1.2 Evoluzione della meccanizzazione forestale	7
1.3 Sostenibilità	9
1.4 Eco-efficienza	10
2. Obiettivi del lavoro	11
3. Materiali e metodi.....	12
3.1 Impostazione del lavoro	12
3.1.1 Macchina oggetto di studio.....	12
3.1.2 Strumenti e analisi.....	14
3.2 Impiego dati macchina per l'analisi dei tempi di lavoro	18
3.2.1 Rilievo dei dati	18
3.2.2 Analisi GIS.....	19
3.2.3 Preparazione dataset	21
3.3 Modelli di produttività	22
3.3.1 Descrizione dei cantieri	22
3.3.2 Analisi statistica e modelli di produttività.....	27
4. Risultati e discussione	29
4.1 impiego dati macchina per l'analisi dei tempi di lavoro	29
4.1.1 Verifica dei dati acquisiti dal CAN-BUS.....	29
4.1.2 Calcolo della distanza percorsa e dei tempi.....	30
4.1.3 Calcolo delle pendenze	32
4.1.4 Statistica descrittiva	33
4.2 Valutazione dell'eco-efficienza dei cantieri	36
4.2.1 Determinazione delle variabili influenti.....	36
4.2.2 Modellazione GLM	39
4.2.3 Utilizzo dei modelli (simulazione di cantieri)	41
5. Conclusioni	45
Bibliografia	47
Allegati.....	49

Riassunto

La presente tesi di laurea ha sviluppato lo studio di un metodo di analisi statistico applicabile ai moderni mezzi forestali, finalizzato alla previsione di tempi e consumi durante le fasi di lavoro. Il mezzo considerato nello studio è lo skidder Equus 175 UN, un mezzo specializzato nell'esbosco a strascico di piante e tronchi.

Nella raccolta dei dati sono state utilizzate le informazioni rilevate dal dispositivo CAN-bus del mezzo, le quali sono state validate tramite confronto con dati raccolti manualmente in cantiere. Questi sono poi stati analizzati con un software statistico per essere discriminati e elaborati con il GIS per ottenere ulteriori informazioni. In questo modo è stato possibile riassumere le caratteristiche di 3 diversi cantieri considerati nello studio.

Nella seconda parte del lavoro è stata valutata la variabilità dei fattori "tempo" e "consumo" in relazione alla variabilità di "pendenza" e "lunghezza" delle piste. Ne sono risultati due modelli GLM che permettono la stima dei due fattori sopracitati per specifiche situazioni di cantiere.

Questo metodo può rivelarsi molto utile per imprese forestali che devono valutare l'opportunità di acquisto di lotti, e per gestori che devono definire le prescrizioni di utilizzo delle particelle. La valutazione di tali parametri può essere altresì importante nel confronto tra diversi modelli in termini di eco-efficienza.

Abstract

This thesis represents the study of a statistical analysis method applicable to modern forestry vehicles, aimed at predicting times and consumption during the work phases. The vehicle considered in the study is the Equus 175 UN skidder, a vehicle specialized in the trawling of plants and trunks.

In data collection, the information detected by the vehicle's CAN-bus device was used, which was validated by comparison with data collected manually on the construction site. These were then analyzed with statistical software to be distinguished and processed with GIS to obtain further information. In this way, it was possible to summarize the characteristics of three different construction sites considered in the study.

In the second part of the work, the variability of the "time" and "consumption" factors was evaluated in relation to the variability of the "slope" and "length" of the slopes. The resulting two GLM models allow the estimation of the two aforementioned factors for specific construction site situations.

This method can prove very useful for forestry companies that need to evaluate the opportunity to purchase lots, and for managers who need to define the requirements for using the parcels. The evaluation of these parameters can also be important in comparing different models in terms of eco-efficiency.

Ringraziamenti

Si ringrazia innanzitutto la ditta De Luca Biomasse per averci dato la possibilità di eseguire i rilievi per questo studio ed in particolare Omar e Simone per essere stati disponibili ad assecondare tutte le nostre richieste durante il periodo della raccolta dati. Voglio poi ringraziare l'Ente Parco Regionale dei Colli Euganei per avermi concesso tutte le giornate di permesso che ho richiesto per motivi di studio, nonché i miei colleghi Giuseppe, Giampaolo, Roberto, Marco, Daniele, Gianclaudio, Luisa, Raul, Carlo e Gianantonio per essermi sempre venuti incontro quando avevo bisogno di tempo per l'università in questi ultimi quattro anni.

Un ringraziamento speciale va poi a Nicole, Sofia, Tiziana, Nicolò, Simone, Gianluca e Chiara per tutte le volte che mi hanno supportato con appunti e altro materiale didattico, ma soprattutto per tutti i bellissimi momenti che abbiamo passato insieme durante la nostra vita universitaria.

Voglio infine ringraziare tutti gli amici conosciuti in questi anni e con i quali abbiamo condiviso tantissime belle esperienze, in particolare Sara e Asia che mi hanno aiutato moltissimo con gli ultimi esami.

1. Introduzione

Le utilizzazioni forestali costituiscono la fase operativa della selvicoltura e la loro esecuzione è condizionata da aspetti tecnici (limiti di impiego di macchine e mezzi) ed economici (costi degli interventi in relazione al valore del legname ricavato). Risulta quindi fondamentale adottare provvedimenti tecnici e organizzativi finalizzati ad aumentare la produttività del lavoro e diminuire i costi del prodotto legno, anche considerando gli impatti ambientali causati dall'utilizzazione e il bilancio energetico della stessa (Piussi & Alberti, 2015).

Durante l'utilizzazione, la fase di esbosco (Figura 1.1) risulta essere solitamente quella più delicata dal punto di vista degli impatti sull'ambiente ed in particolare al soprassuolo, nonché quella più onerosa in termini economici. La scelta del sistema di esbosco più adeguato al cantiere è quindi di primaria importanza per ottenere produzioni sostenibili sia dal punto di vista economico che ambientale. La scelta di esse è condizionata da diversi fattori (Hippoliti, 1997):

- Caratteristiche del terreno, soprattutto pendenza e accidentalità della superficie;
- Disponibilità di infrastrutture;
- Localizzazione delle strade verso le quali si esbosca e conseguente direzione di esbosco, in salita o in discesa;
- Tipo di soprassuolo e di taglio;
- Dimensione del legname utilizzato;
- Disponibilità di personale ed attrezzature idonei.



Figura 1.1: fase di esbosco con lo skidder Equus 175 UN. Foto Piol Omar

1.1 Sistemi di esbosco

Considerati i suddetti fattori la scelta può ricadere tra sistemi di esbosco terrestri con trasporto o strascico del legname, sistemi a fune con uso di teleferiche o gru a cavo e sistemi aerei con l'utilizzo dell'elicottero (situazione marginale). Sulla base di tutte queste variabili, nonché della tipologia di assortimenti che vogliamo ottenere, possiamo riassumere tre metodi di esbosco principali:

- *Short Wood System – S.W.S:* è il sistema di lavoro tradizionale e tipico di imprese con un livello di meccanizzazione medio-basso. Consiste nell'allestimento dei fusti sul letto di caduta e nell'esboscare il legname già negli assortimenti definitivi. Normalmente per questo sistema viene utilizzato il trattore con verricello o, dove le pendenze lo consentono, il rimorchio forestale.
- *Tree Length System - T.L.S:* consiste nell'esbosco dei fusti interi già sramati o se di grandi dimensioni già sezionati in lunghezze multiple a quelle degli assortimenti definitivi. Per questo sistema è necessario l'utilizzo di mezzi più potenti quali grossi trattori con verricello o mezzi specifici quali skidder e forwarder; in situazioni di pendenza importanti vengono anche utilizzate teleferiche o gru a cavo.
- *Full Tree System - F.T.S:* è il sistema più moderno e consiste nell'esbosco delle piante intere rimandando l'allestimento direttamente all'imposto. Nasce dalla disponibilità di mezzi sempre più potenti ed efficaci nell'esbosco e dalla sempre maggiore richiesta di biomassa (in particolare cippato) per la quale vengono utilizzate tutte le parti dell'albero di minor interesse economico, quali cimali e ramaglie. Questo sistema è solitamente utilizzato da imprese ad alto livello di meccanizzazione, le quali associano alle macchine per l'esbosco anche processori e/o cippatrici all'imposto.

Come già accennato tra i fattori fisici che più influenzano il metodo di esbosco abbiamo sicuramente la pendenza e le condizioni del suolo (intesi come portanza e accidentalità). In generale possiamo considerare la possibilità di esbosco con sistema terrestre fino a pendenze del 35-50% se disponiamo di mezzi specializzati. Oltre a questi valori diventa necessario l'utilizzo di sistemi a fune o addirittura aerei se economicamente convenienti.

La pendenza sarà quindi una delle variabili considerate nello studio di eco-efficienza della presente tesi.

1.2 Evoluzione della meccanizzazione forestale

Come in tutti i settori produttivi anche in quello forestale negli ultimi decenni c'è stata una grande evoluzione tecnologica che ha permesso di semplificare e rendere sempre più efficaci le varie

operazioni di lavoro nelle utilizzazioni e nelle fasi successive. Prima tra tutte queste innovazioni è sicuramente l'introduzione della motosega, la quale ha iniziato a diffondersi in Europa nel secondo dopoguerra.

Riguardo ai sistemi per l'esbosco a partire dagli anni '60 la diffusione dei trattori agricoli ha iniziato a sostituire i tradizionali metodi storicamente utilizzati, quali: l'utilizzo di animali da soma, l'avvallamento con risine, slitte ecc.

Le principali tipologie di trattrici utilizzate in foresta sono:

- Trattrici a doppia trazione: adatte all'impiego su percorsi facili ed all'esbosco in discesa o in piano perché impennano facilmente. Solitamente vengono utilizzati mezzi con potenza di 60-100 CV ed una capacità di carico medio nell'esbosco a strascico di 1-3 m³.
- Trattrici cingolate: sono trattrici agricole dotate di cingoli metallici, questi insieme al baricentro basso garantiscono grande stabilità, elevata forza di trazione e grande manovrabilità. Equipaggiati con verricello, trattori da 50-80 CV sono in grado di esboscare 1,5-3 m³, tuttavia hanno il difetto di creare un importante impatto sul terreno e essere molto lenti (Marra, Mastrolonardo, Laschi, & Neri, 2022).

Gli anni '70 hanno poi visto l'introduzione delle prime torrette per teleferiche trasportabili con trattore, ma è a partire dagli anni '90 che c'è stato un vero salto nei livelli di automazione nel settore grazie all'introduzione di macchine quali abbattitrici e processori.

Il passo successivo è stato lo sviluppo di mezzi altamente specializzati ed efficaci per quali gli harvester, per l'abbattimento e prime fasi di lavorazione; *skidder* e *forwarder* per l'esbosco e il trasporto all'imposto. Queste due macchine differiscono per le modalità operative:

- Skidder: sono trattori articolati ideati per l'esbosco a strascico. Hanno ruote isodiametriche e sono normalmente dotati di una pinza per l'esbosco, verricello con 1-2 tamburi molto potenti e una gru per la movimentazione del legname. Hanno elevata capacità di esbosco 4-6 e fino a 8 m³. In realtà questa tipologia di mezzi è stata sviluppata in Nord America verso la fine degli anni '50 tuttavia nell'arco Alpino fa il suo ingresso solo in tempi recenti. Una descrizione più dettagliata verrà fatta nei capitoli successivi in quanto lo skidder è la macchina alla quale si è rivolto il presente studio.
- Forwarder: sono trattori articolati portanti con un telaio tipo rimorchio sul retrotreno e una gru idraulica per il carico e scarico (Figura 1.2). Vengono utilizzati per l'esbosco di legname di medie e grandi dimensioni e lunghezze di 4-6 m. La trazione integrale gli rende adatti a

lavorare anche su terreni piuttosto sconnessi ma non troppo ripidi. In cantieri altamente meccanizzati sono associati a harvester o processori. In Italia la loro diffusione è stata limitata dalla scarsa diffusione della viabilità nelle aree forestali (Marra, Mastrodonato, Laschi, & Neri, 2022).



Figura 1.2: immagine esemplificativa di un forwarder John Deere modello 1210 G.

1.3 Sostenibilità

Elevati livelli di meccanizzazione causano inevitabilmente maggiori impatti a livello ambientale, sia in senso diretto, come ad esempio l'impatto sul suolo e soprassuolo, sia indiretto, in termini di emissioni nell'atmosfera. Questo va in contrasto con il concetto di sostenibilità diventato fondamentale nella società moderna. A partire dagli anni 2000 questo concetto è stato principalmente correlato a tre pilastri: economia, ambiente e società. Le risorse rinnovabili sono di conseguenza diventate molto popolari nella sostituzione di materiali sintetici o nell'utilizzo di combustibili fossili a fini energetici. In tale contesto è cresciuto l'interesse per il legno come materia prima rinnovabile, che bene si può inserire in una prospettiva di sostenibilità (Marra, Mastrodonato, Laschi, & Neri, 2022).

Dal punto di vista economico e sociale il settore forestale risponde molto bene ai suddetti principi, tuttavia per quanto riguarda l'ambiente diventa indispensabile una corretta gestione delle foreste. Questa dovrà essere in grado di evitare un utilizzo eccessivo del soprassuolo, garantendo comunque la possibilità di compiere utilizzazioni con mezzi e tecnologie moderne, in modo che queste siano economicamente sostenibili per le imprese. Per limitare gli impatti ambientali i nuovi regolamenti forestali dovranno considerare inevitabilmente l'uso di alti livelli di meccanizzazione.

In questo contesto la ricerca di nuovi metodi gestionali deve essere affiancata allo studio dell'efficienza dei moderni mezzi e delle moderne tecniche di esbosco in modo da poter ridurre il più possibile l'impatto di esse sull'ambiente.

1.4 Eco-efficienza

Nell'ambito della ricerca si inserisce quindi il concetto di eco-efficienza, ossia la possibilità di combinare prestazioni economiche e ambientali di un sistema specifico (Koskela, 2015). Il principio è quello di ridurre i consumi per unità di legno prodotto, portando così ad una riduzione dei costi per la produzione stessa e ad una conseguente riduzione delle emissioni.

Per raggiungere tale obiettivo gli studi si concentrano quindi su due tipi di approccio, paralleli tra loro: l'aumento della produttività delle macchine a parità di consumo di carburante e l'utilizzo di motorizzazioni meno inquinanti, quali sistemi di propulsione con carburanti alternativi o elettrificati (totalmente o ibridi) (Cadei, Borga, Grigolato, & Mologni, 2023). Tutto ciò è possibile grazie alla creazione di modelli matematici di lavoro che comparano le variabili nella produzione con il consumo di carburante.

Questi modelli possono avere una buona precisione predittiva per i macchinari su cui sono stati elaborati e permettono alle imprese forestali di stimare i costi di produzione e le tempistiche per l'utilizzazione dei lotti, talvolta valutando pure la convenienza ad utilizzare un sistema di esbosco piuttosto che un altro. La creazione di modelli di previsione si basa sull'utilizzo di dati empirici raccolti durante le fasi di lavoro, la raccolta di essi nel settore forestale può avvenire con studi diretti tramite l'osservazione del lavoro (studi dei tempi, dei movimenti ecc.) oppure studi di *follow-up* (registrazioni dei risultati storici). Nel secondo metodo si utilizzano quindi sistemi elettronici di raccolta dati montati direttamente sui macchinari, i quali possono essere monitorati per lungo periodo e in situazioni normali di lavoro, con tutte le variabili considerabili in ambito forestale (condizioni meteorologiche diverse, stato del suolo ecc.).

Metodi di *follow-up* ben si adattano allo studio dei cicli di lavoro di harvester, forwarder e skidder dove dato l'alto livello di informatizzazione della strumentazione è possibile installare sistemi di raccolta automatica dei dati quali il CAN-Bus data logger, utilizzato anche per questo studio. I dati raccolti vengono poi tradotti ed elaborati con software statistici e GIS per la creazione del modello di lavoro.

Delle succitate macchine forestali troviamo molti studi di eco-efficienza per harvester e forwarder, mentre la ricerca si è concentrata meno sugli skidders, nonostante in Europa si conti un parco macchine di almeno 8370 mezzi (Spinelli, Magagnotti, Visser, & O'Neal, 2021).

Da qui nasce l'idea di fare uno studio per la creazione di un modello lineare predittivo di lavoro di uno skidder nell'arco alpino ed in particolare nell'altopiano del Cansiglio.

2. Obiettivi del lavoro

Obiettivo 1: impiego dati macchina per l'analisi dei tempi di lavoro

Confronto delle informazioni acquisite tramite CAN-BUS con il rilievo manuale con metodo tradizionale. Analisi delle attività della macchina utilizzando un software GIS con l'obiettivo di identificare i tempi di lavoro, la localizzazione, gli spostamenti e i consumi orari, e successiva analisi grezza dei tempi con distinzione dei tempi in movimento, di sosta, di carico e scarico.

Calcolo della pendenza media e della lunghezza delle piste percorse dallo skidder e analisi descrittiva dei tre cantieri considerati.

Obiettivo 2: valutazione dell'eco-efficienza dei cantieri

Caratterizzazione dei parametri importanti in termini di eco-efficienza (tempo e consumi) e valutazione delle variabili influenti su di essi. Analisi predittiva sull'effetto di tali fattori attraverso la creazione di modelli lineari che rendono apprezzabile l'evoluzione della curva delle funzioni tempo e consumo.

Verifica dell'attendibilità dei modelli e simulazione di utilizzo in ambito previsionale.

3. Materiali e metodi

3.1 Impostazione del lavoro

3.1.1 Macchina oggetto di studio

Lo skidder è una macchina utilizzata nelle operazioni forestali per il trasporto dei tronchi tagliati dal luogo di abbattimento all'imposto. Questa macchina è progettata per operare anche in terreni difficili e può essere sia gommata che cingolata. La sua capacità di manovra e la potenza consentono di spostare grandi quantità di legname, ottimizzando così i tempi di esbosco.

Gli skidder sono di solito dotati di una benna anteriore e di verricello, clambunk e braccio idraulico posteriori per facilitare il carico dei tronchi su rimorchio o camion. La principale differenza tra skidder e forwarder è che i primi sono progettati per l'esbosco a strascico dei tronchi fino al piazzale di carico mentre i secondi per il trasporto in quanto attrezzati con rimorchio forestale. Normalmente con questo tipo di macchina si utilizza un sistema di esbosco a pianta intera (F.T.S.) o eventualmente a fusto intero (T.L.S.).

Come accennato in precedenza lo skidder ha visto il suo ingresso nel mercato delle macchine forestali negli anni '50 in Nord America ma solo in tempi recenti ha visto una buona diffusione anche in Europa.

Skidder Equus 175 N

La macchina oggetto di studio è lo skidder Equus 175 N, un mezzo di dimensioni e capacità medie rispetto ad altri concorrenti sul mercato, ma pensato per lavorare in svariate condizioni di pendenza e di suolo adattandosi anche alle esigenze di piccole imprese operanti in diversi ambiti montani. L'impresa in cui sono stati svolti gli studi per il presente lavoro è dotata della versione 175 UN (Figura 3.1), ossia quella munita di braccio idraulico, clambunk e verricello. Esistono però le versioni 175 N, che sarebbe la base da accessoriare e la versione 175 N UH munita di processore.

I primi modelli sono stati prodotti da Equus in Slovacchia nel 2014 come risposta alle esigenze di molti clienti dell'azienda che desideravano una macchina robusta, duratura, di facile manutenzione e con caratteristiche paragonabili ad altri skidder sul mercato ma ad un prezzo più accessibile. Tra il 2014 e il 2015 sono stati venduti 30 trattori, successivamente la produzione è aumentata ed attualmente vengono prodotti in media 3-4 trattori al mese. Quasi tutte le componenti strutturali di questi mezzi sono prodotte all'interno dell'azienda, che ne garantisce alti standard qualitativi, inoltre permette al cliente di personalizzare i vari accessori montati secondo le proprie esigenze.

Lo skidder Equus 175 N monta un motore diesel Cummin B4.5, con sistema di iniezione Common Rail sviluppante una potenza massima di 129 kW con una coppia di 710 N/m. Questa motorizzazione rientra nella classe di emissioni Stage 5 e rispetto ad altri sistemi concorrenti permette di risparmiare fino al 20-30% di carburante per metro cubo di legname esboscato. La potenza sviluppata da questo motore a 4 cilindri permette di raggiungere senza problemi i 40 km/h negli spostamenti su strada carrozzabile.

La struttura del trattore è formata da due telai uniti tra loro da uno snodo centrale che permette il movimento indipendente delle due sezioni sia sull'asse orizzontale che verticale. Sul telaio anteriore è montata la cabina di guida, il motore con i relativi circuiti, la pompa idraulica dei freni e della guida del trattore, il motore idraulico di trazione collegato alla scatola di trasmissione (che trasmette il momento meccanico agli assi attraverso i cardani), il distributore del sistema di frenata e gli elementi di regolazione dell'idraulica. È inoltre montata una benna a comando idraulico.

Nel telaio posteriore troviamo invece il potente verricello a doppio tamburo dalla potenza di traino fino a 2 x 15 t, il braccio idraulico girevole Equus HR 120/75 o 120/61 con un momento di 120 kN/m e un raggio di azione di 7,5 o 6,1 m e la pinza clambruck per il trasporto dei tronchi.



Figura 3.1: Skidder Equus 175 UN completo di braccio idraulico, clambruck e verricello a doppio tambur. Foto da www.equuseu.com

Le dimensioni dello skidder Equus 175 UN sono di 6,2 m di lunghezza con un passo di 3,21 m, 2,41 m di larghezza, un'altezza di 2,83 m totali e 0,54 m da terra, il peso accessorio di gru e verricello è di 9260 kg. Il caratteristico baricentro basso rispetto agli altri skidder di questa categoria lo rendono particolarmente adatto al lavoro su terreni sconnessi e pendenti (Brochure Equus 11_2017, 2017).

Si riporta negli allegati la tabella riassuntiva di tutte le caratteristiche tecniche della macchina (Allegato 1).

Inquadramento della macchina rispetto alle altre macchine presenti sul mercato

Confrontato con gli altri skidder presenti sul mercato attuale, il modello Equus 175 N presenta caratteristiche di potenza medio-alte rispetto ai mezzi prodotti in Europa, ad esempio dalla Hittner o dalla Irum. Se confrontato con marche extraeuropee quali Tigercat o John Deere il veicolo in questione si posiziona tra i più piccoli in termini di potenza (Figura 3.2).

Si osserva però che modelli di pari prestazioni quali Tigercat 602 (129 kW), HSM 805 (129 kW) pesano rispettivamente 6,3 e 3,34 t in più, mentre modelli di peso simile a quello in esame, come l'HSM 805S e l'Irum 690 S5 hanno una potenza inferiore di 25 e 29 kW. Per una descrizione dettagliata dei vari modelli si rimanda alla tabella presente negli allegati (Allegato 2).

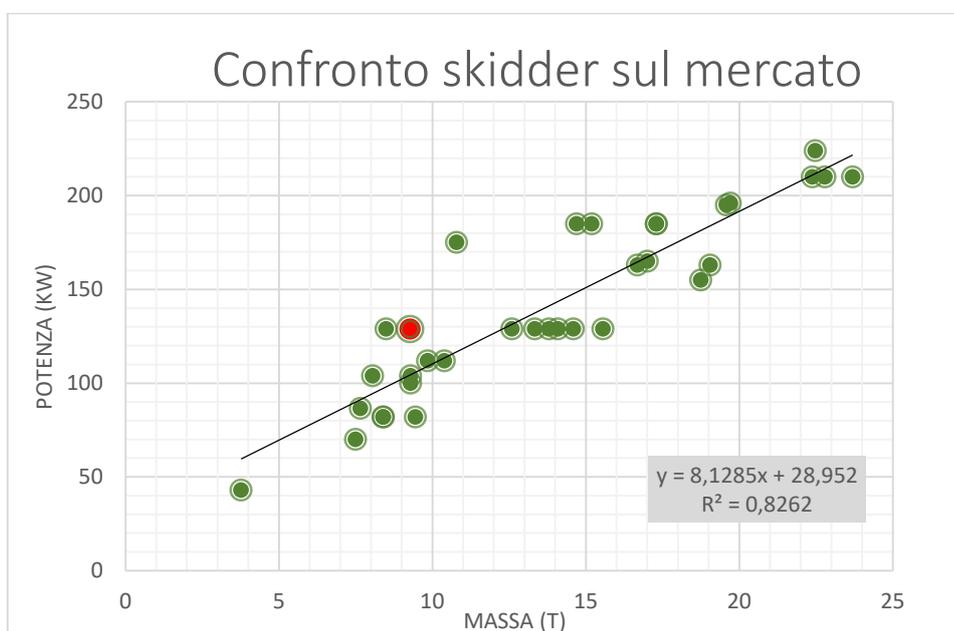


Figura 3.2: confronto delle caratteristiche degli skidders attualmente presenti sul mercato. Si è considerato il rapporto tra la massa (t) e la potenza (kW). Il modello in esame è rappresentato dal pallino rosso.

Possiamo quindi dire che l'obiettivo di Equus di creare uno skidder dalle prestazioni elevate, ma dalle dimensioni contenute adatto a lavorare in terreni impervi sia stato raggiunto.

2.1.2 Strumenti e analisi

Sistema Can-bus

Il Controller Area Network (CAN-bus) è un sistema di comunicazione seriale ampiamente utilizzato nell'ambito dell'automazione e del controllo, incluso il settore automobilistico. È stato

sviluppato negli anni '80 da Bosch per semplificare la complessità dei cavi nei veicoli e migliorare la comunicazione tra i vari sistemi elettronici. Il CAN-bus consente a diversi componenti elettronici di un veicolo (o di altri sistemi automatizzati) di comunicare tra loro senza la necessità di un grande numero di cavi separati, ma utilizzando un set di cavi a due fili per trasmettere i dati tra i nodi della rete.

Le caratteristiche principali di questo strumento sono:

- Velocità di comunicazione elevata: Il CAN-bus è progettato per trasmettere dati ad alta velocità, il che è essenziale per consentire una comunicazione rapida ed efficiente tra i vari componenti del veicolo o del sistema.
- Topologia a bus: Il sistema utilizza una topologia a bus, il che significa che tutti i nodi sulla rete condividono lo stesso canale di comunicazione. Questo riduce il cablaggio complessivo e semplifica l'installazione.
- Priorità di messaggi: Il CAN-bus assegna priorità ai diversi messaggi sulla base dell'identificatore del messaggio, consentendo di gestire efficacemente la priorità di comunicazione tra i vari componenti.

Il CAN-bus è ampiamente utilizzato in tutti i settori in cui sia richiesto un sistema di comunicazione affidabile tra dispositivi elettronici. Questa comunicazione avviene secondo un modello basato su bit dominanti e bit recessivi, in questo modo tutte le volte che si impone una differenza di potenziale la rete rileva che si tratta di un bit dominante. I messaggi (frame) inviati dal sistema CAN-bus possono avere due formati, base format (11 bit) e extended format (29 bit), questi si dividono poi in quattro tipologie:

- Data frame, che contiene i dati trasmessi;
- Remote frame, che richiede la trasmissione di un certo identificatore;
- Error frame, trasmesso da qualsiasi nodo che trasmette un errore;
- Overload frame, che introduce un ritardo fra data frame e remote frame (www.veicolux.it, s.d.).

Collegando a questo sistema un CAN-bus data logger è possibile intercettare i dati che vengono inviati e ricevuti dal computer di bordo, registrandoli e traducendoli in file leggibili da un normale computer, quali ad esempio file Excel.

Nella raccolta dati di questa tesi è stato utilizzato il data logger CANedge2 della CSS electronics (Figura 3.3 e Allegato 3), un registratore autonomo sviluppato per eseguire analisi e diagnostica di veicoli e macchine dotate di sistema CAN-bus. Registra i dati su una scheda SD ed è collegabile via Wi-

Fi per scaricare il materiale registrato. Viene alimentato direttamente dal veicolo a cui è collegato permettendo così il rilievo dei dati per lunghi periodi di lavoro. Grazie a questo strumento è stato possibile ottenere i dati relativi al consumo istantaneo, alla posizione GPS della macchina e i suoi spostamenti, nonché distinguere il tipo di lavoro che stava facendo la macchina in ogni momento.



Figura 3.3: CANedge2 (CSS electronics, DK) con il modulo per l'acquisizione dati CAN e modulo IMU (Inertial Movement Unit).

Analisi dati e integrazione GIS

Una volta acquisiti i dati del CAN-bus questi sono stati elaborati utilizzando tre diversi software:

- R: è un software open source progettato per l'analisi e la modellazione statistica. Fornisce un set completo di funzioni statistiche e matematiche, che lo rendono adatto all'analisi dei dati in vari campi, inoltre è possibile estendere le sue capacità di analisi attraverso pacchetti di estensione che coprono una vasta gamma di argomenti quali ad esempio l'apprendimento automatico e l'analisi con metodi statistici specializzati (r-project.org, s.d.).

Nel presente lavoro questo software ha permesso di filtrare i dati raccolti e discriminare la loro validità tramite un confronto con un database di dati raccolti manualmente. Una volta fatte le analisi descrittive con Excel è stato utilizzato per la creazione dei modelli lineari predittivi di lavoro.



Figura 3.4: logo software R.

- Microsoft Excel: è un programma basato su fogli di calcolo sviluppato da Microsoft che fa parte della suite di software di produttività Microsoft Office. E' progettato per attività che vanno dall'immissione e calcolo di dati di base alla modellazione complessa e all'analisi dei dati. L'interfaccia è composta da una griglia di celle organizzate in righe e colonne, ogni cella può contenere testo, numeri o formule e funzioni utilizzate per il calcolo. Fornisce strumenti per creare vari tipi di diagrammi e grafici per visualizzare i dati e include funzionalità per ordinare e filtrare i dati, nonché strumenti per creare tabelle pivot per analizzare e riepilogare set di dati di grandi dimensioni.

Excel si integra perfettamente con le altre applicazioni di Microsoft Office, per cui è molto semplice copiare tabelle e grafici per inserirle in programmi di testo come Word, Powerpoint ecc. (softonic.com, s.d.).



Figura 3.5: logo Microsoft Excel.

- Quantum-GIS (QGIS): il GIS (*Geographic Information System*) è un sistema progettato per acquisire, archiviare, analizzare, gestire e presentare dati spaziali o geografici. Integra vari tipi di dati, come mappe, immagini satellitari e dati statistici, per fornire una comprensione completa di una posizione o di una regione. I dati possono essere visualizzati come immagini raster o vettoriali, quindi come punti, linee e poligoni. I sistemi GIS acquisiscono dati da una varietà di fonti, tra cui immagini satellitari e aeree, dispositivi GPS, sondaggi e mappe esistenti. Questi dati georeferenziati vengono poi digitalizzati e archiviati in un database geospaziale. Questa piattaforma consente un'analisi spaziale sofisticata, consentendo agli utenti di esaminare relazioni, modelli e tendenze all'interno dei dati geografici. Ciò può includere la sovrapposizione di diversi livelli di informazioni, analisi di prossimità e modellazione spaziale (Vettore).

Nel presente lavoro per effettuare l'analisi vettoriale dei dati raccolti è stato utilizzato il software QGIS (*Quantum Geographic Information System*), un sistema informativo geografico open source molto potente. È compatibile con tutti i principali sistemi operativi e ha un'interfaccia user-friendly che include strumenti per la progettazione della mappa, la modifica dei dati e l'analisi spaziale. Supporta un'ampia gamma di formati quali: formati vettoriali (come Shapefiles e GeoJSON) e formati raster (come GeoTIFF e JPEG), è inoltre compatibile con i formati Excel permettendo di importare database di dati georeferenziati. QGIS ha un'architettura di plugin che

consente agli utenti di estendere le sue funzionalità. Gli utenti possono installare plugin per aggiungere strumenti o funzionalità specifici in base alle loro esigenze, migliorando le capacità del software (qgis.org, s.d.). Il sistema permette la sovrapposizione di dati spaziali attraverso la creazione di diversi layers, consente di creare buffer e modificare caratteristiche nei livelli vettoriali, come ad esempio l'unione di una serie di punti in linee o poligoni. Importando dati tridimensionali DTM (Modello Digitale del Terreno) contenenti il profilo altimetrico dell'area permette lo studio di distanze, pendenze ecc. reali e non planimetriche.

Nel presente studio il sistema è stato utilizzato per unire tutti i punti rilevati dal sistema GPS dello skidder in linee rappresentanti le piste di esbosco percorse. Queste linee sono poi state analizzate con gli appositi strumenti plugin per ottenere lunghezza e pendenza di esse e creare un database contenente tutte le informazioni necessarie per la successiva analisi e modellazione statistica. I metodi specifici di analisi utilizzati verranno descritti nei capitoli a seguire.



Figura 3.6: logo Quantum GIS.

2.2 Impiego dati macchina per l'analisi dei tempi di lavoro

3.2.1 Rilievo dei dati

La raccolta dei dati è avvenuta con l'utilizzo del CAN-BUS data logger, tramite il quale è stato possibile monitorare completamente tutte le attività svolte dallo skidder da febbraio alla fine di ottobre. Di tutti i dati rilevati sono stati poi selezionati quelli relativi a tre specifici cantieri, che per caratteristiche morfologiche del luogo e tipologia di lavoro svolto, meglio rispondevano alle nostre esigenze per questo studio. Bisogna inoltre sottolineare che in questa fase siamo molto condizionati dal meteo, in quanto il lungo periodo di piogge primaverili ed estive di quest'anno non ha permesso all'impresa di utilizzare lo skidder nelle fasi di esbosco, o comunque non di utilizzarlo a pieno regime. Successivamente il particolare sistema di lavoro imposto dalle prescrizioni di alcune particelle utilizzate nel lato Friulano del Cansiglio non ha permesso di ottenere dati confrontabili con un utilizzo standard della macchina. Tutto ciò ha causato un notevole ritardo nella raccolta dei dati, riducendo anche il database utilizzabile per lo studio. Ciò nonostante siamo riusciti ad analizzare i dati relativi a 345 cicli selezionati di esbosco divisi nei tre diversi cantieri.

Dell'enorme database di informazioni rilevate sul funzionamento dello skidder, quelle utilizzate nell'elaborazione dei modelli sono:

- Data e ora; il CAN-BUS ha registrato un'informazione al secondo per tutto il periodo di rilievo;
- Quota altimetrica;
- Distanza;
- Consumo istantaneo;
- Coordinate geografiche x e y;
- Fasi di lavoro (spostamento, carico/scarico ecc.).

E' stata inoltre dedicata una giornata di rilievo manuale dei tempi di lavoro, questo ci ha permesso nella prima fase di analisi di fare un confronto con il software R dei cicli svolti in quella giornata. In questo modo abbiamo testato l'attendibilità dei dati CAN-BUS e selezionato solo i cicli di lavoro che rispondevano all'algoritmo imposto dal software.

La fase di rilievo tradizionale si è svolta osservando il lavoro della macchina e registrando l'ora precisa di ogni fase di lavoro per 21 cicli. In quella giornata è stato montato anche un accelerometro sul braccio idraulico. Confrontando i consumi rilevati nei momenti di movimento del braccio, ci è stato possibile discriminare nel database CAN-BUS l'operazione svolta nei momenti in cui la macchina era ferma, ossia se era in fase di carico/scarico con la gru o se stava utilizzando il verricello (che ha un consumo diverso). Questo è stato necessario perché nelle informazioni rilevate dal sistema si distinguevano solo operazioni di spostamento, di carico/scarico e di fermo macchina.

Differenziate tutte queste informazioni si è potuto distinguere l'orario di inizio e di fine di ogni ciclo di esbosco, suddividendo di conseguenza i dati e creando una colonna con il numero di ciclo.

3.2.2 Analisi GIS

Una volta selezionati i cicli di lavoro con R è stato creato un foglio Excel per ogni giornata di attività contenente tutti i dati rilevati quel giorno (molte migliaia di righe per foglio) e salvato con un formato .csv per poterlo importare come vettore in QGIS.

Nella prima fase del lavoro di elaborazione GIS sono stati creati e/o processati i layer necessari per la successiva analisi vettoriale. Utilizzando il plugin *QuickMapServices* ho impostato come base di lavoro la cartografia di *Google Satellite*. Successivamente ho importato tutti i fogli Excel delle giornate di lavoro come layer "testo delimitato", definendo quali erano le colonne relative alle coordinate x e y

dei punti. In questo modo è stato creato un layer per ogni giorno, contenente tutti i punti rilevati dal CAN-bus georeferenziati sul sistema EPSG:32633 – WGS 84 / UTM zone 33N. Sull'immagine satellitare di Google si sono quindi visualizzati tutti gli insiemi di punti delle varie giornate. Ultima fase di creazione dei layer è stata importare le immagini raster dei DTM dell'area i quali sono stati scaricati dal Geoportale della Regione Veneto e Friuli-Venezia-Giulia. In questa fase è importante ordinare in maniera corretta i layer per la visualizzazione in quanto l'ordine di visualizzazione di QGIS parte dall'alto e quindi se lasciamo in cima l'immagine satellitare questa risulterà sovrapposta agli altri elementi, che non saranno visibili. Una volta creata la base di lavoro sono stati divisi i vari cicli di ogni giornata andando sulle proprietà del layer e utilizzando il comando "simbologia", "categorizzato", inserendo come parametro "cycle_number" e cliccando su classifica. Ad ogni ciclo è stato anche assegnato un diverso colore.

La seconda fase ha visto il calcolo della lunghezza dei cicli di lavoro. Per fare ciò si sono utilizzati gli strumenti di processing per creare un vettore utilizzando il plugin "da punti a percorso", il quale unisce tutti i punti selezionati in una linea. Selezionando quindi la colonna "hour" come espressione di ordinamento e "cycle_number" come espressione del gruppo si è quindi creata la linea collegante tutti i punti di ogni ciclo, corrispondente alla pista utilizzata per l'esbosco. Il tutto è stato salvato nel formato shapefile.

Create le linee si è aperta la relativa tabella degli attributi, composta da una colonna con il numero di ciclo, una per l'ora di inizio e una per quella di fine di ogni ciclo della giornata. È stato aggiunto poi il campo "length", dopo di che nel "calcolatore di campi" si è selezionata l'espressione geometrica "\$length", in questo modo viene calcolata la lunghezza di ogni linea (e quindi ciclo) di quel giorno.

Nella terza fase di analisi è stata calcolata la pendenza per ogni pista di esbosco. Partendo dalle linee create in precedenza è stato utilizzato lo strumento di processing "road slope calculator", inserendo come parametro il DTM dell'area e come lunghezza del segmento "50m", ossia 5 volte la dimensione del pixel del DTM (come richiesto dal sistema). In questo modo viene calcolata la pendenza media per segmenti di tale lunghezza. Anche in questo caso il vettore è stato salvato come shapefile.

Aperto le proprietà del layer e selezionato su "simbologia" l'opzione "graduato", inserendo come valore "slope%" e cliccando su "classifica", ogni segmento di linea viene classificato in una classe di pendenza, a cui viene assegnato un diverso colore nella visualizzazione generale.

Una volta eseguite queste elaborazioni, le tabelle degli attributi dei relativi vettori sono state esportate in file Excel, per poi eseguire una statistica descrittiva dei cantieri con quest'altro software.

3.2.3 Preparazione dataset

Con il programma Excel è stato creato un foglio di calcolo per cantiere, contenente tutte le tabelle degli attributi delle linee usate per il calcolo della lunghezza. Queste contenevano 5 colonne di informazioni:

- Giorno, contenente la data;
- Cycle_number, con la lista ordinata in numero crescente dei cicli di lavoro;
- Begin, l'orario di inizio del ciclo;
- End, l'orario di fine ciclo;
- Length, la lunghezza della pista calcolata con il GIS.

è stata quindi aggiunta la colonna time, dove sottraendo all'orario "end" il "begin" si è calcolato il tempo impiegato per effettuare quel ciclo.

Sfruttando invece i database contenenti tutte le informazioni raccolte dal CAN-bus è stato calcolato il consumo istantaneo dello skidder. La colonna Engine Fuel conteneva l'informazione sul consumo espresso in litri/ora per ogni riga di dati (una ogni secondo del ciclo). Dividendo questo per 3600 è stato ottenuto il consumo in litri/secondo, ossia quello effettivo in quel momento di rilievo. La colonna ottenuta è stata denominata "consumo". Dopo di che si è sommata la colonna di ogni ciclo, ottenendo così il consumo effettivo. Per fare ciò, vista la mole dei dati, sono state utilizzate delle tabelle pivot, selezionando le colonne "cycle_number" e "consumo" e selezionando come valore "somma di consumo". In questo modo è risultata una tabella riportante per ogni ciclo della giornata il numero effettivo di litri di carburante consumati.

Nella terza fase di lavoro sono state create delle tabelle riepilogative con tutti i dati elaborati per ogni ciclo di ogni cantiere. Queste erano composte di 6 colonne:

- Giorno, con la data;
- N° ciclo;
- Tempo, contenente il tempo impiegato per ciclo;
- Pendenza, riporta la pendenza media per ciclo, ed è stata copiata dalla tabella degli attributi delle linee elaborate con il "road slope calculator" in QGIS;
- Lunghezza, dove è presentata la lunghezza della pista, copiata dalla colonna "length" di cui sopra;
- Consumo, in cui è riportato il consumo in litri per ciclo calcolato in precedenza.

Ordinati tutti i dati si sono create delle tabelle riassuntive delle informazioni elaborate in modo da ottenere la descrizione delle caratteristiche dei tre cantieri. In queste ho calcolato per ogni giornata:

- N° cicli: numero totale di cicli considerati in quel giorno;
- Tempo medio: media del tempo impiegato per ciclo;
- Tempo totale: somma dei tempi di ogni giornata;
- Pendenza media: pendenza media delle piste di esbosco;
- Lunghezza media: lunghezza media delle piste;
- Lunghezza totale: somma dei metri di piste percorse in una giornata;
- Consumo medio: consumo medio di ogni ciclo della giornata;
- Consumo totale: litri di carburante consumato in ogni giornata.

Si aggiunge in seguito una tabella riportante le caratteristiche totali dei tre cantieri (Tabella 3.1). Le tabelle riassuntive di cui sopra vengono presentate tra gli allegati.

CANTIERE	Cicli	Tempo		Pendenza	Lunghezza		Consumo	
		medio	totale	media	media	totale	medio	totale
ID	n°	min	min	%	m	m	l/ciclo	l
1	80	0:19:44	24:51:35	12,6	529,7	41005	2,41	184,5
2	98	0:25:21	42:05:00	8,8	885,9	86152	4,14	407,2
3	167	0:18:14	48:37:52	1,2	756,6	119211	3,02	475,6
Totale	345	0:21:07	115:34:27	7,5	724,1	246368	3,19	1067,4

Tabella 3.1: riassunto informazioni dei 3 cantieri considerati.

Come osservabile dalla tabella, nel presente studio sono stati considerati 345 cicli completi di lavoro, per un totale di più di 115 ore di utilizzo dello skidder, oltre 246 km di piste percorse ed un consumo totale di circa 1067 l di carburante.

3.3 Modelli di produttività

3.3.1 Descrizione dei cantieri

Come già accennato, di tutti i rilievi effettuati in questi mesi di monitoraggio sono stati selezionati 3 cantieri precisi. La scelta è stata in parte condizionata dalle condizioni meteorologiche avverse che hanno limitato l'utilizzo dello skidder da parte dell'impresa per lunghi periodi, tuttavia i cantieri scelti rispondevano ad alcuni precisi parametri:

- Utilizzo dello skidder in fase di esbosco;

- Esbosco con sistema T.L.S. o F.T.S.;
- Diverse condizioni di pendenza;
- Diverse distanze di esbosco;
- Durata del cantiere di almeno qualche giorno.

Motivo di esclusione di molti cantieri è stato proprio quest'ultimo parametro, in quanto in questo periodo sono state utilizzate numerose particelle di piccole dimensioni, per cui la fase di esbosco era molto breve e per contro si è riscontrato un elevato tempo morto per i trasferimenti da sito all'altro di lavorazione.

Cantiere 1

Il primo cantiere scelto si trovava nella zona del Cansiglio, lungo la strada del Taffarel non distante dal villaggio Cimbro di Vallorch (Figura 3.7), in comune di Tambre (BL). La quota era di 1350 m s.l.m. circa e il cantiere era raggiungibile attraverso una strada forestale che collega la strada che sale al Pizzoc con i pascoli della malga Mezzomiglio, tagliando a metà costa una vasta area forestale.

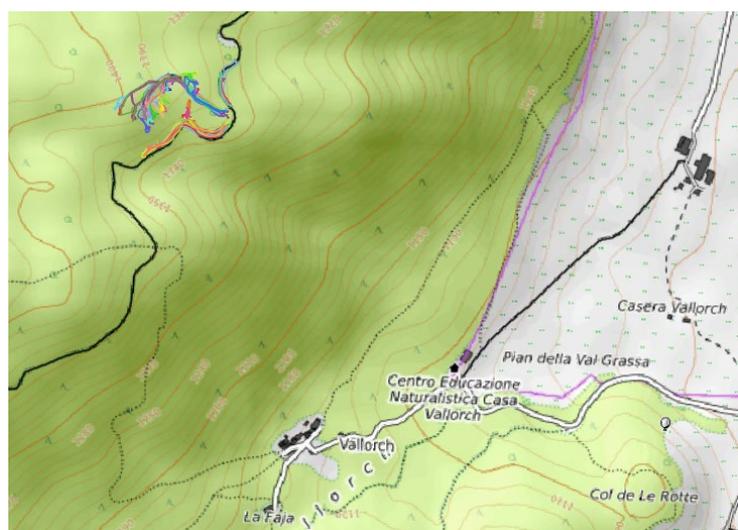


Figura 3.7: localizzazione del cantiere 1. Le linee colorate rappresentano le piste di esbosco.

L'ambiente forestale presente in quest'area è la fustaia di faggio (*Fagus sylvatica*, L.), riconducibile alla tipologia della faggeta montana, sottocategoria dei substrati carbonatici tipica esalpica (Del Favero, 2004).

Il faggio è una delle specie più frequenti sull'arco alpino. La sua presenza è legata ad ambienti con inverno freddo, ma non troppo, primavera piovosa, nebbiosa e senza gelate, periodo vegetativo lungo, ma senza eccessi di evapo-traspirazione, suolo con ottime caratteristiche fisiche (Bernetti, 1995). La disponibilità idrica è fondamentale per questa specie ed è anche il fattore che più differenzia le caratteristiche delle varie tipologie di faggete. La natura del substrato non sembra essere

particolarmente influente, sebbene il faggio mostri le migliori performance produttive su suoli carbonatici, è comunque in grado di vivere anche in condizioni di maggiore acidità (Rob, 1997). Importante per questa specie è invece la disponibilità di azoto, il quale assorbimento diventa limitato in substrati con pH più bassi, ma comunque possibile grazie alla capacità delle radici di tamponare l'acidità nell'area d'influenza della rizosfera (Sanesi & Cecchini, 1999). Nella fascia montana della regione esalpica, come in Cansiglio, il faggio trova il suo optimum e esprime la massima competitività. In queste aree le faggete sono per lo più pure e il sottobosco è costituito da specie basofile. Tra le piante arboree che possono occasionalmente insediarsi abbiamo l'abete rosso (*Picea abies*, L.), al limite meridionale della sua area ottimale di diffusione e l'abete bianco (*Abies alba*, Mill.), nelle aree più interne della regione o nei versanti a Nord. Entrambe le specie presentano comunque una crescita irregolare. In ambienti marginali, come il fondo di strette valli fluviali è possibile trovare l'acero montano (*Acer pseudoplatanus*, L.) e il frassino (*Fraxinus excelsior*, L.), mentre in terreni superficiali ricchi di scheletro possono insediarsi il pino silvestre (*Pinus sylvestris*, L.) e il pino nero (*Pinus nigra*, J.F.Arnold) (Del Favero, 2004). Nel bosco utilizzato in questo cantiere il faggio si trovava comunque in purezza.

L'esbosco delle particelle di questo cantiere è avvenuto tra il 18 e il 26 maggio 2023. Sono stati necessari 80 cicli di lavoro, per un tempo totale di utilizzo dello skidder di 24.51 ore. La pendenza media delle piste è stata del 12,57%, senza considerare le ultime due giornate di lavoro, in cui la macchina si è spostata solo lungo la strada forestale per spostare il legname al piazzale di carico. In totale sono stati percorsi 41 km e consumati 184,5 l di gasolio (Tabella 3.2).

CANTIERE	Cicli	Tempo		Pendenza	Lunghezza		Consumo	
		medio	totale		media	media	totale	medio
Giorno	n°	min	min	%	m	m	l/ciclo	l
18/05/2023	11	0:24:48	4:32:43	13,744	448,818	4937	2,431	26,740
19/05/2023	9	0:26:05	3:54:47	14,196	706,667	6360	3,409	30,683
22/05/2023	18	0:18:42	5:36:36	11,740	539,167	9705	2,339	42,100
23/05/2023	12	0:27:29	5:29:50	10,593	721,333	8656	3,037	36,446
25/05/2023	16	0:09:10	2:26:40	0,000	337,188	5395	1,442	23,070
26/05/2023	14	0:12:13	2:50:59	0,000	425,143	5952	1,824	25,538
Totale	80	0:19:44	24:51:35	12,568	529,719	41005	2,414	184,576

Tabella 3.2: tabella riassuntiva dei cicli di lavoro del cantiere 1.

Cantiere 2

Il secondo cantiere scelto si trovava sempre nella zona del Cansiglio ma nel versante opposto della piana (Figura 3.8), sul Monte Candaglia in comune di Caneva (PN) a 1300 m s.l.m. circa. Anche in quest'area la tipologia forestale era la medesima, tuttavia nella faggeta era presente sporadicamente dell'abete rosso.

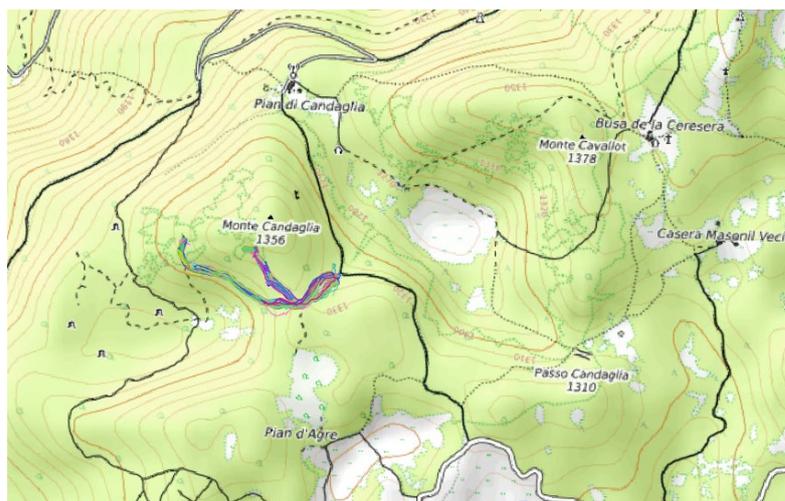


Figura 3.8: localizzazione del cantiere 2. Le linee colorate rappresentano le piste di esbosco.

In questa zona si è esboscato dal 19 al 30 giugno del corrente anno. Sono stati realizzati 98 cicli di lavoro, per un totale di 18.05 ore. La pendenza media delle piste è stata dell'8.85% e sono stati percorsi più di 86 km, con un consumo di carburante di 407 l (Tabella 3.3).

CANTIERE	Cicli	Tempo		Pendenza	Lunghezza		Consumo	
		medio	totale		media	media	totale	medio
2								
Giorno	n°	min	min	%	m	km	l/ciclo	l
19/06/2023	15	00:26:30	06:37:35	9,065	801,867	12028	4,169	62,537
20/06/2023	15	00:30:41	07:40:17	8,547	1089,600	16344	5,117	76,757
21/06/2023	15	00:26:57	06:44:16	9,033	1000,533	15008	4,238	63,573
22/06/2023	5	00:23:21	01:56:45	9,903	1051,000	5255	4,398	21,990
23/06/2023	9	00:22:31	03:22:36	8,897	794,889	7154	3,721	33,492
26/06/2023	12	00:24:01	04:48:08	8,506	844,667	10136	3,766	45,195
27/06/2023	12	00:25:34	05:06:51	7,893	780,417	9365	3,845	46,138
30/06/2023	15	00:23:14	05:48:32	8,953	724,133	10862	3,833	57,496
TOTALE	98	00:25:21	18:05:00	8,850	885,888	86152	4,136	407,179

Tabella 3.3: tabella riassuntiva dei cicli di lavoro del cantiere 2.

Cantiere 3

Il terzo cantiere si trovava vicino alla strada "Generale Cantore" che collega i paesi di Valeriano con quello di Mostacins (Figura 3.9), nel comune di Pinzano al Tagliamento (PN) ad una quota di circa 190 m s.l.m.



Figura 3.9: localizzazione del cantiere 3. Le linee colorate rappresentano le piste di esbosco.

Si tratta di un'area di lavoro completamente differente dalle precedenti ed è stata scelta perché completamente pianeggiante. L'idea era quella di poter avere dei dati per la modellazione predittiva che escludevano la pendenza tra le variabili influenti, per poter fare un confronto di quanto questa incidesse. La specie esboscata in questo caso è stata la Robinia (*Robinia pseudoacacia* L.) e la tipologia forestale era il robinieto.

La Robinia è una delle specie esotiche maggiormente diffuse in Italia, riesce a partecipare come specie principale o minoritaria di molte formazioni costituendo anche soprassuoli puri (Del Favero, I BOSCHI DELLE REGIONI ALPINE ITALIANE. Tipologia, funzionamento e selvicoltura., 2004). È stata introdotta in Europa dal Nord America all'inizio del 1600 per scopi ornamentali, ma il periodo in cui è stata maggiormente diffusa è stato nel secolo scorso tra i due conflitti mondiali, dove era necessario una rapida ricostruzione dei boschi (Gras, 1991). Fu introdotta nelle radure dei boschi degradati a causa di tagli eccessivi, in terreni agricoli marginali, scoscesi e dissestati e fu ampiamente impiegata nel consolidamento delle scarpate o nel rinverdimento dei margini delle linee ferroviarie (Mondino & Scotta, 1987). La Robinia raggiunge il massimo vigore tra i 300 e i 600 m di quota, nei basso versanti o nelle pianure, su terreni sciolti e freschi, anche non molto profondi ma con buona disponibilità idrica nel periodo estivo, in pratica nelle stazioni potenzialmente adatte per i carpineti, quercu-carpineti e rovereti (I.P.L.A., 2000). Nella sua espansione non è stata contrastata da antagonisti naturali, pertanto ha avuto una diffusione sorprendente, colonizzando anche terreni poverissimi e sostituendosi alle specie arboree preesistenti, questo grazie all'elevata capacità pollonifera (Del Favero, 2004). I robinieti non sono accompagnati da uno specifico corredo floristico, tuttavia è frequente l'ingresso di specie quali il rovo e il sambuco.

Queste formazioni sono state normalmente gestite a ceduo, per la produzione di legna da ardere e paleria. La specie ha anche valore dal punto di vista mellifero e può essere utilizzata in cucina e in erboristeria. I turni applicati generalmente sono di 12-15 anni, se invece lasciato invecchiare oltre i 20-25 anni il robinieto inizia a deperire a causa di forti competizioni intraspecifiche che possono portare al collasso della formazione con conseguente sostituzione da parte di altre specie (Del Favero, 2004).

In questo cantiere si è lavorato dal 2 al 14 febbraio 2023. Sono stati eseguiti 167 cicli di esbosco per un totale di 48.37 ore di utilizzo dello skidder. La pendenza media delle piste è stata circa dell'1% e la distanza totale percorsa di oltre 119 km con un consumo complessivo di circa 475 l di carburante (Tabella 3.4).

CANTIERE	Cicli	Tempo		Pendenza	Lunghezza		Consumo	
		medio	totale		media	media	totale	medio
3								
Giorno	n°	min	min	%	m	km	l/ciclo	l
02/02/2023	26	00:13:44	05:56:53	1,368	411,731	10705	2,121	55,135
03/02/2023	19	00:16:32	05:14:09	1,203	622,474	11827	2,891	54,922
06/02/2023	14	00:18:24	04:17:40	1,010	745,071	10431	3,346	46,841
07/02/2023	17	00:16:49	04:45:55	0,926	747,706	12711	3,025	51,432
08/02/2023	13	00:21:47	04:43:09	0,952	923,692	12008	3,657	47,547
09/02/2023	16	00:19:28	05:11:25	1,180	856,688	13707	3,224	51,583
10/02/2023	10	00:20:40	03:26:36	0,955	914,400	9144	3,342	33,415
13/02/2023	34	00:15:05	08:32:44	1,289	631,265	21463	2,197	74,710
14/02/2023	18	00:21:38	06:29:21	1,426	956,389	17215	3,336	60,054
TOTALE	167	00:18:14	48:37:52	1,146	756,602	119211	3,015	475,639

Tabella 3.4: tabella riassuntiva dei cicli di lavoro del cantiere 3.

3.3.2 Analisi statistica e modelli di produttività

Completate tutte le analisi statistiche descrittive dei cantieri di cui sopra, si sono ottenuti tutti i dati necessari per eseguire l'analisi predittiva, attraverso dei modelli di lavoro. Questa fase è stata effettuata utilizzando il software R e ha visto la simulazione di 4 modelli GLM, elaborati utilizzando variabili differenti. Ciò ha permesso poi di fare un confronto dei risultati e capire quale di queste avesse un'influenza maggiore.

Il General Linear Model (GLM) è una tecnica statistica che comprende vari modelli utilizzati per l'analisi delle relazioni tra variabili dipendenti e una o più variabili indipendenti. Serve come generalizzazione del test t e dell'analisi della varianza (ANOVA).

La forma generale del GLM può essere espressa come:

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

Dove:

- Y è il vettore delle variabili dipendenti osservate.
- X è la matrice delle variabili indipendenti.
- β è il vettore dei parametri da stimare.
- ε è il vettore degli errori casuali.

Il GLM presuppone che gli errori (ε) seguono una distribuzione normale con media pari a zero e varianza costante. A seconda della distribuzione specifica della variabile dipendente, il GLM può essere adattato a diverse situazioni scegliendo un'appropriata distribuzione di probabilità degli errori.

I componenti del GLM includono:

1. Componente casuale: questa parte del modello descrive la distribuzione di probabilità della variabile di risposta.
2. Componente sistematica: questa parte rappresenta la combinazione lineare di predittori, ciascuno moltiplicato per un parametro (coefficienti o pesi).
3. Funzione di collegamento: la funzione di collegamento collega la componente sistematica alla componente casuale. Definisce la relazione tra il valore atteso della variabile di risposta e la combinazione lineare dei predittori.

Esistono vari tipi di GLM, nel nostro caso abbiamo utilizzato un modello di regressione lineare, in quanto la variabile di risposta segue una distribuzione normale.

Nel presente studio i parametri Y considerati sono stati il tempo e il consumo, mentre le variabili su cui calcolare il modello sono state: la pendenza, la lunghezza e il fattore cantiere, rappresentante le caratteristiche morfologiche del luogo.

I modelli prodotti sono quindi stati:

1. Modello TEMPO su PENDENZA, LUNGHEZZA e fattore CANTIERE;
2. Modello CONSUMO su PENDENZA, LUNGHEZZA e fattore CANTIERE;
3. Modello TEMPO su PENDENZA e LUNGHEZZA;
4. Modello CONSUMO su PENDENZA e LUNGHEZZA.

4. Risultati e discussione

4.1 impiego dati macchina per l'analisi dei tempi di lavoro

4.1.1 Verifica dei dati acquisiti dal CAN-BUS

Dopo aver scaricato i dati dal CAN-bus, averli selezionati con il software R e trasformati nel formato .csv in Excel, questi sono stati importati in QGIS, dove in precedenza era stata impostata come base di lavoro la mappa di Google Satellite. Il risultato è stata la visualizzazione di un elevatissimo numero di punti, corrispondenti a tutte le informazioni estrapolate dal CAN-bus, geolocalizzati attraverso le coordinate x e y rilevate dal GPS dello Skidder.

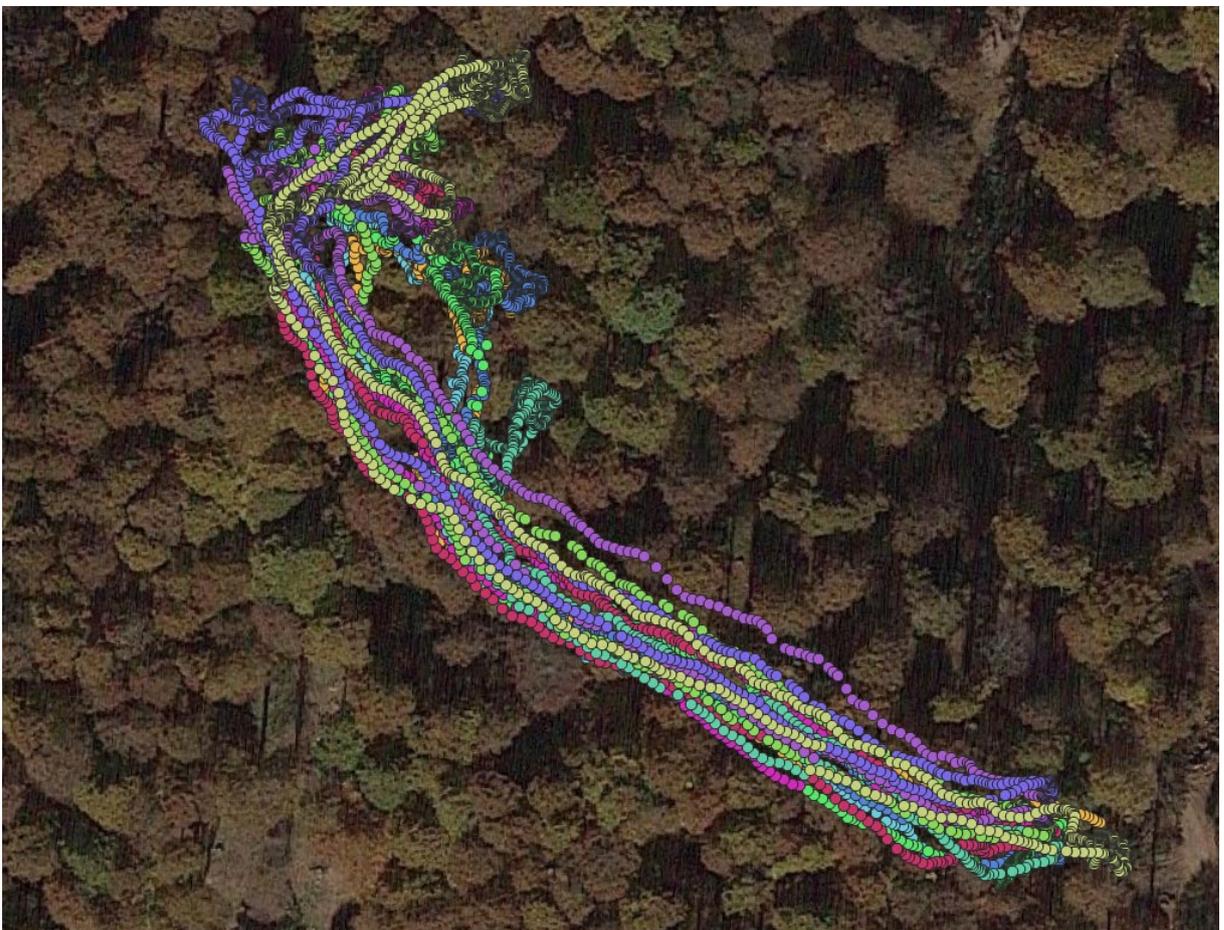


Figura 4.1: insieme di punti rilevati dal CAN-bus il 18/05/2023 nel cantiere 1. I diversi colori corrispondono ai vari cicli di esbosco.

L'immagine sopra (Figura 4.1) riporta l'insieme di punti rilevati nella sola giornata del 18/05/2023, ossia nel primo giorno di lavoro del cantiere 1. Per ogni giornata di lavoro si è quindi creato un fascio di punti corrispondenti alle piste di esbosco percorse, che ovviamente si allungava man mano che il cantiere progrediva. Si è scelto di riportare l'immagine relativa ad una sola giornata di lavoro per maggior chiarezza grafica, altrimenti la sovrapposizione dei punti percorsi creava difficoltà di interpretazione.

Grazie al sopralluogo effettuato in cantiere si è potuta constatare la corrispondenza dei rilievi GPS del dispositivo.

Il confronto con R dei tempi rilevati manualmente con quelli del CAN-bus ha dimostrato altrettanta compatibilità, pertanto si è potuto procedere con lo studio in quanto il metodo di raccolta dati è stato considerato attendibile. Tramite questo confronto è stato inoltre possibile discriminare le attività svolte dalla macchina:

- Spostamento;
- Utilizzo del braccio idraulico per il carico;
- Utilizzo del verricello;
- Utilizzo del *clambunk*;
- Fase di trasporto;
- Utilizzo del braccio idraulico per lo scarico.

4.1.2 Calcolo della distanza percorsa e dei tempi

Verificata la validità dei dati raccolti si è passati alla prima fase di elaborazione, ossia al calcolo della distanza percorsa e delle tempistiche impiegate per ogni ciclo di esbosco. Creando il vettore attraverso il plugin “da punti a percorso”, come descritto in precedenza (vedi capitolo Materiali e metodi), si sono costruite le linee che collegano i punti di ogni ciclo.

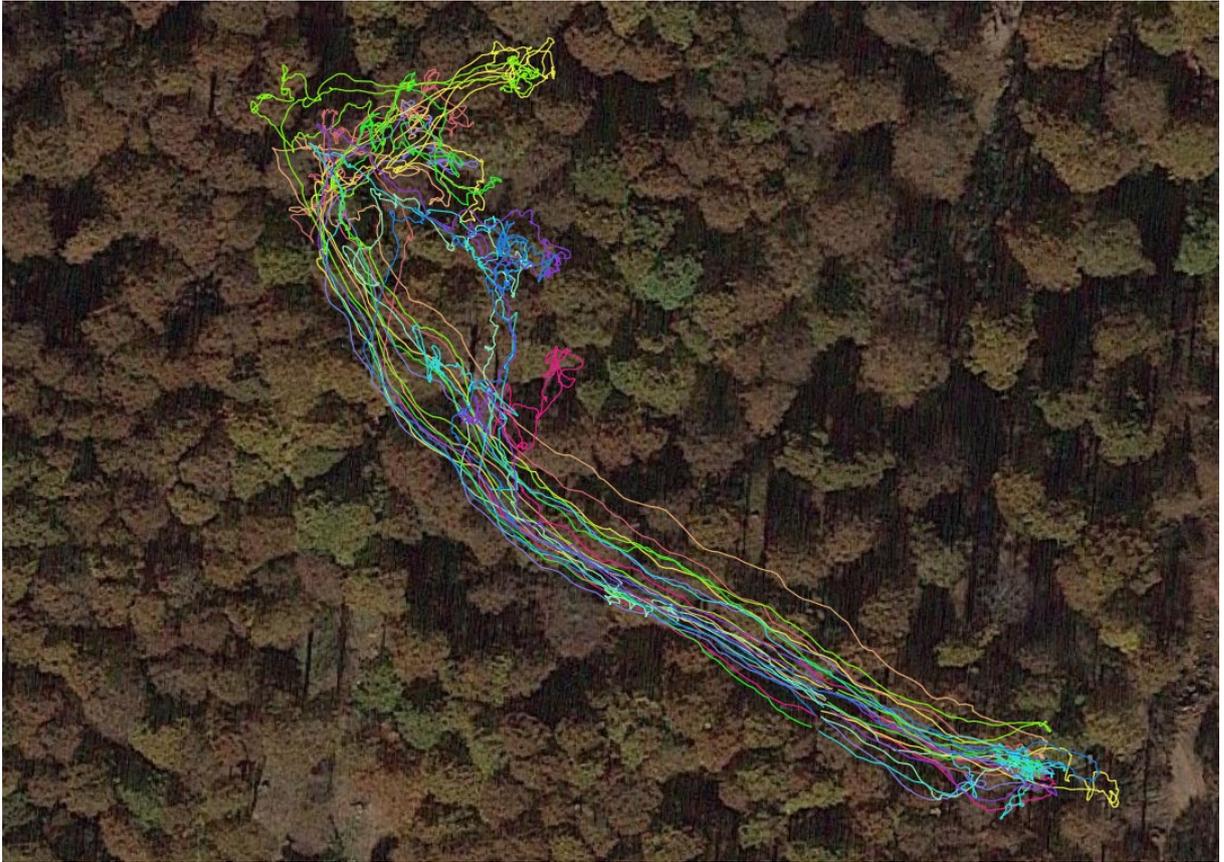


Figura 4.2: insieme di linee costruite partendo dai punti rilevati il 18/05/2023. I diversi colori rappresentano le diverse piste di esbosco.

Nell'immagine sopra (Figura 4.2) possiamo vedere come, attraverso questa elaborazione, sia possibile distinguere chiaramente le piste percorse dallo skidder nella giornata del 18/05/2023. Ogni linea rappresenta un ciclo di lavoro e ad essa corrisponde una tabella di attributi contenente le informazioni relative all'orario di inizio e fine ciclo e alla distanza percorsa.

Cycle_num	Begin	End	Lenght
	ora	ora	m
3	08:57:31	09:10:59	365
4	09:11:00	09:28:54	412
5	09:28:55	09:49:43	434
6	09:49:44	11:02:23	587
7	11:02:24	11:21:31	440
8	11:21:32	11:31:52	378
9	11:31:53	11:45:56	302
10	11:45:57	12:10:30	469
11	12:10:31	12:34:39	469
14	13:35:42	14:02:27	515
15	14:02:28	14:31:26	566

Tabella 4.1: informazioni relative all'orario di inizio (begin), quello di fine (end) e alla lunghezza in metri (lenght) dei cicli di lavoro del 18/05/2023.

Si riporta un esempio delle suddette tabelle di attributi delle linee (Tabella 4.1). Anche in questo caso ci si riferisce alla prima giornata di lavoro del cantiere 1. Tramite questo tipo di elaborazione era possibile ottenere diverse informazioni, tuttavia nei campi della tabella è stato selezionato di visualizzare solo quelle utili al nostro studio. Si può notare che nel numero di cicli mancano alcune cifre, questo è dovuto dalla precedente selezione dei dati effettuata con R.

Per ogni cantiere è stato a questo punto creato un foglio di calcolo in Excel dove sono state copiate queste tabelle per eseguire i successivi calcoli. Primo tra tutti è stato calcolato il tempo impiegato per ogni ciclo, attraverso una semplice sottrazione tra celle.

4.1.3 Calcolo delle pendenze

Ultima informazione ricavata attraverso l'elaborazione GIS delle piste è stata la pendenza. Dopo aver caricato l'immagine del DTM abbiamo utilizzato il plugin "rode slope calculator" per calcolare questo parametro, indicando la lunghezza dei segmenti di pista su cui eseguire i calcoli. Nel nostro caso abbiamo impostato un intervallo di 50 m.

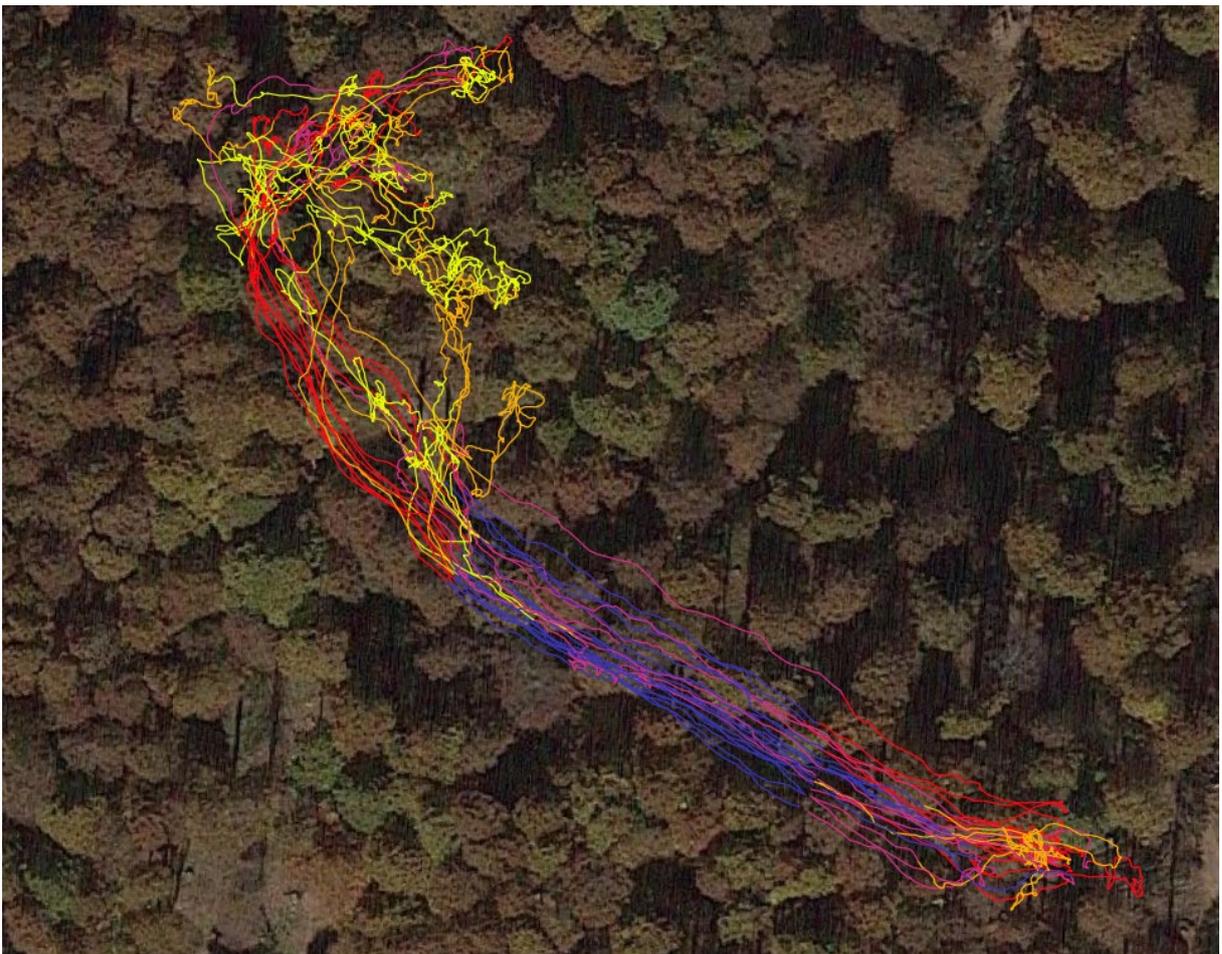


Figura 4.3: linee delle piste del 18/05/2023 prodotte con "rode slope calculator". I diversi colori indicano le diverse pendenze.

Nell'immagine sopra (Figura 4.3) sono raffigurate le linee dei cicli di lavoro realizzate con il suddetto strumento di processing. In questo caso i colori rappresentano le diverse pendenze medie calcolate per segmenti di 50m. E' stata utilizzata una scala di colori particolarmente accesi perché meglio distinguibile sui colori del bosco. In questo caso la scala di colori è:

- 0 - 3,8 % giallo;
- 3,8 – 8,9 % arancione;
- 8,9 – 15,5 % rosso;
- 15,5 – 25,3 % viola;
- 25,3 – 44,5 % blu.

Cycle_num	Min	Max	Mean	Median
3	1,371	22,941	10,633	6,117
4	0	28,147	13,358	8,949
5	1,125	27,956	13,543	9,661
6	1,125	28,147	10,334	5,672
7	0,025	28,387	16,899	21,675
8	3,777	28,147	13,820	11,812
9	0	28,147	13,445	13,523
10	0	35,458	15,565	12,922
11	0	35,707	12,561	7,934
14	0	44,537	15,929	14,094
15	5,056	27,708	15,099	14,059

Tabella 4.2: informazioni sulla pendenza (%) dei cicli di lavoro del 18/05/2023.

La tabella degli attributi delle linee così create (Tabella 4.2) riporta diverse informazioni relative alla pendenza: pendenza minima e massima, media e la mediana. Per la successiva analisi descrittiva nell'elaborazione dei modelli lineari è sempre stata considerata la pendenza media per ciclo. Anche questa informazione è stata aggiunta nei relativi fogli di calcolo insieme ai tempi e alla lunghezza di cui sopra.

4.1.4 Statistica descrittiva

Ottenuti i dati relativi alle tempistiche di esbosco, alle distanze percorse e alle pendenze su cui ha lavorato la macchina nei tre diversi cantieri è stato possibile realizzare alcuni grafici per confrontare le tre situazioni lavorative.

Primo fattore confrontato è stata la distanza media di esbosco.

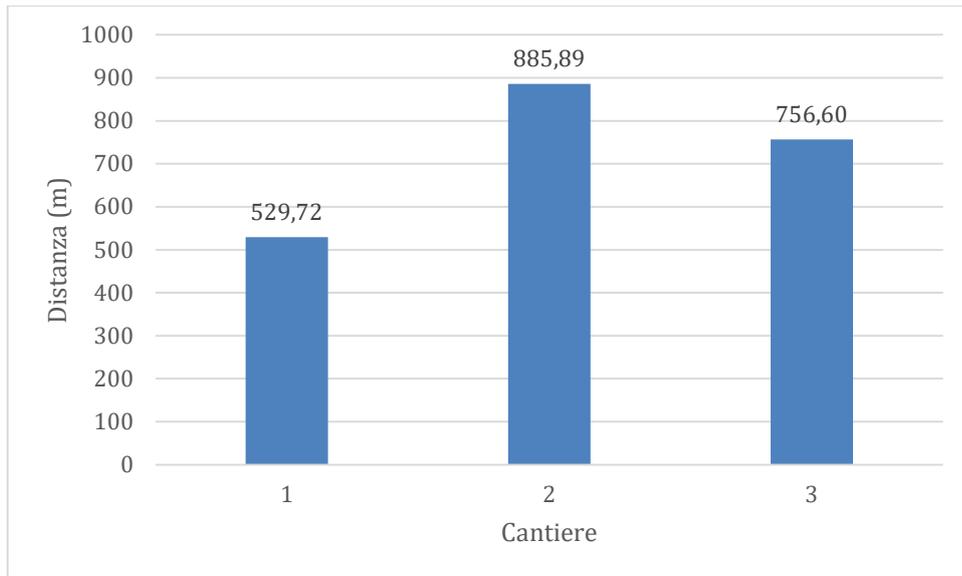


Figura 4.4: confronto tra la lunghezza media dei cicli di esbosco dei tre cantieri.

Come è osservabile dal grafico (Figura 4.4) il cantiere in cui si è lavorato alla distanza inferiore rispetto al piazzale di imposto è il primo, il quale è anche quello in cui si sono svolti il minor numero di cicli di esbosco (Tabella 3.1).

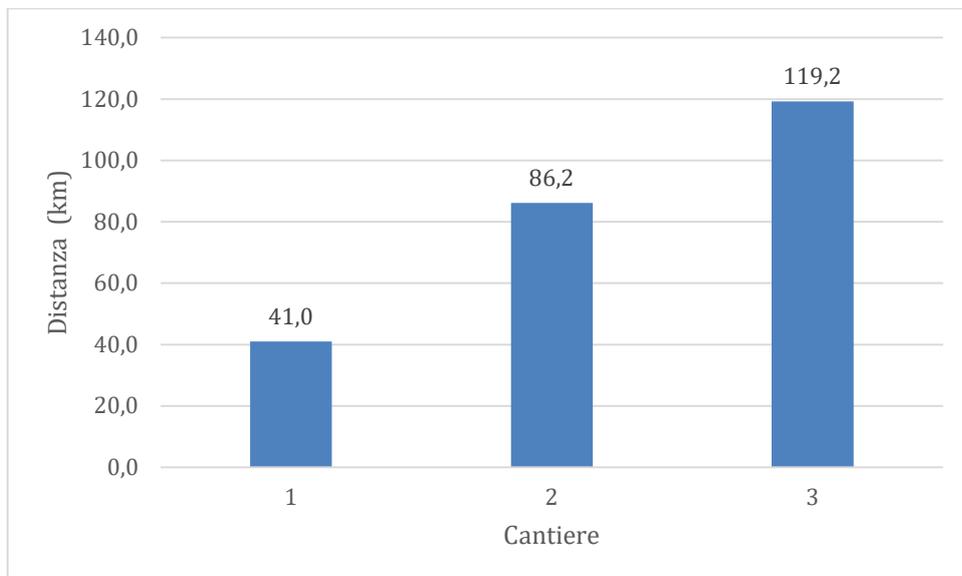


Figura 4.5: distanza totale percorsa nei tre cantieri.

Il cantiere in cui si è percorsa la distanza maggiore è invece il terzo (Figura 4.5) ciò è dovuto ad un numero di cicli molto superiore rispetto agli altri (Tabella 3.1).

Secondo parametro di confronto è stata la pendenza media.

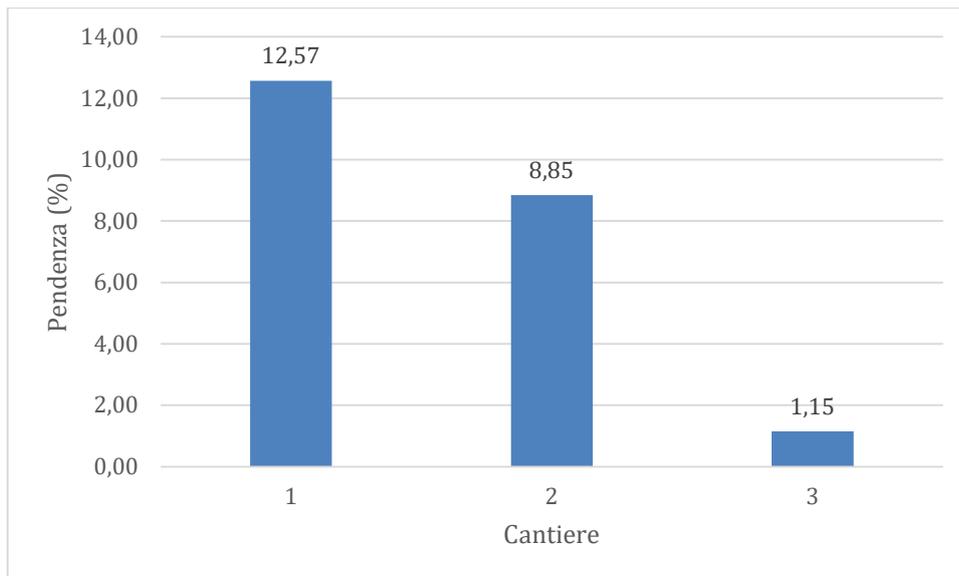


Figura 4.6: confronto tra le pendenze medie dei tre cantieri.

Come si può vedere nel grafico (Figura 4.6) non si è mai lavorato su pendenze particolarmente elevate. Il cantiere più ripido considerato è stato il primo, mentre il terzo si può considerare pianeggiante, ed è il motivo per cui è stato preso in esame.

Ultimo parametro di confronto è il tempo medio di ogni ciclo.

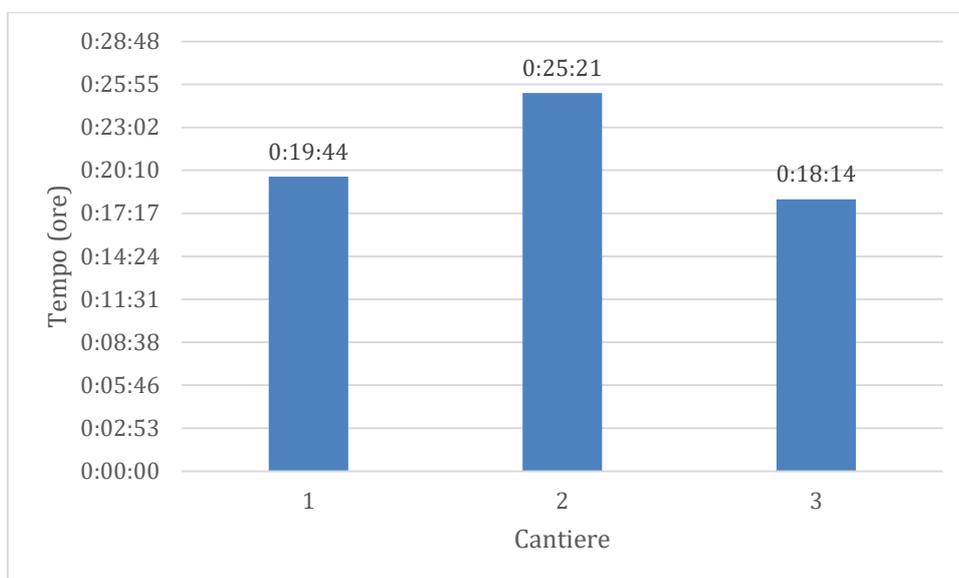


Figura 4.7: confronto tra i tempi medi dei cicli di esbosco dei tre cantieri.

Come si evince dal grafico (Figura 4.7) i cicli di esbosco più lunghi in termini di tempo sono stati quelli del secondo cantiere, i quali erano anche quelli più lunghi in termini di distanza. È invece da notare come quelli del primo cantiere, nonostante abbiano una lunghezza di oltre 200 m inferiore rispetto al terzo, siano risultati più lunghi nelle tempistiche. Questo è molto probabile sia causato dalla pendenza molto maggiore.

È importante considerare però che questi sono dati medi misurabili. Esistono tutta una serie di variabili legate soprattutto alle condizioni del suolo che sono difficilmente rilevabili, quali: umidità, portanza, presenza di ostacoli (es. rocce affioranti) ecc. In fase di modellazione si è provato a considerare come “fattore cantiere”.

Per introdurre anche il parametro più importante, che verrà considerato nel capitolo successivo, si presentano anche i dati relativi al consumo medio di carburante per ciclo di lavoro.

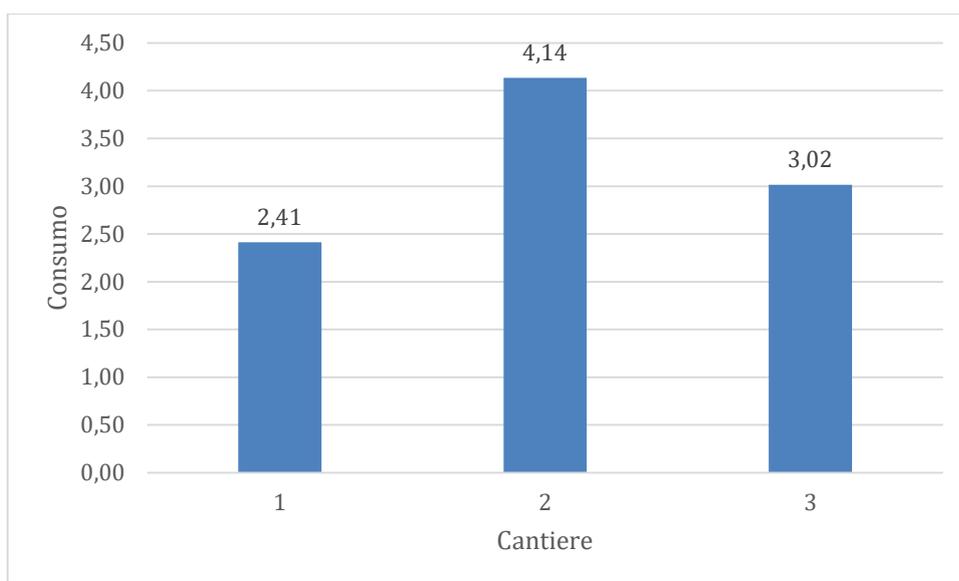


Figura 4.8: confronto tra il consumo medio di carburante per ciclo nei tre cantieri.

Osservando il grafico (Figura 4.8) si nota che questo è molto simile come caratteristiche a quello della lunghezza media per ciclo (Figura 4.4), infatti il cantiere con i consumi maggiori è anche quello con una lunghezza maggiore per ciclo. Questo fa capire che c'è un legame tra i due fattori, tuttavia il confronto tra le variabili influenti verrà affrontato di seguito.

4.2 Valutazione dell'eco-efficienza dei cantieri

4.2.1 Determinazione delle variabili influenti

Prima di passare alla realizzazione dei modelli predittivi di lavoro GLM si è cercato di individuare quali fossero le variabili più influenti sui parametri “tempo” e “consumo”. Utilizzando i grafici presentati nel capitolo precedente è stato fatto quindi un confronto con le variabili “lunghezza” e “pendenza”.

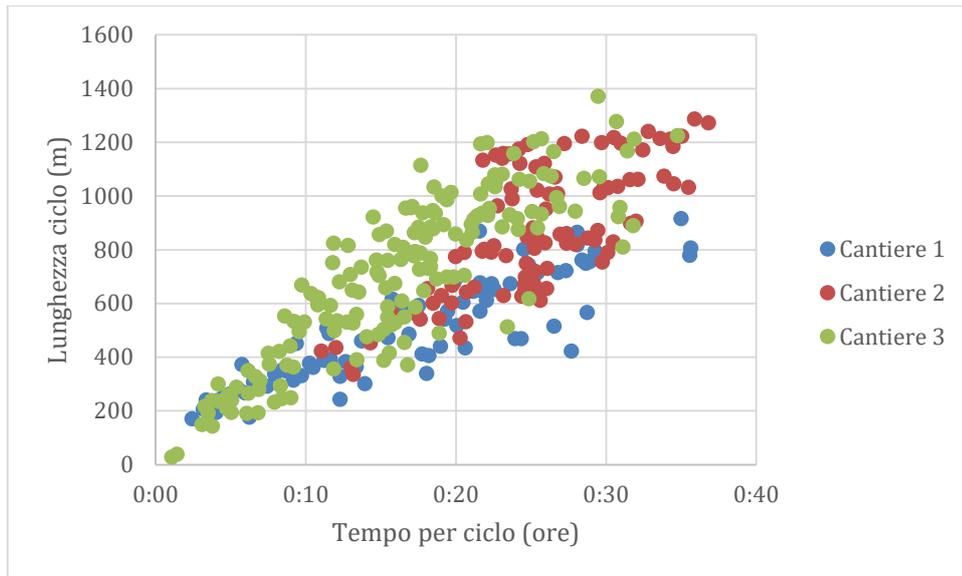


Figura 4.9: relazione tra lunghezza dei cicli di esbosco in termini metrici e temporali.

Come accennato in precedenza, in questo grafico (Figura 4.9) è chiaro come la distanza di esbosco influisca sulle tempistiche, ma non sia tuttavia l'unico fattore influente, si nota infatti una buona variabilità di lunghezze a parità del tempo impiegato.

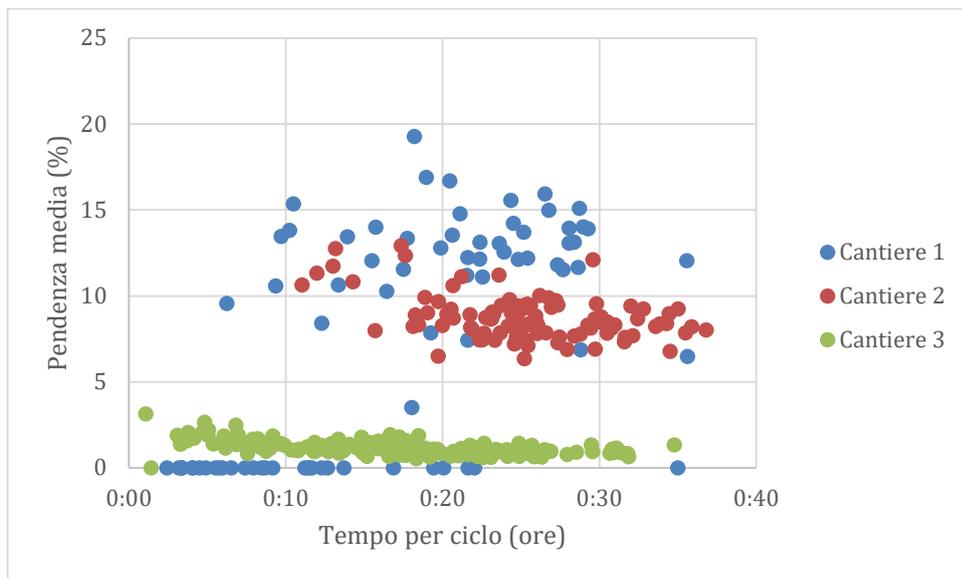


Figura 4.10: relazione tra pendenza media e tempi medi dei cicli di esbosco.

Facendo un confronto con la pendenza media (Figura 4.10) non sembrerebbe esserci un collegamento particolarmente importante, tuttavia l'argomento va approfondito nella modellazione successiva.

Si può quindi dedurre che entrambe le variabili influenzano il fattore "tempo", tuttavia se prese singolarmente il loro peso non è chiaro.

Lo stesso lavoro è stato poi ripetuto per il fattore "consumo".

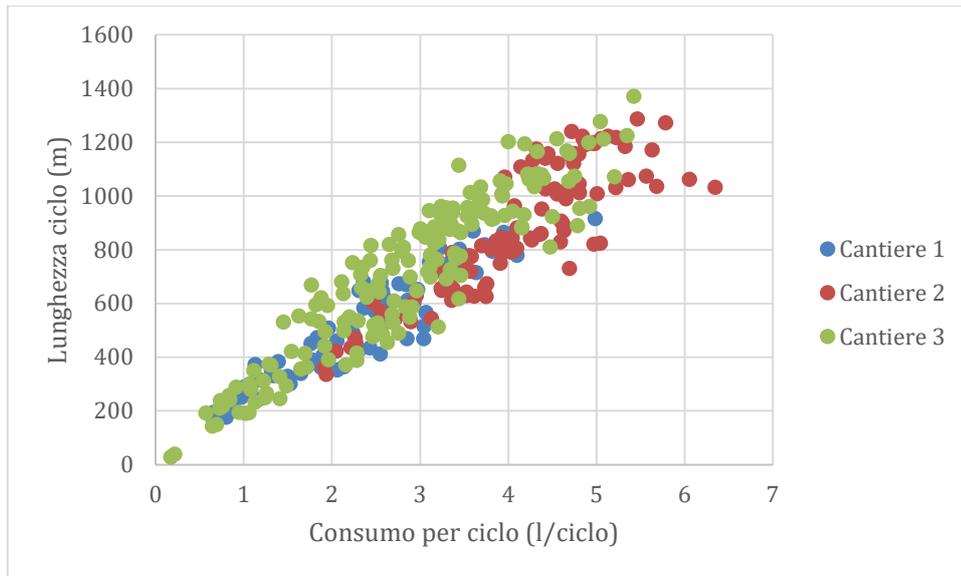


Figura 4.11: relazione tra la lunghezza media dei cicli e il consumo medio per ciclo nei tre cantieri.

In questo caso (Figura 4.11), sebbene i grafici siano simili, è molto più evidente la relazione tra lunghezza media per ciclo e il consumo medio, rispetto a quella con il fattore tempo (Figura 4.9).

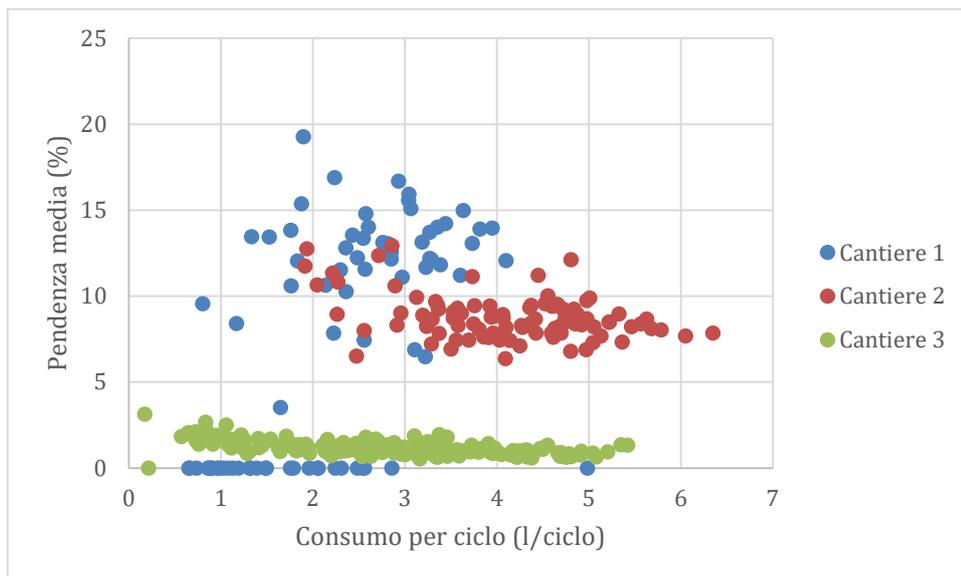


Figura 4.12: relazione tra la pendenza media dei cicli e il consumo medio per ciclo nei tre cantieri.

Nel presente grafico (Figura 4.12) non sembra esserci una relazione importante tra le due variabili considerate e non sembra esserci giustificazione neanche se confrontato con il grafico precedente (Figura 4.11). Possiamo quindi supporre che fino a pendenze medie del 12% circa, questa variabile non influisca notevolmente sui consumi, o comunque molto meno della distanza di esbosco. Tali supposizioni verranno comunque dimostrate meglio nella modellazione GLM.

4.2.2 Modellazione GLM

Come descritto in precedenza l'analisi predittiva con R ha prodotto quattro modelli GLM:

- TEMPO su PENDENZA, LUNGHEZZA e Fattore CANTIERE;
- CONSUMO su PENDENZA, LUNGHEZZA e Fattore CANTIERE;
- TEMPO su PENDENZA e LUNGHEZZA;
- CONSUMO su PENDENZA e LUNGHEZZA.

L'esito è stato che in tutti i modelli le variabili considerate hanno dato un risultato di P-value inferiore allo 0.05, pertanto si può affermare che queste abbiano una relazione diretta con i parametri considerati. Ad avere il valore P-value più alto è stato il "fattore cantiere" il quale infatti confondeva i modelli nei test successivi. Questo è causato dalle diverse variabili indipendenti presenti in tale fattore. Per poter valutare efficacemente tali variabili sarebbe quindi necessario un database di dati molto più ampio e molto più vario, cosa non disponibile per il nostro studio.

Detto ciò si è quindi scelto di scartare i primi due modelli elencati e considerare validi i successivi.

GLM – Tempo (Pendenza, Lunghezza)

La prima tabella ottenuta (Tabella 4.3) riassume i risultati dell'adattamento del modello statistico relativo al fattore "tempo".

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	17255.4	2	8627.68	482.87	0.0000
Residual	6110.65	342	17.8674		
Total (Corr.)	23366.0	344			

Tabella 4.3: analisi della varianza per il fattore tempo.

Poiché il valore P-Value è inferiore a 0,05 esiste una relazione significativa tra il "tempo" e le variabili considerate con un livello di confidenza del 95%.

La seconda tabella (Tabella 4.4) valutava singolarmente la significatività delle variabili "pendenza" e "lunghezza".

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
PENDENZA	2765.31	1	2765.31	154.77	0.0000
LUNGHEZZA	13743.9	1	13743.9	769.21	0.0000
Residual	6110.65	342	17.8674		
Total (corrected)	23366.0	344			

Tabella 4.4: significatività statistica delle variabili Pendenza e Lunghezza riferite al fattore Tempo.

Visti i risultati pari a 0,00 del P-Value è evidente che ci sia una relazione diretta con il fattore "tempo" con un'attendibilità superiore al 95%.

La statistica R-Squared indica che il modello adattato spiega il 73,9% della variabilità del fattore “tempo”. L’R-Squared corretto, che è più adatto per confrontare modelli con un numero diverso di variabili, è risultato 73,7%.

L’errore standard della stima è 4,22, mentre l’errore medio assoluto è 3,36.

Il modello ottenuto è quindi quello riportato nella tabella seguente (Tabella 4.5).

Parameter	Estimate	Standard Error	Lower Limit	Upper Limit	V.I.F.
CONSTANT	0.975684	0.635245	-0.273797	2.22517	
PENDENZA	0.612853	0.0492624	0.515957	0.709749	1.00316
LUNGHEZZA	0.021473	0.000774227	0.0199501	0.0229958	1.00316

Tabella 4.5: modello GLM - Tempo (Pendenza, Lunghezza)

È stato ottenuto un intervallo di confidenza del 95% pertanto il modello è considerato attendibile. Nella prima colonna della tabella sono riportate le costanti che andranno a comporre la formula (Equazione 1) della funzione descrittiva della curva del modello, attraverso la quale sarà possibile prevedere le tempistiche di esbosco, considerando valori noti di pendenza e distanza.

$$TEMPO = 0.975684 + 0.612853 * PENDENZA + 0.021473 * LUNGHEZZA$$

Equazione 4.1: funzione della curva TEMPO in relazione a Pendenza e Lunghezza.

GLM – Consumo (Pendenza, Lunghezza)

Si riportano le stesse due tabelle (Tabella 4.6 e 4.7) spiegate prima ma riferite al fattore “consumo”.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	499.353	2	249.677	1033.88	0.0000
Residual	82.5915	342	0.241496		
Total (Corr.)	581.945	344			

Tabella 4.6: analisi della varianza per il fattore Consumo.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
PENDENZA	17.963	1	17.963	74.38	0.0000
LUNGHEZZA	469.512	1	469.512	1944.18	0.0000
Residual	82.5915	342	0.241496		
Total (corrected)	581.945	344			

Tabella 4.7: significatività statistica delle variabili Pendenza e Lunghezza riferite al fattore Consumo.

Anche in questo caso il P-Value risulta sempre zero, pertanto si può affermare che ci sia relazione tra i fattori considerati nel modello.

In questo caso la statistica R-Squared indica che le variabili considerate giustificano l’85,8% della variabilità del fattore “consumo”. L’R-Squared corretto risulta 85,73%.

L’errore standard della stima è dello 0,49, mentre l’errore medio assoluto è 0,37.

Il modello sotto riportato (Tabella 4.8) è quindi risultato ancora più preciso del precedente.

Parameter	Estimate	Standard Error	Lower Limit	Upper Limit	V.I.F.
CONSTANT	0.0111759	0.0738525	-0.134087	0.156439	
PENDENZA	0.0493941	0.00572716	0.0381291	0.060659	1.00316
LUNGHEZZA	0.00396882	0.0000900104	0.00379177	0.00414586	1.00316

Tabella 4.8: modello GLM Consumo (Pendenza, Lunghezza).

Anche in questo caso l'attendibilità è superiore al 95%, pertanto il modello viene considerato valido.

Si riporta l'equazione della curva calcolata utilizzando le costanti della colonna 1.

$$CONSUMO = 0.0111759 + 0.0493941 * PENDENZA + 0.00396882 * LUNGHEZZA$$

Equazione 4.2: funzione della curva CONSUMO in relazione a Pendenza e Lunghezza.

4.2.3 Utilizzo dei modelli (simulazione di cantieri)

L'ultima fase elaborativa di questo studio è stata testare i modelli ottenuti attraverso la simulazione di cantieri con diverse pendenze e distanze di esbosco. Si è quindi creata una tabella con inserite queste variabili e sviluppato i grafici applicando le equazioni di cui sopra.

Lunghezza	Pendenza	GLM - Tempo	GLM - Consumo
m	%	valore GLM	valore GLM
50	20	2,1719046	0,21949572
100	20	3,2455546	0,41793672
150	20	4,3192046	0,61637772
200	20	5,3928546	0,81481872
250	20	6,4665046	1,01325972
300	20	7,5401546	1,21170072
350	20	8,6138046	1,41014172
400	20	9,6874546	1,60858272
450	20	10,7611046	1,80702372
500	20	11,8347546	2,00546472
550	20	12,9084046	2,20390572
600	20	13,9820546	2,40234672
650	20	15,0557046	2,60078772
700	20	16,1293546	2,79922872
750	20	17,2030046	2,99766972
800	20	18,2766546	3,19611072
850	20	19,3503046	3,39455172
900	20	20,4239546	3,59299272
950	20	21,4976046	3,79143372
1000	20	22,5712546	3,98987472

Tabella 4.9: tabella esemplificativa di simulazione con modelli GLM delle tempistiche e dei consumi per l'esbosco con diverse distanze e pendenze.

Nella tabella sopra (Tabella 4.9) si riporta un esempio delle simulazioni effettuate. In questo caso riferita ad una pendenza del 20%. Sono state eseguite le simulazioni anche con pendenze: 5%, 10%, 15% e 25%.

Ripetendo i calcoli per tutti i valori di pendenza riportati è stato possibile creare dei grafici che mostrano l'evoluzione dei due parametri considerati in funzione delle variabili.

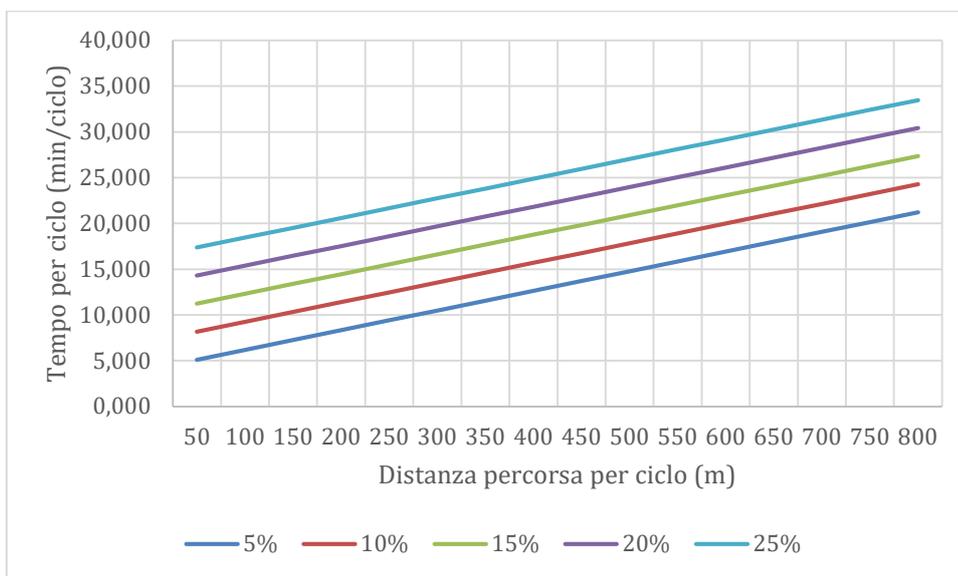


Figura 4.13: andamento delle tempistiche di esbosco in diverse situazioni di Pendenza e Lunghezza dei cicli.

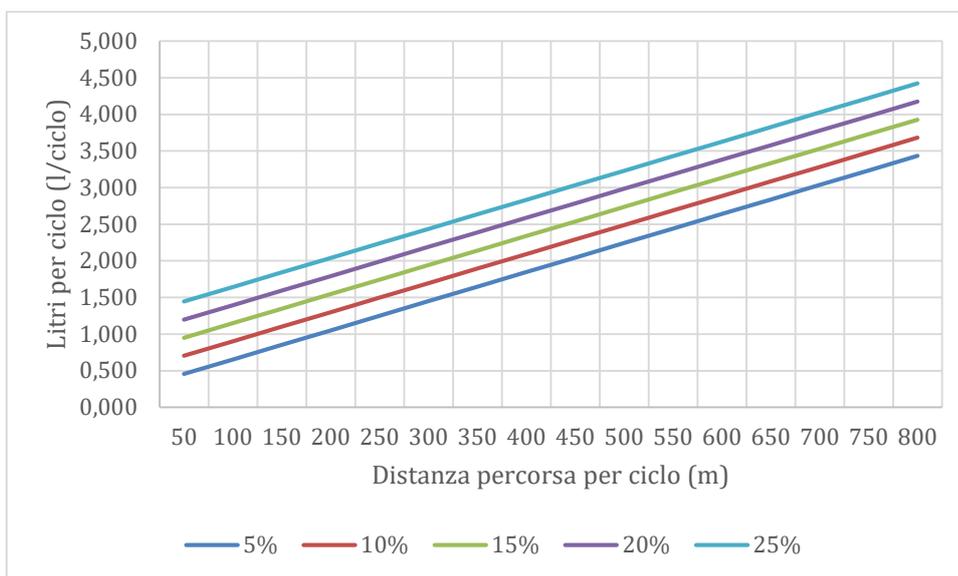


Figura 4.14: andamento dei consumi in diverse situazioni di Pendenza e Lunghezza dei cicli.

Da questi grafici (Figura 4.13 e 4.14) è apprezzabile come i due parametri considerati aumentino in relazione alle due variabili. In particolare si osserva che a parità di distanza la differenza dall'aver una pendenza del 5% piuttosto che del 25% causa un aumento dei tempi di circa 12 minuti e un aumento di consumi di circa 1 l per ciclo di lavoro.

Conoscendo quindi la lunghezza delle piste e le pendenze di un cantiere, attraverso l'uso di questi modelli è possibile stimare tempi e consumi necessari per l'esbosco.

Esempio di utilizzo dei modelli

Ipotizzando un cantiere forestale in cui la lunghezza delle piste varia da 400 a 750 m su una pendenza del 20%, i tempi e i consumi per ciclo calcolati usando i modelli GLM sono i seguenti (Tabella 4.10 e Figura 4.15).

Distanza	Tempo	Consumo
m	min./ciclo	l/ciclo
400	12,629	2,093
450	13,703	2,291
500	14,776	2,490
550	15,850	2,688
600	16,924	2,886
650	17,997	3,085
700	19,071	3,283
750	20,145	3,482

Tabella 4.10: esempio di utilizzo dei modelli.

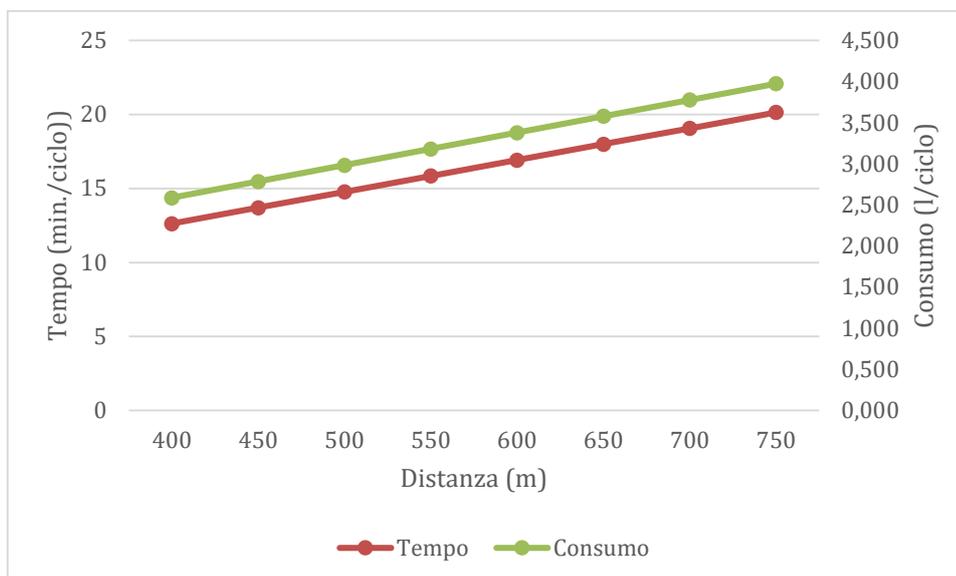


Figura 4.15: esempio di utilizzo dei modelli.

Se secondo i nostri calcoli per esboscare l'intera particella faremo 15 cicli di lavoro di cui:

- 2 a 400m;
- 1 a 450m;
- 4 a 550m;

- 3 a 600m;
- 2 a 650m;
- 2 a 700m;
- 1 a 750m.

Possiamo eseguire la seguente stima.

Distanza	Cicli	Tempo	T. totale	Consumo	C. totale
	n.	min./ciclo	min.	l/ciclo	l
400	2	21,82	43,64	2,586586	5,173172
450	1	22,90	22,90	2,785027	2,785027
500	0	23,97	0,00	2,983468	0
550	4	25,04	100,17	3,181909	12,72764
600	3	26,12	78,35	3,38035	10,14105
650	2	27,19	54,38	3,578791	7,157582
700	2	28,26	56,53	3,777232	7,554464
750	1	29,34	29,34	3,975673	3,975673
Totale	15		07:21:01		49,5146

Tabella 4.11: esempio di stima attraverso l'uso dei modelli.

Poste queste condizioni per concludere il nostro cantiere impiegheremo ancora circa 7:20 ore e consumeremo circa 50 l di carburante (Tabella 4.11).

Considerando quindi un prezzo del gasolio agricolo di circa 1,20€/l, un costo all'ora per l'utilizzo dello skidder di circa 50€ più il compenso all'operatore specializzato di 18€/ora (Gatto, 2023).

Per concludere la nostra particella dovremo investire, nel solo utilizzo dello skidder, ancora 558€.

5. Conclusioni

Nel presente studio si è testato un moderno metodo di analisi sulla produttività di un cantiere forestale altamente meccanizzato rispetto agli standard di molte imprese del Nord-Est d'Italia. Questo era attrezzato con uno skidder Equus 175 UN, un macchinario dotato di un ottimo rapporto tra la massa e la potenza che gli conferisce una buona capacità di movimento anche in ambienti montani con spazi ridotti e terreni sconnessi.

Il primo obiettivo è stata la verifica dei dati rilevati dal CAN-bus del mezzo. Il confronto con rilievi manuali effettuati con tradizionale sistema *stop-watch* e attraverso la verifica in cantiere della localizzazione della macchina è stato possibile constatare la corrispondenza delle informazioni.

L'elaborazione GIS dei dati sulla posizione continua della macchina ci ha permesso l'elaborazione di altre importanti informazioni quali la distanza percorsa, il tempo impiegato e la pendenza media di ogni ciclo. Acquisiti tali dati è stato possibile riassumere graficamente le caratteristiche dei tre cantieri e confrontarli tra loro.

Il confronto tra il rilievo manuale e i dati macchina relativi a tempi e consumi ci ha inoltre permesso di discriminare le varie operazioni di lavoro dello skidder sulla base del consumo istantaneo rilevato, visto che nel CAN-bus erano indicati solo movimento, carico-scarico e fermo macchina.

Il metodo di rilievo attraverso un CAN-bus data logger viene quindi considerato attendibile. Ciò può essere di grande aiuto per effettuare osservazioni di lungo periodo, ottenendo così una maggior variabilità di dati e una conseguente maggior precisione dell'analisi predittiva con modelli lineari di lavoro.

Il secondo obiettivo era determinare l'influenza della variazione di pendenza e distanza di esbosco sui tempi e sui consumi, e creare dei modelli lineari predittivi GLM.

Dalle analisi effettuate si è dimostrato che la variabile maggiormente influente è la lunghezza delle piste, tuttavia anche la pendenza ha un'influenza importante su entrambi i fattori considerati. Nella progettazione delle piste sarà quindi fondamentale considerare quale sia il miglior compromesso tra le due variabili da utilizzare per ottimizzare le operazioni di lavoro.

La modellazione GLM ha prodotto due equazioni descrittive le curve delle funzioni tempo e consumo in relazione con le suddette variabili. Ciò permette, conoscendo distanze di esbosco e pendenze di un cantiere, di prevedere le tempistiche e i consumi per l'esecuzione dei lavori.

Questi modelli hanno dimostrato una buona attendibilità e il metodo utilizzato può essere replicato ed utilizzato su altri macchinari altamente tecnologici. Per renderli più precisi sarebbe necessario un database maggiore di dati e con una maggiore variabilità in quanto esistono tutta una

serie di fattori specifici di ogni cantiere (morfologia del suolo, portanza del terreno ecc.) che in questo modo non sono stati considerati.

La disponibilità di modelli simili per i vari mezzi disponibili per le utilizzazioni può diventare un importante strumento per le imprese forestali, che con questi potrebbero velocemente stimare la convenienza o meno ad eseguire determinati lavori o la scelta del più conveniente metodo di esbosco da applicare in determinate situazioni.

L'utilizzo di modelli predittivi è fondamentale anche per i gestori forestali, i quali all'atto di definizione delle prescrizioni da applicare alle particelle, oggi giorno devono considerare la possibilità di realizzare le utilizzazioni con alti livelli di meccanizzazione, pena la rinuncia da parte delle imprese all'acquisto dei lotti.

Questo genere di studio inoltre risulta essere utile per il confronto in termini di eco-efficienza tra diversi modelli di mezzi forestali o diversi metodi di lavoro.

Bibliografia

- Bacescu, N.M.; Cadei, A.; Moskalik, T.; Wi, M.; Talbot, B.; Grigolato, S. Efficiency Assessment of Fully Mechanized Harvesting System through the Use of Fleet Management System. *Sustainable* 2022, 14, 1-17, doi:10.3390/su142416751.
- Bernetti, G. (1995). *Selvicoltura speciale*. Torino: U.T.E.T.
- Cadei, A.; Marchi, L.; Mologni, O.; Cavalli, R.; Grigolato, S. Evaluation of Wood Chipping Efficiency through Long-Term Monitoring. In Proceedings of the The 1st International Electronic Conference on Forests—Forests for a Better Future: Sustainability, Innovation, Interdisciplinarity; MDPI: Basel Switzerland, November 13 2021; Vol. 17, p. 17.
- Cadei, A.; Mologni, O.; Roser D.; Cavalli R.; Grigolato S. Energy Efficiency, Fuel Consumption, and Productivity of Cable Yarding Operations Using Hybrid Tower Yarder and Electrical Carriage in the North-Eastern Italian Alps 2021, 148–149.
- . Cadei, A.; Mologni, O.; Röser, D.; Cavalli, R.; Grigolato, S. Forwarder Productivity in Salvage Logging Operations in Difficult Terrain. *Forests* 2020, 11, 341, doi:10.3390/f11030341.
- Cavalli, R., & Pradel, N. (s.d.). Appunti del corso di "Utilizzazioni forestali".
- Corain, L. (2019). Appunti del corso di "Statistica applicata". Legnaro (PD).
- Del Favero, R. (2004). *I BOSCHI DELLE REGIONI ALPINE ITALIANE. Tipologia, funzionamento e selvicoltura*. Padova: Coop. Libreria Editrice Università di Padova.
- Egidi, L. (2022). *Modelli Lineari Generalizzati (GLM)*. Tratto da moodle2.units.it: https://moodle2.units.it/pluginfile.php/405454/mod_resource/content/5/lucidi_2021.22_A.pdf
- Gatto, P. (2023). Appunti del corso di "Analisi e valutazione dei beni e servizi forestali". Legnaro (PD).
- Gras, M. (1991). *Robinia pseudoacacia. Annotazioni da una rassegna bibliografica*. Roma: SAF, RESS S.p.a.
- Grigolato, S. (2022). Appunti del corso di "Accessibilità alla foresta e logistica". Legnaro (PD).
- Hippoliti, G. (1997). *Appunti di meccanizzazione forestale*. Firenze: Studio Editoriale Fiorentino.
- I.P.L.A. (2000). *La robinia. Indirizzi per la gestione e la valorizzazione*. Peveragno (CN), Regione Piemonte: Blu Edizioni.
- Koskela. (2015). Measuring eco-efficiency in the Finnish forest industry using public data. *Journal of Cleaner Production* 98, 316-317.
- Marra, E., Mastrolonardo, G., Laschi, A., & Neri, F. (2022). *Buone prassi per la riduzione degli impatti durante le operazioni di esbosco*. Firenze: Compagnia delle Foreste.
- Mondino, G., & Scotta, M. (1987). Robinia pseudoacacia L. nell'ambiente forestale piemontese. *Informatore Botanico Italiano*(19), p. 43-49.

- Piussi, P., & Alberti, G. (2015). *SELVICOLTURA GENERALE Boschi, società e tecniche colturali*. Arezzo: Compagnia delle foreste S.r.l.
- Rob, P. (1997). *Beach forests*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Sanesi, G., & Cecchini, G. (1999). I suoli delle faggete: caratteristiche ed aspetti funzionali. In *Ecologia strutturale e funzionale di faggete italiane* (p. 71-79). Bologna: Edagricole.
- Spinelli, R., Magagnotti, N., Visser, R., & O'Neal, B. (2021). A survey of the skidder fleet of Central, Eastern and Southern Europe. *European Journal of Forest Research*, p. 901-911.
- Vettore, P. (s.d.). Appunti del corso di geomatica.

Sitografia

- Brochure Equus 11_2017*. (2017). Tratto da www.equuseu.com:
<https://www.equuseu.com/files/pdf/brochure-equus-11-2017-eng.pdf>
- Egidi, L. (2022). *Modelli Lineari Generalizzati (GLM)*. Tratto da moodle2.units.it:
https://moodle2.units.it/pluginfile.php/405454/mod_resource/content/5/lucidi_2021.22_A.pdf
- (s.d.). Tratto da www.veicolux.it: <https://www.veicolux.it/definizioni/can-bus-cose-e-come-funziona/>
- (s.d.). Tratto da r-project.org: <https://www.r-project.org/about.html>
- (s.d.). Tratto da softonic.com: <https://microsoft-excel.it.softonic.com/>
- (s.d.). Tratto da qgis.org: <https://qgis.org/en/site/about/index.html>
- (s.d.). Tratto da csselectronics.com: <https://www.csselectronics.com/products/can-bus-data-logger-wifi-canedge2>
- (s.d.). Tratto da equuseu.com: <https://www.equuseu.com/>
- (s.d.). Tratto da tigercat.com: <https://www.tigercat.com/products/skidders/>
- (s.d.). Tratto da deere.com: <https://www.deere.com/en/skidders/>
- (s.d.). Tratto da hsm-forest.net: <https://www.hsm-forest.net/hsm-805-s-en.html>
- (s.d.). Tratto da hittner.hr: <https://hittner.hr/hittner-tractors>
- (s.d.). Tratto da irum.ro: <https://www.irum.ro/en/vehicle-listings/skidder-690-s5/>
- (s.d.). Tratto da ritter-maschinen.com: <https://www.ritter-maschinen.com/forsttechnik/skidder/>

Allegati

Allegato 1: caratteristiche tecniche dello skidder Equus 175 UN (Brochure Equus 11_2017, 2017)

Altezza*	2830 – 3222 mm
Altezza utile trattore**	540 – 715 mm
Larghezza trattore	2410 - 2850 mm
Lunghezza trattore	6200 – 7851 mm
Interasse	3211 mm
Distanza ruote	1910 mm
Angolo divisione telaio	43°
Angolo di oscillazione reciproca dei telai del trattore	15°
Peso operativo del trattore	9260 – 13340 kg
Massa massima consentita sull'asse anteriore	5750 kg
Massa massima consentita sull'asse posteriore	9300 kg
Peso massimo del trattore	15000 kg
Velocità massima (operativa/su strada)	18 / 40 km / h
Trazione assi	4x4 / 4x2 + possibilità di chiusura di ciascun asse
Potenza del trattore / giri	129 / 2200 kW / min ⁻¹
Motore a combustione	Cummins
Tipo di motore a combustione	B4.5 (K323), FR95721
Momento meccanico / giri	780 / 1500 Nm / min ⁻¹
Giri massimi	2200±50 min ⁻¹
Specifiche del motore a combustione	4-tempi, turbo, ad accensione per compressione, di serie, raffreddato ad acqua, 4-cilindri
Cilindrata	4,458 l
Alesaggio cilindro / corsa del pistone	107 / 124 mm
Rapporto di compressione	17,3 ± 0,5

Sistema aria	filtraggio a 2 livelli dell'aria aspirata, turbo, intercooler aria
Iniezione carburante	ad alta pressione – sistema CommonRail
Circuito carburante	filtraggio a 2 livelli del carburante + separatore acqua, pompa a mano, pompa per impianto CommonRail
Direzione di rotazione (guardando dal volano)	a sinistra (in senso antiorario)
Peso del motore a secco	404 kg
Lubrificazione motore	circolare, a pressione, con pompa olio azionata da albero a gomiti, con filtro olio
Olio motore – requisiti	Standard CK-4 (CES20086) e CJ-4 (CES20081)
Volume contenuto olio	14,33 l
Carburante per motore a combustione – requisiti	gasolio motore a basso contenuto di zolfo – ULSD, con bio-componente 7%, requisiti secondo Cummins 3379001
Volume serbatoio carburante	170 l
Circuito di raffreddamento	liquido di raffreddamento, a pressione, con circolazione forzata
Liquido di raffreddamento – requisiti	CEB00109, Cummins Service Bulletin 3666132
Capacità circuito di raffreddamento	25 l
Osservanza norme emissione gas di scarico	Stage V, n. certificato 2016/1628*2016/1628EV5/D
Impianto trattamento gas di scarico	DOC, DPF, SCR, ASC
Requisiti di liquido attivo per impianto SCR	AdBlue®/DEF (32% soluzione con acqua), ISO 22241
Volume del serbatoio per liquido AdBlue®:	43 l
Impianto elettrico trattore	24 V
Tipo di accumulatore	2x EXIDE EM1000 START AGM
Corrente di avvio 1 accumulatore	800 A
Capacità di 1 accumulatore	50 A
Trasmissione della potenza dal motore a combustione	idraulica, con circuito idrostatico di trazione, circuito per dispositivi operativi e circuito per freni e guida del trattore, con serbatoio comune dell'olio
Olio per circuito idraulico (requisiti)	DIN 51524/-3 HVLP, viscosità ISO VG 46
Volume di olio nel circuito idraulico	180 l
Idrogeneratore per la propulsione del trattore	SAUER DANFOSS H1P130
Idrogeneratore per trazione dispositivi operativi	DANFOSS 100,135,147
Idrogeneratore per circuito freni	SNP2NN/8
Idromotore per trazione trattore	MD 300
Trasmissione trazione del trattore	NAF, STT 07/0
Trazione asse anteriore	cardano DIN 150 /830
Trazione asse posteriore	cardano DIN 150 /1150
Asse (anteriore e posteriore)	NAF, STT 05/0
Pneumatici	vedi capitolo Pneumatici
Sistema frenante	comando idraulico, con freno operativo e con freno di stazionamento, con sistema di frenata

	automatica in caso di perdita di pressione nell'impianto
Guida e comandi	dalla cabina del trattore
Dispositivi ausiliari	
Aspo avvolgitore fune	EQUUS 2BN – potenza 2x 10-15 t, velocità avvolgimento max. 1,35 m/s, 2 funi 2x Ø14 lunghezza opzionale della fune fino a 160 m
Braccio idraulico girevole	EQUUS HR 120/75 o EQUUS HR 120/61,
Momento alzata 120 kNm	120 kNm
Benna	SZ0401 / SZ0402 / SZ0403 (a scelta)
Protezione posteriore con carrucole per funi	SZ1501 / SZ1502 / SZ1503 (a scelta)
Clambunk	SZ0501
Dotazione accessoria – comfort dell'addetto macchina	
Aria condizionata cabina	
Sedile ergonomico (a scelta tra i tipi)	Grammer MSG97AL/722 Actimo XXL
Grammer MSG85/721 Maximo M	
Grammer MSG95A/722 Actimo XL	
Grammer MSG95EL/722 Actimo Evolution	

* L'altezza totale del trattore dipende dalla dotazione installata e dal tipo di pneumatici utilizzati.

** L'altezza utile del trattore dipende dal tipo di pneumatici utilizzati.

Allegato 2: tabella di confronto tra i vari modelli di skidder sul mercato (equuseu.com, s.d.) (tigercat.com, s.d.) (deere.com, s.d.) (hsm-forest, s.d.) (hittner.hr, s.d.) (irum.ro, s.d.) (ritter-maschinen.com, s.d.)

Marca	Modello	Massa		Potenza	Serbatoio	Potenza max verricello
		t	kg	kW	l	kN
EQUUS	175N UN	9,26	9260	129	170,0	
	175 N UH	13,34	13340	129	170,0	
	175 N BL	8,5	8500	129		
TIGERCAT	612 skidder	18,75	18750	155	255,0	
	602 Skidder	15,56	15560	129	228,0	
	610E Skidder	17,01	17010	165	305,0	
	620H Skidder	19,595	19595	195	305,0	
JOHN DEERE	640L-II	16,686	16686	163	342,2	147,3-221 (high or low speed)
	648L-II	19,054	19054	163	391,8	147,3-221 (high or low speed)
	748L-II	19,713	19713	196	391,8	147,3-221 (high or low speed)
	768L-II	23,697	23697	210	352,0	142,3-213,5 (high or low speed)
	848L-II	22,384	22384	210	392,0	221
	948L-II	22,484	22484	224	392,0	221
HSM	805	12,6	12600	129	235,0	80
	805S	9,3	9300	104	160,0	100
	805HD	13,8	13800	129	235,0	100
	805HD ZL	14,6	14600	129	235,0	100
	805 6WD	14,1	14100	129	235,0	100
	904S	10,8	10800	175	185,0	100
	904 H	15,2	15200	185	210,0	100
	904 6WD	17,3	17300	185	210,0	100
	904 Z 6WD	17,3	17300	185	210,0	100
	954 ZL	14,7	14700	185	210,0	100
	954 6WD	22,8	22800	210	360,0	100
HITTNER	Skidder ecotrac 55 V	3,77	3770	43		35
	Skidder ecotrac 120 V	7,66	7660	86,5		80
	Skidder ecotrav 14 V	8,06	8060	104		100
IRUM	690 S5	9,3	9300	100	90,0	
	690 PE	7,5	7500	70		70
	2012	8,4	8400	82		85
	2012 G	9,45	9450	82		85
	2012 SB	8,4	8400	82		70
	20120 G 6-C	10,4	10400	112		
	2012 powershift 6C	9,85	9850	112	100,0	90
RITTER MASCHINEN	R 170-4			125	160,0	80
	R 185-4			142	210,0	80
	R 185 S-4			142	210,0	80

Allegato 3: sistema CAN-bus data logger (csselectronics.com, s.d.)



CANedge2: 2x CAN Bus Data Logger (SD + WiFi)

The plug & play 2xCAN/LIN logger records timestamped CAN data (Classical/CAN FD) to the extractable 8 GB industrial SD card.

The small device connects via WiFi access points (e.g. WLAN or 3G/4G routers) to securely push data to your server. Further, the device can be updated over-the-air.

Ideal for telematics, R&D field tests, diagnostics and predictive maintenance.

Software/APIs are free & open source - with no subscription fees or vendor lock-in.

Buy now - or learn more below!



CANmod.gps: GPS-to-CAN with 3D Inertial Sensor and UDR

This standalone GPS-to-CAN module produces GNSS position and 3D inertial data (via a gyroscope & accelerometer) and outputs it via configurable CAN bus frames.

The module supports 'Untethered Dead Reckoning' - meaning that even if the GNSS signal is lost entirely, the module can deliver continuous positioning through IMU-based estimates (no external inputs required).

You can integrate the module with *any* CAN bus, e.g. vehicle networks or CAN hardware. As an example, you can use it as a plug & play add-on module for the CANedge.

Incl. antenna. Optional adapters (dropdown).

New: [Check out the 6 min intro video.](#)

Buy now - or learn more below!