

TEMPESTA VAIA

individuazione delle
aree da valanga
con le immagini
Sentinel-2

Mauro Valt

ARPAV Veneto - Centro Valanghe di Arabba,
via Pradat 5- Arabba, 32020 Livinallongo
del Col di Lana (BL) - Italy

Rosamaria Salvatori

CNR, IIA - Institute of Atmospheric
Pollution Research, Via Salaria km 29,300
C.P. 10, 00016 Monterotondo (Roma), Italy

Roberto Salzano

CNR, IIA - Institute of Atmospheric
Pollution Research, Via Madonna del Piano 10,
50019 Sesto Fiorentino (FI) Italy

Gianni Marigo

ARPAV Veneto - Centro Valanghe di Arabba,
via Pradat 5- Arabba, 32020 Livinallongo
del Col di Lana (BL) - Italy

Identification of potential avalanche areas associated with the Vaia storm using Sentinel-2 data

*Between October the 27th and the 30th, Italy was interested
by a very deep Low Pressure system named "VAIA", which
caused extremely strong wind gusts, storm surges and heavy
rainfalls, especially on the Eastern Alps, where also more than
600 mm/96 hs total amount has been recorded [Trenti, 2019;
Veneto Region, 2018].*

*In addition to the rain, the extremely strong wind gusts caused
the destruction of several woods.*

*It was estimated that a forestry area of 1.366.000 hectares has
been involved, with the complete destruction of around 42.000
hectares, with a total estimated value of more than 8.500.000
cubic meters of felled timber [Chirici, 2019]. Particularly
serious look the wood's damages in 3 Municipalities of the
Belluno Province (Rocca Pietore, Livinallongo del Col di Lana
and Colle Santa Lucia), where the biggest part of the avalanche
defense wood has been destroyed.*

*In this paper, after a general introduction of the event, the
methodology for the quick identification of the destroyed
defense wood areas, carried out in the days following the event
by the satellite images, is described.*

L'Italia, fra il 27 e il 30 di ottobre 2018, è stata interessata da una profonda depressione atmosferica denominata "Vaia" che ha generato violentissime raffiche di vento, mareggiate e piogge alluvionali soprattutto sulle Alpi Orientali dove sono stati misurati anche più di 600 mm di precipitazione in 96 ore (Trenti, 2019; Regione del Veneto, 2018).

Oltre alle piogge, le fortissime raffiche di vento hanno determinato la distruzione di molti boschi.

Si stima che la copertura forestale interessata sia di 1.366.000 ettari con la completa distruzione di circa 42.000 ettari, per un totale stimato di più di 8.500.000 metri cubi di legname (Chirici, 2019). Di particolare gravità di danni al bosco prodotti in 3 comuni del bellunese (Rocca Pietore, Livinallongo del Col di Lana, Colle Santa Lucia) dove è andato distrutto gran parte bosco di protezione dalle valanghe.

Nel presente lavoro, dopo un inquadramento generale della problematica, viene descritta la metodologia di individuazione rapida del bosco di protezione distrutto effettuata nei giorni immediatamente seguenti l'evento utilizzando le immagini da satellite.



LA TEMPESTA "VAIA"

La depressione atmosferica "Vaia" si è sviluppata sabato 27 ottobre 2018, in un contesto meteorologico esteso dal Baltico al Mediterraneo occidentale. Il fenomeno ha avuto un carattere stazionario sui mari tra il Golfo del Leone, le Baleari e la Sardegna fino al mattino di lunedì 29 quando è avvenuta l'irruzione massiccia di aria dalla Valle del Rodano. L'evento perturbato che ha successivamente portato alla distruzione del bosco è iniziato, quindi, sabato 27 ottobre con correnti di libeccio (S- SW) e precipitazioni intense sulle Alpi e sull'Appennino settentrionale (Fig. 1). Il flusso meridionale ha determinato forti piogge da sbarramento e sollevamento orografico lungo tutta la fascia prealpina della Alpi

fino lungo la cresta di confine con l'Austria nelle Alpi orientali. Nelle Dolomiti, nelle 2 giornate sono state misurate precipitazioni di 168+284 mm a Soffranco, 65+271 mm a Agordo, 109+207 mm a Col dei Pra, 66+193 mm a Cencenighe, 60+209 mm a Feltre e quasi 300 mm a Sappada (UD) (www.arpa.veneto.it). Lungo la cresta di confine con l'Austria le precipitazioni sono state meno intense ma comunque significative come ad esempio a Vipiteno (BZ) (<https://webapp-afbs.prov.bz.it/>) con 159 mm in 2 giorni, ad Anterselva di Sopra (BZ) con 123 mm (<https://webapp-afbs.prov.bz.it/>). Queste precipitazioni hanno determinato un primo importante ingrossamento dei fiumi Serio, Sarca, Adige, Brenta e

Piave (Cat Berro et al., 2018).

Dopo una temporanea diminuzione dei fenomeni nella serata di domenica 20 e nella successiva notte, lunedì 29 ottobre si è sviluppato, a partire da W, un impetuoso rinforzo dello scirocco e lo sviluppo di violente celle temporalesche autorigeneranti tra la Sardegna, il Mar Tirreno e il Mar Ligure all'approfondirsi della depressione atmosferica "Vaia" poco a W della Corsica (Cat Berro et al., 2018).

Con l'irruzione di aria fredda la depressione ha subito un rapido approfondimento, classificabile quasi come "ciclogenesi esplosiva" (per la quale viene considerata una soglia di 24 hPa di diminuzione della pressione in 24 ore) (Cat Berro et al., 2018). La depressione, con un minimo di 995 hPa fra le Baleari e la Sardegna, si è spostata verso NE raggiungendo in poche ore 978 hPa a livello del mare (misurata alle ore 18:24 presso la stazione Collegio Carlo Alberto di Moncalieri, ridotta al livello del mare- www.nimbus.it), (Fig. 2) transitando in serata lungo la pianura Padana e attraversando le Alpi con un notevole rinforzo dei venti.

Diversamente dal solito, il così detto fronte freddo, in realtà formato da due successive e molto ravvicinate strutture frontali, è entrato da S sospinto da correnti portanti molto veloci e da un minimo profondo, caratterizzato da un elevato gradiente orizzontale di pressione e da un rapido movimento da S verso N (Merzari et al., 2018)

In poche ore ha valicato le Alpi con l'aria fredda che ha attraversato l'arco alpino in modo repentino andando a scalzare l'aria calda nelle vallate. Questo ha determinato che in molti valli si è passati, in pochissimi minuti, da una condizione di calma di vento a raffiche oltre i 100 km/h.

La presenza di una struttura anticiclonica sul Mediterraneo più orientale, ha inoltre prodotto una condizione di blocco che ha fatto rafforzare il flusso meridionale sulle Alpi orientali.

L'origine dei fenomeni che hanno carat-

Fig. 1 - Situazione sinottica alle ore 12 del 27 ottobre (altezza del geopotenziale a 500 hPa e pressione al suolo), da wetter3.de

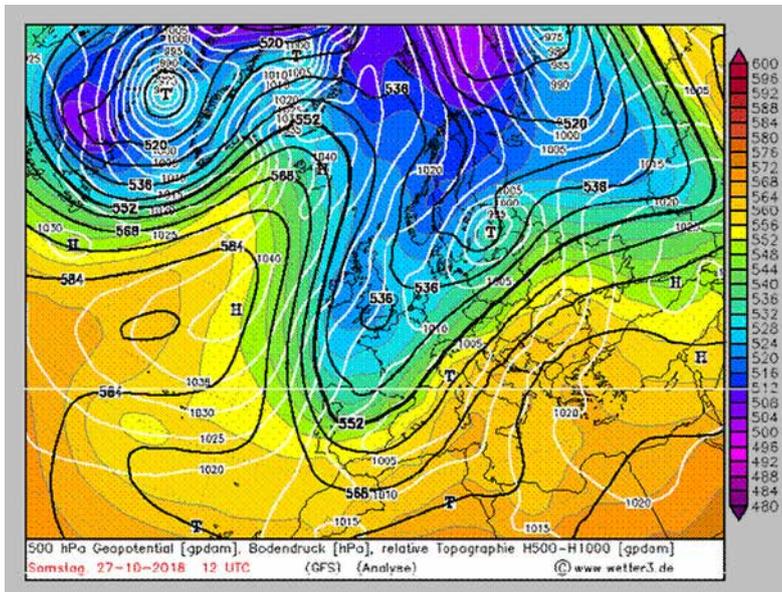
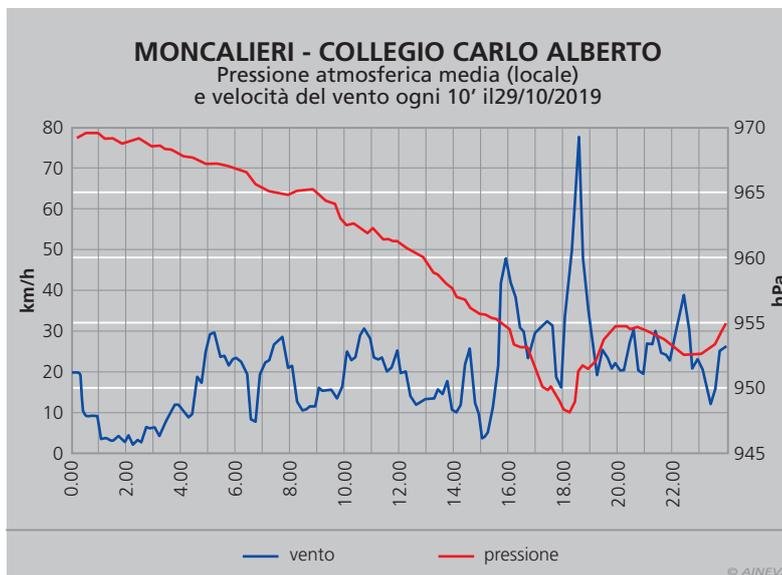


Fig. 2 - Andamento della pressione ridotta al livello del mare e del vento il giorno 29 ottobre presso l'Osservatorio Meteorologico SMI di Moncalieri, da www.nimbus.it



terizzato il passaggio della depressione e dell'associato fronte freddo è dovuta ad una serie concomitante di fattori a meso e micro scala:

- una ventilazione sinottica molto sostenuta (scirocco) legata alla posizione del minimo e al blocco altopressorio ad E: il forte gradiente di pressione e la posizione del jet-streak hanno convogliato verso le Alpi orientali un forte flusso di correnti meridionali a tutte le quote, già nelle giornate precedenti, con un'ulteriore accelerazione il giorno 29 per la stazionarietà dell'alta pressione e il rapido avanzamento della bassa pressione dal Mediterraneo occidentale.
- una componente così detta isallobarica, dovuta ai forti gradienti di pressione orizzontali in prossimità e al passaggio del profondo minimo di pressione al suolo, eccezionalmente profondo, e il suo rapido incedere da S-W verso N-E, ha determinato marcati gradienti orizzontali di pressione al suolo, con conseguente accelerazione del flusso richiamato verso il centro della depressione, definendosi il vento come lo spostamento di una massa d'aria da una zona di alta verso un centro di bassa pressione.
- una componente legata alla tipologia del fronte: il fronte freddo transitato è classificabile come un "ana-cold front", ovvero un fronte freddo caratterizzato da violento incunearsi dell'aria fredda post frontale nei bassi strati atmosferici, con fenomeni di compressione dall'alto verso il basso della stessa massa d'aria fredda post-frontale.
- una componente orografica dovuta alla geometria delle valli e al loro orientamento, che ha comportato un'accelerazione del flusso nelle valli più strette: una volta raggiunto il baluardo alpino, le forti correnti meridionali si sono incanalate nelle vallate interne, soprattutto quelle con prevalente orientamento S-N, subendo un'accelerazione per effetto dei restringimenti delle valli, per il così

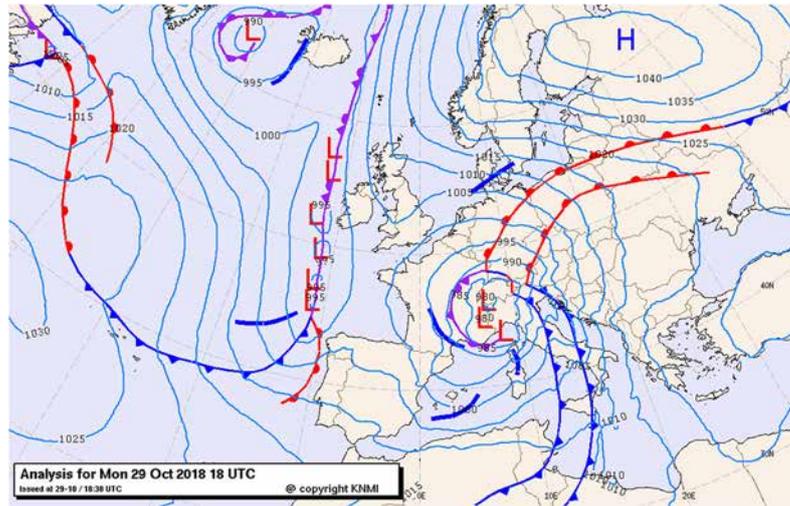


Fig. 3 - Pressione al livello del mare e fronti alle ore 18 UTC del 29 ottobre, da knmi.nl

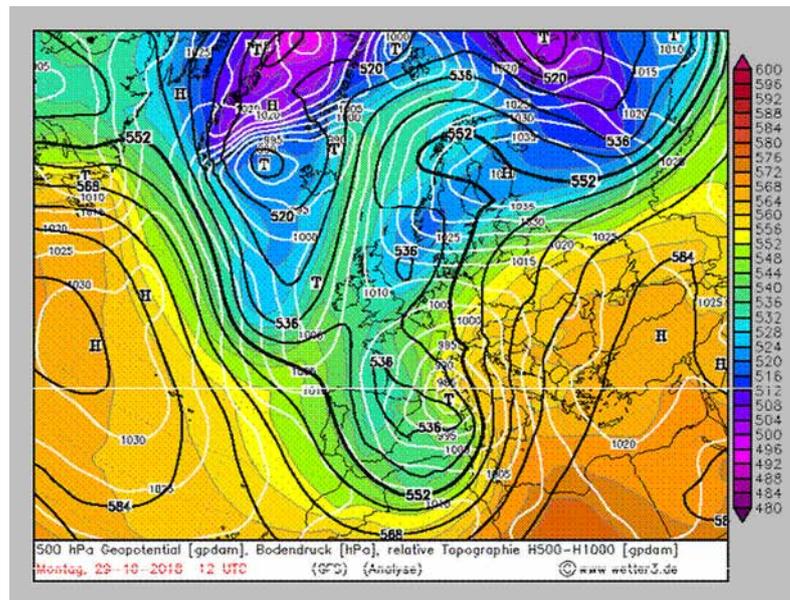


Fig. 4 - Situazione sinottica alle ore 12 del 29 ottobre (altezza del geopotenziale a 500 hPa e pressione al suolo), da wetter3.de

detto effetto Venturi, ovvero un'accelerazione del flusso alla diminuzione della sezione in cui esso è costretto a passare; tale fenomeno è risultato acuito dalla compressione dovuta al passaggio dell'ana-cold front, così come descritto al punto precedente, che ha costretto il flusso a transitare nei settori più prossimi ai fondovalle, dove appunto la sezione geometrica risulta minore.

- una componente di raffica in uscita dalle celle temporalesche che hanno caratterizzato il fronte freddo transitato: l'esteso fronte freddo, come sopra riportato formato in realtà da due conseguenti e ravvicinate strutture frontali, è stato caratterizzato da un serie continua di celle temporalesche particolarmente sviluppate; questo tipo di strutture sono caratterizzate

da forti venti in uscita anteriormente ad esse, i così detti out flow, cioè forti raffiche di venti catabatici (di caduta) nella parte anteriore delle celle temporalesche; il violento impatto della discesa di correnti fredde che scendono dal l'alto si definisce downburst e può causare venti particolarmente violenti, che in prossimità del fronte prendono il nome di Gust Front; queste raffiche subiscono in prossimità del suolo una violenta espansione, paragonabile ad un violento scoppio (burst), che può produrre un vortice rotante ad asse orizzontale (rotore) entro il quale si manifestano impulsi di vento molto ravvicinati tra loro, che generano forti turbolenze rispetto ai venti in entrata nelle celle (inflow) che si trovano davanti alle celle stesse e hanno direzione opposta. Le micro raf-

VALANGHE

fiche che si generano (Burst Swaths) sono fenomeni molto effimeri e di dimensioni ridotte (qualche centinaio di metri), ma intensi (raffiche a 220 - 250 km/h), assumendo una velocità paragonabile a quella osservabile in un tornado di categoria F2 o F3, ma rispetto al tornado i venti sono lineari e si fanno strada a forma di ventaglio. In conclusione, le raffiche più forti e distruttive si sono verificate ove si è verificata concomitanza dei vari fattori sopra descritti, non essendo sufficiente nessuno dei singoli fenomeni a determinare raffiche così violente su un territorio tanto esteso.

I forti venti, con raffiche superiori ai 140 km/h in molte località (Monte Cesen 192 km/h, Monte Verena 167 km/h, Passo Valles 149 km/h, Monte Avena 147 km/h, Passo Pordoi 147 km/h, etc.), sono stati concentrati soprattutto nel pomeriggio e nella serata-notte di lunedì 29 con sradicamento di parecchi alberi, tetti di case e abbattimento di intere foreste.

Le precipitazioni più intense, aggiunte a quelle di sabato e domenica, sono avvenute sia sull'Appennino settentrionale, ma soprattutto nel Bellunese e nella Carnia occidentale. Nelle Dolomiti in 96 ore sono stati misurati 715 mm di

pioggia a Soffranco, 565 mm ad Agordo, 548 mm a Cencenighe, 450 mm a Borca di Cadore con intensità, lunedì 29 ottobre, di 51.45mm/h a Gares, di 115 mm/3h e di 205mm/6h a Sant'Andrea di Gosaldo (BL).

La pioggia sulle Alpi ha prodotto, nella notte fra lunedì 29 e martedì 30 ottobre, una seconda ondata di piena di tutti fiumi delle Alpi. Le portate di piena sono state in molti casi maggiori di quelle delle alluvioni precedenti (1966 ad esempio) con erosioni di strade, crolli di ponti, frane e dissesti vari. Nel bellunese e nel trentino molte vallate sono rimaste isolate e senza energia elettrica per parecchi giorni.

La neve è ricomparsa nella notte fra sabato 27 e domenica 28 ottobre con apporti di 50-100 cm a 2900 m e di 25-30 cm a 2600 m. Il limite della neve è rimasto generalmente elevato, oltre il 2400 m di quota ma in alcune vallate è sceso temporaneamente fino a 1600-1900 m. Il secondo episodio, fra lunedì 29 e martedì 30 (Fig. 3, 4), ha determinato la comparsa della neve fino a 1700 m di quota. Gli apporti sono di ulteriori 20 cm a 2000 m e di 30-40 cm oltre i 2500 m di quota. La fusione del manto nevoso è stata comunque lenta e non così im-

portante come nell'alluvione del 1966.

LE FORESTE

I forti venti hanno determinato l'abbattimento di oltre 8,5 milioni di m³ di legname (Chirici et al., 2019) (Fig. 5). La regione maggiormente colpita è stata il Trentino Alto Adige con oltre 22 mila ettari di bosco danneggiato (rispettivamente 18.000 ha in provincia di Trento e 4.000 ha in provincia di Bolzano), il Veneto con 12.500 ettari, la Lombardia con circa 4.000 ha, il Friuli Venezia Giulia con 3.000 ha e in modo minore il Piemonte e la Valle d'Aosta.

Questi valori, espressi nel lavoro di Chirici et al. 2019, evidenziano ancor di più che la tempesta Vaia ha prodotto i maggiori danni nelle Alpi Orientali fra le Prealpi Venete e le Dolomiti di Trento, Belluno e Bolzano. Ad esempio, nella Provincia di Bolzano i maggiori danni sono stati rilevati nei comuni di Nova Levante con il 16,6 % della superficie forestale schiantata, di Anterivo con il 15,6%, Andino con il 11,7% (dati Provincia Autonoma di Bolzano, 2019) con percentuali maggiori nei Comuni di Colle Santa Lucia, Rocca Pietore e Livinallongo del Col di Lana in Provincia di Belluno. In generale il vento è il maggior fattore di

Fig. 5 - Comune di Colle Santa Lucia. Abitato di Rucavà con strada regionale n. fotografato da Laste. Il bosco di abeti danneggiato (foto del 14 novembre 2018).



disturbo degli alberi in Europa, con oltre il 50% dei danni a boschi e foreste e con circa 38 Milioni di metri cubi abbattuti ogni anno (Gardiner et al., 2013), seguito dagli incendi boschivi con circa il 16%. I danni prodotti dal vento sono in genere dovuti a condizioni meteorologiche, topografia del territorio, condizioni stagionali e tipologia di struttura del popolamento forestale (Schindler et al., 2012). Dal punto di vista della struttura del bosco (Motta et al., 2019) ci sono dei popolamenti più facilmente interessati da schianti rispetto ad altri per maggior altezza (Thomasius, 1981), per condizioni fitosanitarie e struttura verticale del popolamento (Mitchell e Ruae, 2016). Tuttavia, quando il vento è forte, i fattori strutturali di un bosco sono poco importanti in quanto le forze di resistenza dell'albero sono inferiori a quelle esercitate dalla massa d'aria (Motta et al., 2019; Favero e Carniel, 2019). Le velocità critiche del vento variano dai 94-100 km/h per i singoli alberi (Virost et al., 2016) per arrivare ai 150 km/h per boschi resistenti (Gardiner et al., 2013). In generale sulle Alpi la velocità critica è fra i 50 e i 90 km/h mentre, ad esempio, sugli Appennini è maggiore.

La tempesta VAIA ha interessato una grande varietà di categorie forestali (pinete, peccete montane, subalpine, miste, bosco misto con abete, peccio e faggio, etc.), tipi strutturali (foreste monostratigrafiche, pluristratigrafiche, pure, miste ed anche cedui) e di settori altitudinali (Motta et al., 2019; Favero e Carniel, 2019). Ad esempio, nell'Agordino (Provincia di Belluno), i forti venti che hanno risalito la valle, hanno creato danni a quote inferiori ai 500 m nel bosco misto di abete e faggio per arrivare al limite della vegetazione a 1900 m a Livinalongo del Col di Lana con danni a larici e abeti rossi.

I danni prodotti dalla tempesta VAIA sono riconducibili ad eventi distruttivi che comunque hanno una certa frequenza in Europa. In Italia si ricordano gli eventi avvenuti durante l'alluvione del 4 novembre 1966 con 700.000 m³

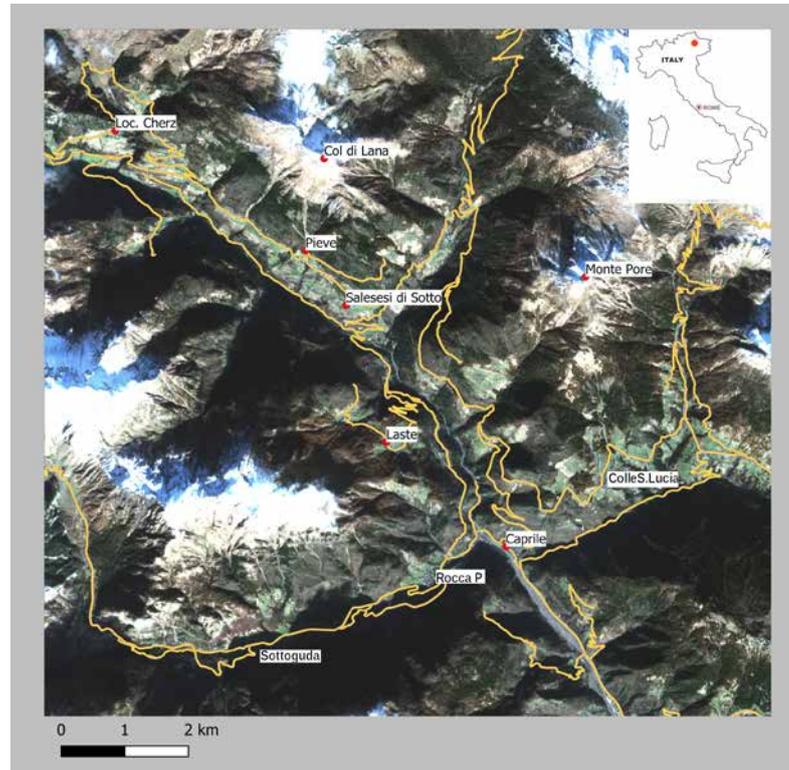


Fig. 6a - Inquadramento geografico dell'area oggetto di indagine nel presente lavoro e interessata dalla tempesta VAIA. Comuni di Livinalongo del Col di Lana, Rocca Pietore, Colle Santa Lucia (Provincia di Belluno).



Fig. 6b - Comune di Livinalongo del Col di Lana. Abitato di Liviné e strada statale n. 50 delle Dolomiti. Sopra l'abitato si nota una ampia porzione di bosco a terra. La rimozione degli alberi potrebbe creare una situazione a rischio per l'abitato in caso di nevicate.

di legname abbattuto in Trentino, gli effetti della tempesta Vivian (25 - 27 febbraio 1990) hanno determinato 80-100.000 m³ di legname abbattuto fra Piemonte e Valle d'Aosta e più recentemente, il 4-5 marzo 2015, gli oltre 300.000 m³ di legname abbattuto in Toscana.

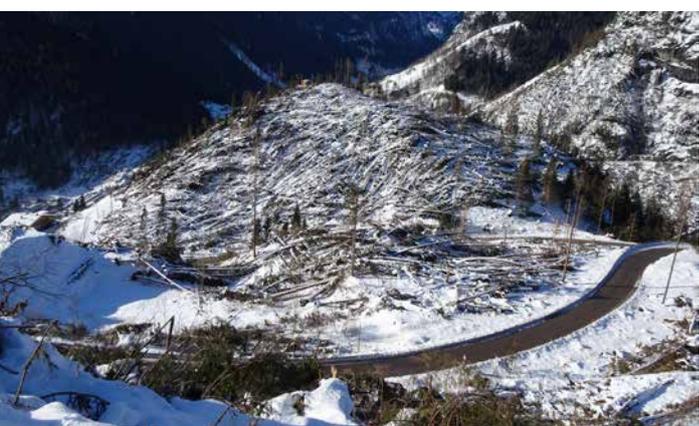
In Europa:

- la tempesta Vivian, fra Germania, Gran Bretagna, Irlanda, Francia, Olanda, Belgio e Svizzera e i citati eventi in Piemonte e Valle d'Aosta, ha abbattuto 60-70 Mm³ di legname;
- la tempesta Lothar e Martin nel 1999, tra Francia Belgio e Germania, oltre 240 Mm³;

- la tempesta Gudrun nel 2005 fra Irlanda, Gran Bretagna, Danimarca, Norvegia, Svezia e Russia oltre 70 Mm³;
- la tempesta Kryll nel 2007, che ha investito tutta l'Europa centrale dall'Irlanda alla Slovacchia oltre 60 Mm³ di legno a terra.

BOSCO DI PROTEZIONE

In alcuni comuni delle Alpi orientali, i forti venti hanno determinato la distruzione dei boschi di protezione (Fig. 6) dalle valanghe, di paesi e strade, con notevoli ricadute gestionali del pericolo valanghe durante la stagione invernale 2018-2019 e in quelle successive.



In generale un bosco protegge con efficacia da frane e valanghe il territorio alpino. Nel bosco il manto nevoso è più stabile che lungo i versanti aperti sia perché le chiome intercettano una parte della neve di precipitazione, favorendo una prima trasformazione, sia perché le condizioni termiche ambientali al suo interno sono più omogenee, con minime più elevate e massime inferiori al campo aperto. Gli effetti del trasporto eolico nel bosco sono inferiori, raramente si formano lastroni, e anche perché i tronchi degli alberi puntellano il manto nevoso. Più un bosco è rado, minore è il

suo effetto protettivo contro le valanghe. Anche parametri come lunghezza e larghezza delle radure e composizione delle specie (Breien e Høydal, 2013; Frey e Salm, 1990) influenzano l'effetto protettivo del bosco.

Secondo Bepi et al., 2009, l'espansione delle foreste nel XIX secolo, ha portato anche ad una diminuzione dell'attività valanghiva in alcune aree delle Alpi.

In Svizzera, circa la metà dei boschi protegge strade, linee ferroviarie o centri abitati sottostanti, da pericoli naturali come valanghe o frane. (<https://www.slf.ch/it/ecosistemi-di-montagna/bosco-di-protezione.html#tabellement1-tab1>).

La tempesta VAIA ha cambiato improvvisamente questa protezione in molte aree alpine, come avvenuto nel Canton dei Grigioni per l'abitato di Curaglia ad opera della tempesta Vivian nel 1990. Tuttavia, gli effetti della VAIA sono stati più vasti e hanno interessato diversi abitati in molte vallate con la necessità, vista l'imminenza della stagione invernale, di identificare, in tempi brevi, i boschi venuti meno alla loro funzione di protezione dalle valanghe.

LE NUOVE AREE VALANGHIVE

Le nuove aree valanghive sono identificate da quelle porzioni di bosco abbattuto, lungo pendii con più di 29° di inclinazione, che ora possono risultare delle aree di potenziale distacco di valanghe (Fig. 7). Infatti sulle Alpi, in campo aperto, l'inclinazione di 29° è quella dove si staccano spontaneamente le valanghe (Roch, 1980).

La situazione di partenza nel novembre 2018, è la presenza di tutto il legname a terra, distribuito in modo caotico in funzione della densità del bosco, della specie e anche della direzione del vento (Fig. 8 a, 8b). Questo legname fortunatamente costituisce una "rugosità elevata del terreno" e quindi, fino a certi spessori di neve al suolo, un impedimento allo sviluppo delle valanghe spontanee. Pertanto, nel range di inclinazioni fra

i 29° e i 35° gli alberi abbattuti costituiscono un buon supporto al manto nevoso riducendo l'attività valanghiva spontanea e lo scivolamento della neve (Margreth et al., 2018). L'effetto "ancoraggio" dei tronchi viene meno quando lo spessore della neve al suolo supera quello dei tronchi (stimato in 1,5 - 2,0 m) (Fig. 9) e quindi l'area diventa valanghiva (Margreth et al., 2018).

Nelle inclinazioni oltre i 35° l'effetto "ancoraggio" dei tronchi diminuisce progressivamente anche per scivolamento degli stessi verso valle.

Oltre a queste aree è stato necessario individuare le zone a bassa rugosità (radure e prati), all'interno o sovrastanti le zone di schianto, che possono dar luogo al distacco localizzato di lastroni. Queste aree potevano generare valanghe che venivano intercettate dal bosco e quindi non essere pericolose per le zone antropizzate, ma ora possono invece raggiungere quote più basse mancando la il bosco.

L'identificazione di queste diverse tipologie di aree in funzione dell'inclinazione della presenza o meno del bosco a terra, indirizza in modo diverso la gestione dell'emergenza sul territorio e delle aree antropizzate, eventualmente coinvolte, ossia ora è lungo lo sviluppo della potenziale nuova valanga. Nel caso di inclinazioni basse (29° - 35°) con bosco a terra, la situazione di pericolo è bassa fin quando non viene superato il valore dello spessore dei tronchi (Fig. 10).

Nel caso di inclinazioni superiori, il pericolo diventa maggiore per minor effetto del bosco a terra ma, la quantità di neve al suolo è di norma inferiore poiché tende a scaricare spontaneamente verso valle.

La mancanza di bosco lungo la zona di scorrimento delle valanghe che si originano in alta quota può dar luogo a valanghe più grandi, specie in caso di apporti nevosi importanti.

Per tutte e tre le situazioni manca un'esperienza pratica e anche della bibliografia adeguata (UFAM, 2008). Pertanto, andranno studiate singolarmente le

potenziali valanghe e prese le dovute misure di prevenzione, adattandole man mano che il bosco a terra si deteriorerà con il passare del tempo a causa di parassiti e altro (Favero e Carniel, 2019).

LA METODOLOGIA APPLICATA

La disponibilità di immagini satellitari multispettrali, riprese sistematicamente su ampie porzioni della superficie terrestre, rappresenta uno strumento ottimale per l'analisi delle variazioni, dovute a cause antropiche o naturali, che incorrono sul territorio.

Pertanto, per individuare i boschi abbattuti della tempesta VAIA sono state utilizzate le immagini multispettrali riprese dal satellite Sentinel-2^o, focalizzando l'attenzione sulle aree in cui il bosco di protezione è venuto meno in modo importante, quali i comuni di Rocca Pietore, Colle Santa Lucia e Livinallongo del Col di Lana in provincia di Belluno (Valt e al., 2019).

Il programma Copernicus dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) comprende diverse piattaforme satellitari Sentinel che sono dedicate all'osservazione della superficie terrestre e sono equipaggiate con sensori diversi, in grado di osservare il nostro pianeta nella sua complessità. La prima missione Sentinel-1 comprende una costellazione di due satelliti in orbita polare, che operano giorno e notte acquisendo immagini radar in banda C, indipendentemente dalle condizioni atmosferiche. La seconda missione Sentinel-2 si compone, invece, di due satelliti in orbita polare eliosincrona (sfasata di 180°), su cui sono alloggiati sensori per l'acquisizione di immagini ottiche passive. Il sensore multispettrale (MSI) acquisisce immagini nell'intervallo spettrale compreso tra 400 e 2500 nm, con diverse risoluzioni spaziali (Tab. 1). In condizioni di cielo privo di copertura nuvolosa i due satelliti gemelli, S2A e S2B, assicurano un tempo di rivisitazione di 5 giorni. Lo stesso programma prevede inoltre satelliti con sensori attivi con caratteristiche orbitali simili.



Nella pagina a fianco, dall'alto in basso:

Fig 7 - Comune di Rocca Pietore - volo elicottero Carabinieri Forestali, Foto Renato Zasso. Con la neve al suolo, il bosco a terra è ancora più evidente.

Fig. 8 - Vaste aree schiantate e direzione del vento con direzioni prevalenti degli schianti (freccie color rosso).

Fig. 9 - Bosco a terra ricoperto di uno spessore di 50 cm di neve. L'effetto "ancoraggio" dei tronchi viene meno quando lo spessore della neve al suolo supera quello dei tronchi (stimato in 1,5-2,0 m) e quindi l'area diventa valanghiva.

Fig. 10 - Particolare di una area schiantata con alberi in direzione trasversale tendente alla linea di pendenza con neve al suolo (30-60 cm). Il manto nevoso non ha una distribuzione continua e quindi, con questi spessori di neve al suolo, non c'è una continuità di neve tale da generare una possibile valanga.

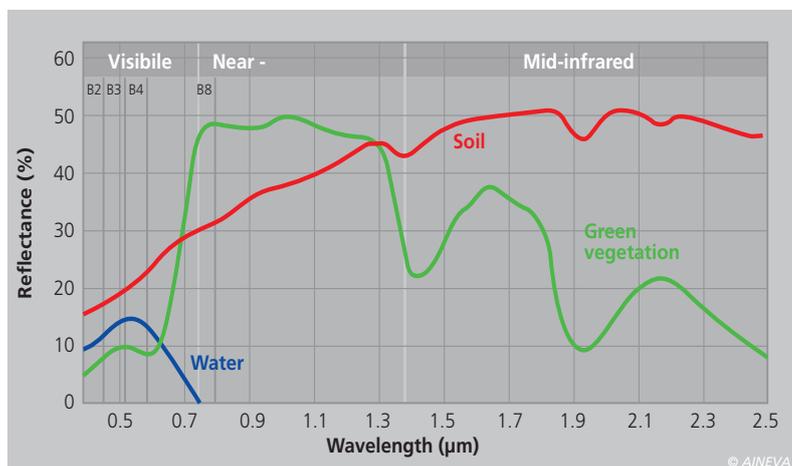


Fig 11 - Spettro di riflettanza di vegetazione, suolo ed acqua. Le linee in nero rappresentano il centro delle bande Sentinel-2A con risoluzione spaziale di 10 m (bande B2, B3, B4, B8)

VALANGHE

Fig 12 - Immagine Sentinel 2A del 11 novembre 2018 (rappresentazione colori naturali RGB=B4B3B2) elaborata per enfatizzare le aree danneggiate dalla tempesta Vaia



Fig 13 - Immagine Sentinel 2A del 11 novembre 2018 (rappresentazione falso colore, banda infrarosso RGB=B8B3B2) elaborata per enfatizzare le aree danneggiate dalla tempesta Vaia - la vegetazione in buono stato è rappresentata in rosso mattone, evidente l'area danneggiata nelle tonalità marrone-grigio chiaro.



Per l'area interessata dalla Tempesta VAIA la prima immagine disponibile, con scarsa copertura nuvolosa, è risultata quella del Sentinel-2A del 11 novembre 2018, 13 giorni dopo l'evento. Questa situazione è da considerare particolarmente favorevole perché, come evidenzia Chirici et al., (2019) l'operatività delle immagini

Sentinel-2 è stata per alcune aree alpine fortemente limitata in quanto, ancora a fine gennaio 2019 causa condizioni di nuvolosità nel periodo autunno-inverno, per oltre il 50% dei comuni interessati non era disponibile ancora un'immagine utile per l'analisi del territorio.

Per poter effettuare un confronto mul-

titemporale e valutare la localizzazione e l'estensione delle aree effettivamente danneggiate è stata anche acquisita un'immagine pre-evento; temporalmente più vicina è risultata essere quella del 21 ottobre 2018 (6 giorni prima dell'evento). La distanza temporale tra le due immagini utilizzate è tale per cui lo stato fenologico dei boschi di latifoglie e caducifoglie nell'area di studio può essere considerato praticamente lo stesso nelle due date. In prospettiva, le immagini prodotte dalle piattaforme attive a microonde, come il Sentinel-1 potranno rappresentare una opportunità per l'analisi di eventi quali quello oggetto di studio, non essendo influenzate dalla copertura nuvolosa e dalla illuminazione della scena, ma al momento le metodologie basate sulle immagini ottiche rappresentano ancora il compromesso. Sentinel-1 è la prima delle cinque missioni che l'ESA sta sviluppando per Copernicus, più solida in termini di costi, copertura spaziale, risoluzione e metodologie già consolidate (Ruetschi et al., 2019). Per il presente lavoro il prodotto Sentinel considerato è stato del livello 2A, vale a dire un dato sottoposto a processi di elaborazioni utili ad ottenere i valori di riflettanza cosiddetti *bottom-of-atmosphere* (BOA). Mentre il livello 1 del prodotto include sia la correzione geometrica, legata al passaggio del satellite ed alle caratteristiche prospettiche proprie dei suoi sensori, che la correzione radiometrica, apportata in funzione della sensibilità intrinseca dei diversi sensori a bordo della piattaforma, il livello 2 comprende la correzione atmosferica legata alle condizioni di torbidità ed interferenza legate al mezzo compreso tra la superficie terrestre e la piattaforma satellitare. Il dato finale è proiettato su un reticolo cartografico basato sulla proiezione UTM/WGS84, costituito da elementi orto-rettificati, chiamati granuli, con estensione pari 100 x 100 km². I valori registrati sono espressi in termini di riflettanza e tengono conto delle interferenze atmosferiche legate alla presenza di aerosol, ozono e

vapor d'acqua che possono alterare la risposta ottica della superficie.

Per studiare gli effetti della tempesta sul territorio sono state utilizzate le bande Sentinel-2A con la risoluzione di 10 m per pixel, acquisite nell'intervallo spettrale vis-near IR. La scelta è stata dettata dalle caratteristiche spettrali della vegetazione, che riflette fortemente nel near-IR mentre assorbe alle lunghezze d'onda del visibile (Fig 11,12,13).

Le bande selezionate rappresentano un buon compromesso tra risoluzione spettrale e spaziale per poter individuare rapidamente le aree di bosco danneggiate. La classificazione delle immagini è stata impostata sul calcolo di un indice di vegetazione definito come *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), che è calcolato considerando il comportamento spettrale della vegetazione nel visibile e nell'infrarosso vicino:

$$NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4) \quad (1)$$

Una volta eseguita per ogni immagine questa stima, i valori di NDVI sono stati suddivisi in classi tenendo in considerazione la definizione di diversi livelli associati alla variazione stagionale nei valori di NDVI, legata allo stato fenologico dei diversi boschi.

L'immagine NDVI precedente l'evento ha permesso di caratterizzare, dal punto di vista spettrale, i diversi boschi fornendo così un'istantanea delle diverse realtà territoriali. I boschi di caducifoglie (bosco autunnale) infatti, in questo periodo stagionale, hanno indici di vegetazione relativamente bassi a causa della naturale perdita delle foglie. L'analisi dei valori di NDVI dell'immagine post-evento ha evidenziato numerose aree con valori di NDVI molto bassi, indicativi di una scarsa copertura vegetale, intesa come area fogliare. In questa immagine i bassi valori di NDVI possono essere rappresentativi sia dei boschi schiantati sia dei boschi che hanno perso le foglie a causa del loro naturale stato fenologico. Le indicazioni raccolte in situ, per alcuni punti campione, hanno permesso di di-

scriminare queste tipologie di superfici ed estendere poi i risultati all'intera area di studio. Tramite un'analisi di *change detection* sono state, quindi, evidenziate le aree in cui la differenza dei valori di NDVI prima e dopo l'evento era significativa e le differenze associate ad una delle classi di cui sopra.

In Fig. 14 e' riportato uno stralcio dell'immagine relativa ai Comuni di Rocca Pietore, Colle Santa Lucia e Livinallongo del Col di Lana, con l'individuazione delle aree danneggiate. Nella figura, con le aree danneggiate colorare di marrone, è possibile avere una prima dimensione

dei danni prodotti dalla tempesta VAIA. Molte le singole aree, formate da singoli o pochi pixel raggruppati nell'immagine, e altre molto vaste e che costituiscono situazioni valanghive più importanti. E' necessario evidenziare come i singoli pixel rappresentino solo il bosco abbattuto, ma molti singoli pixel vicini possono costituire una superficie da valanga più vasta, formata anche dal poco campo aperto fra gli interposti pixel o alberi rimasti in piedi.

Nella Fig. 15, che è il riquadro verde della figura 14, relativa alla zona del Comune di Livinallongo del Col di Lana, questo

| SPATIAL RESOLUTION (m) | BAND NUMBER | S2A | | S2B | |
|------------------------|-------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | | Central Wavelength (nm) | Bandwidth (nm) | Central Wavelength (nm) | Bandwidth (nm) |
| 10 | 2 | 496,6 | 98 | 492,1 | 98 |
| | 3 | 560,0 | 45 | 559 | 46 |
| | 4 | 664,5 | 38 | 665 | 39 |
| | 8 | 835,1 | 145 | 833 | 133 |
| 20 | 5 | 703,9 | 19 | 703,8 | 20 |
| | 6 | 740,2 | 18 | 739,1 | 18 |
| | 7 | 782,5 | 28 | 779,7 | 28 |
| | 8a | 864,8 | 33 | 864 | 32 |
| | 11 | 1613,7 | 143 | 1610,4 | 141 |
| 60 | 12 | 2202,4 | 242 | 2185,7 | 238 |
| | 1 | 443,9 | 27 | 442,3 | 45 |
| | 9 | 945,0 | 26 | 943,2 | 27 |
| | 10 | 1373,5 | 75 | 1376,9 | 76 |

© AINEVA

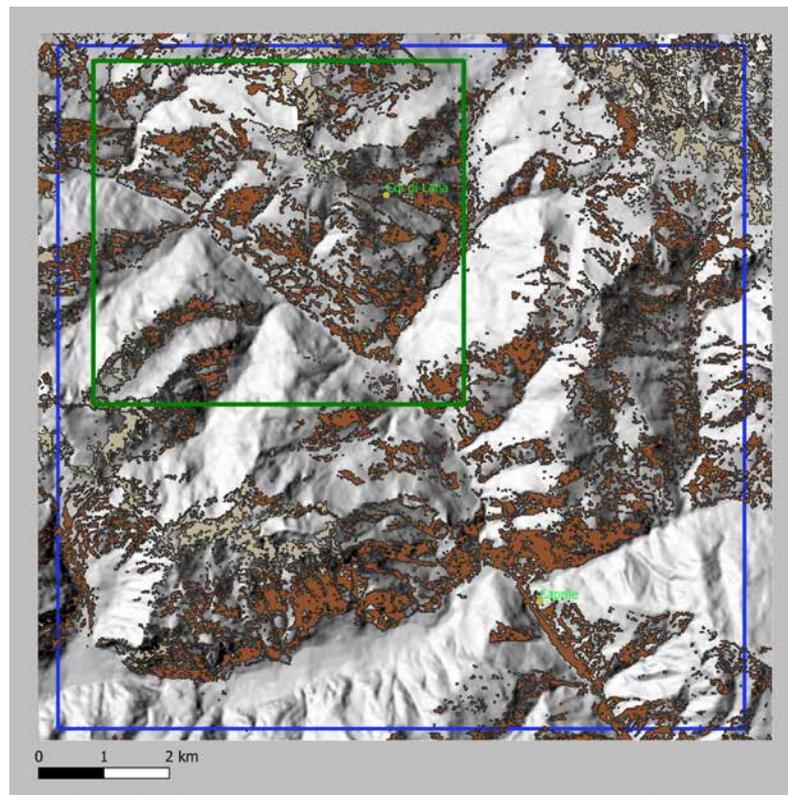


Fig 14 - Modello digitale del Terreno (DTM) con sovrainposte le aree interessate dagli schianti derivate dall'elaborazione delle immagini Sentinel 2. Nel riquadro l'area riportata in Fig 15.

VALANGHE

livello di informazioni è stato integrato con la carta delle pendenze ricavate da un DEM. Il DEM è visualizzato con le classi di inclinazioni caratteristiche delle valanghe, distinguendo fra in pendii con inclinazioni inferiori ai 29°, quelli fra 29 e 35° e quelli superiori. Il risultato evidenzia come la quasi totalità di aree schiantate, individuate con il telerilevamento, ricadano su terreni favorevoli al distacco di valanghe.

VERIFICA A TERRA

Le nuove aree valanghivie, individuate mediante interpretazione delle immagini da satellite, sono state classificate in modo rapido e speditivo. I risultati sono stati utilizzati come supporto all'indagine effettuata da tecnici specializzati, mediante indagine a terra, e riporto su GIS dei contorni degli schianti.

Il lavoro a terra è stato concentrato sulle aree antropizzate, visto l'approssimarsi dell'inverno.

Nella Fig. 16 sono riportate le aree con gli schianti identificati con il telerilevamento a novembre 2018 e le aree contornate (aree verdi) mediante indagine

sul terreno nei mesi successivi (Dorigo e Tomaselli, 2019).

Le due informazioni, seppure rilevate con metodi diversi, evidenziano una elevata corrispondenza.

Sulla montagna veneta, sono stati classificati, tramite indagine sul terreno, oltre 80 siti da valanga con possibile interessamento di edifici (da piccole baite a infrastrutture alberghiere) e strade comunali. Altri enti (Veneto Strade, AVEPA) hanno identificato i nuovi siti valanghivi lungo la viabilità principale (strade regionali e provinciali). Questa distribuzione di competenze fra diversi Enti regionali è stata necessaria per far fronte, in tempi rapidi, alla emergenza che si è venuta a generale con la tempesta VAIA. L'evento ha anche creato altri importanti danni quali frane, erosione di argini, cancellazione di strade, inondazioni, crollo di tralicci dell'energia elettrica con interi paesi senza energia per più giorni, rottura di acquedotti, crollo di briglie selettive ed altro.

SVILUPPI FUTURI

Per la nuova emergenza valanghe che

si è venuta a creare sono stati organizzati dei sistemi di osservazione e controllo dei siti valanghivi nel caso di nevicate intense.

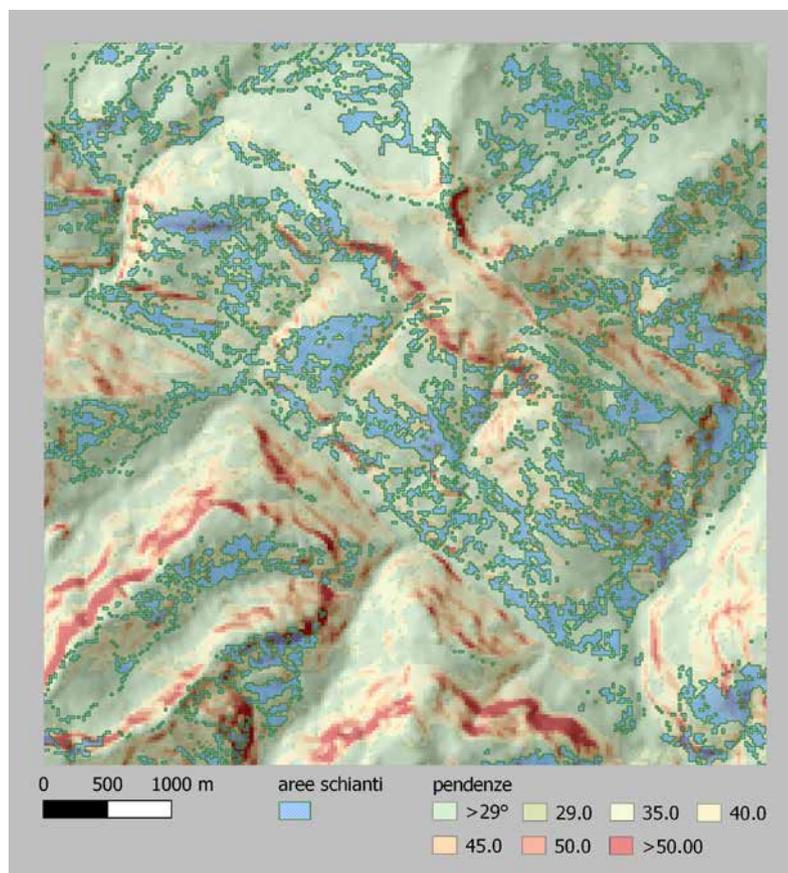
Inizialmente è stato fatto divieto (Linee guida della Giunta Regionale del Veneto per l'Asportazione del Legname e dei residui vegetali nelle aree da Schianti, atto del febbraio 2019) di recuperare il legname nelle aree a rischio valanghivo, per garantire una maggior scabrosità del terreno e quindi una maggior sicurezza per le valanghe. È stata definita un'altezza di neve al suolo di sicurezza massima di 1,20 m nella zona di distacco oltre la quale possono verificarsi delle valanghe (Martinelli e Menegus, 2018). Questo valore è stato determinato calcolando che l'ingombro degli alberi abbattuti sia di 1,20 m dalla superficie del terreno e svolgono quindi un'azione di "trattenimento" del manto nevoso. Questa altezza è stata combinata anche a meno del 50% della zona di distacco con gli alberi completamente sepolti sotto la neve. Oltre tale percentuale, in prima analisi è stato considerato che possono verificarsi delle valanghe (Martinelli e Menegus, 2018).

Parallelamente sono stati avviati studi di dinamica delle valanghe, con il modello di simulazione RAMMS (Christen et al., 2010), per comprendere la dimensione delle possibili valanghe con diversi tempi di ritorno.

Questo ha permesso di comprendere meglio quali elementi urbani (case, strade, etc.) possono essere interessati dalle nuove valanghe, con diversi tempi di ritorno in funzione della quantità di neve fresca al suolo e prevista, che necessitano temporaneamente di procedure di Protezione Civile fino alla messa in sicurezza del sito valanghivo con nuove opere di difesa dalle valanghe.

Nei prossimi anni, utilizzando la stessa metodologia di indagine da satellite, sarà possibile discernere fra le aree ancora con il legname a terra e dove il legname verrà rimosso. Con questo tipo di monitoraggio sarà possibile di-

Fig 15 - Particolare della Fig. 14. La carta delle pendenze derivata dal DTM con sovrainposte le aree interessate dagli schianti derivate dall'elaborazione delle immagini Sentinel 2



sporre rapidamente dello stato di avanzamento dei recuperi di legname e di salvaguardia dei siti da valanga dove il legname deve rimanere in sito fino alla realizzazione delle opere paravalanghe.

CONCLUSIONI

La tempesta VAIA ha generato notevoli danni a tutto il territorio montano e non solo delle Alpi orientali. La distruzione del bosco, oltre al danno alle foreste e la creazione di notevoli problemi per il recupero, ha generato la formazione di nuove aree valanghive per una estensione stimata di 800 ettari (Cagnati in Favero e Carniel, 2019) con l'interessamento di oltre 600 edifici. L'analisi del territorio montano, mediante le immagini Sentinel 2 con la metodologia specifica, ha permesso di avere un primo quadro della situazione di emergenza per le valanghe.

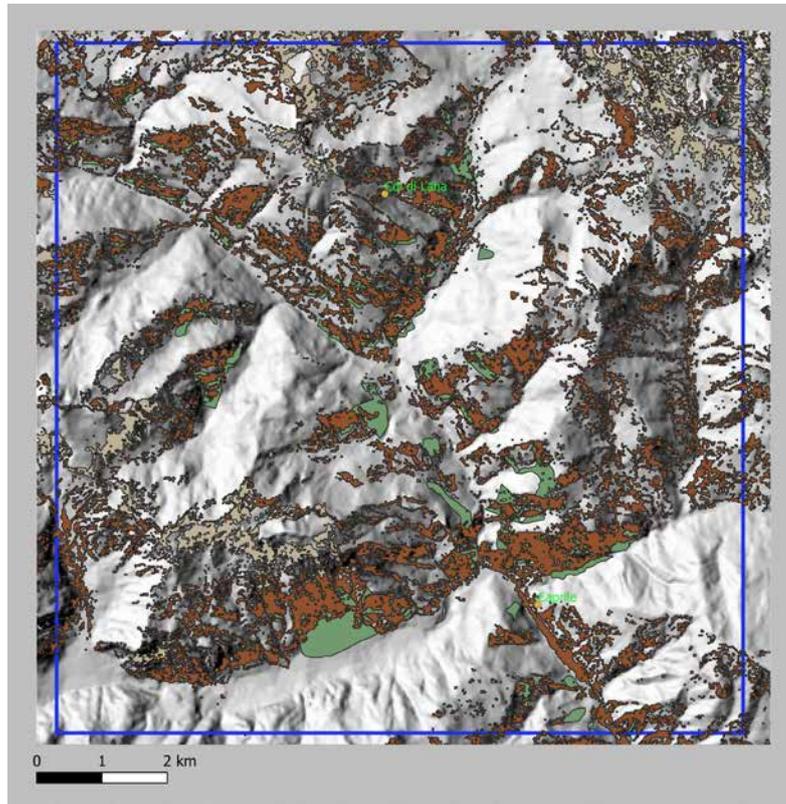


Fig 16 - Modello digitale del Terreno (DTM) con sovrainposte le aree interessate dagli schianti derivate dall'elaborazione delle immagini Sentinel 2A.

Bibliografia

- Aichner A., Oberlechner K., Pietrogiovanna M., Tonner J., Andriolo A., Oberkofler H., Maistrelli F., Agreiter A., Pernstich H. (2019). VAIA 2018 -Danni da maltempo e schianti da vento del 27-30.10.2018 in Alto-Adige. Ripartizione Foreste – IV. Report – 6 febbraio 2019, 58 pp
- Bebi, P., Kulakowski, D., Rixen, C. (2009). Snow avalanches disturbances in forest ecosystems – state of research and implications for management. *For. Ecol. Manage.* 257, 1883-1892
- Breien H. e Høydal O.A. (2013). Effect of high elevation birch forest on snow stability. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Grenoble-Chamonix Mont-Blanc.*
- Cambi M., Giannetti F., Bottalico F., Travaglini D., Nordfjell T., Chirici G., Marchi E. (2018). Estimating machine impact on strip roads via close-range photogrammetry and soil parameters: a case study in central Italy. *iForest* 11: 148-154. – doi: 10.3832/ifer2590-010 [online 2018-02-07]
- Cat Berro D., Acordon V., Castellano C. (2018). 27-30 Ottobre 2018: sciocco eccezionale, mareggiate e alluvioni in Italia con la tempesta "Vaia" SMI/Redazione Nimbus - 31 ottobre 2018 <http://www.nimbus.it/eventi/2018/181031TempestaVaia.htm>
- Chirici G., Giannetti F., Travaglini D., Nocentini S., Francini S., D'Amico G., Calvo E., Fasolini D., Broll M., Maistrelli F., Tonner J., Pietrogiovanna M., Oberlechner K., Andriolo A., Comino R., Faidiga A., Pasutto I., Carra-ro G., Zen S., Contarin F., Alfonsi L., Wolynski A., Zanin M., Gagliano C., Tonolli S., Zoanetti R., Tonetti R., Cavalli R., Lingua E., Pirotti F., Grigo-lato S., Bellingeri D., Zini E., Gianelle D., Dalponte M., Pompei E., Stefani A., Motta R., Morresi D., Garbarino M., Alberti G., Valdevit F., Tomelleri E., Torresani M., Tonon G., Marchi M., Corona P., Marchetti M. (2019). Stima dei danni della tempesta "Vaia" alle foreste in Italia. *Forest@* 16: 3-9. – doi: 10.3832/efor3070-016 [online 2019-02-15]
- Christen M., Kowalski J. e Bartelt P. (2010). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, *Cold Regions Science and Technology*, 63, 1 - 14
- Dorigo G. e Tomaselli A. (2019). Comunicazione personale, atti interni ARPAAV Centro Valanghe di Arabba
- Favero P., e Carniel S. (2019). C'era una volta il bosco. Hoepli, 278 pp ISBN: 9788820391881
- Frey, E. e Salm, B. (1990). Snow properties and movements in forest of different climatic regions. In: *Proc. XIX IUFRO world Congress, Montreal Canada, Div.1, Vol. 1: 328-339*
- Martinelli M., Menegus F. (2018). Piano straordinario di protezione civile per la gestione del rischio valanghivo nel Comune di Livinallongo del Col di Lana. Trento, 50 pp
- Margreth A., Bebi P. e Sovilla B. (2018). Danni alle foreste bellunesi. WSL Istituto per la Ricerca della Neve e delle Valanghe di Davos SLF Davos. Documento interno. 8 pp
- Merzari M., Amicarelli A., e Lucchi S. (2018). Devastazione forestale sulle Alpi –Analisi meteorologica e aspetti forestali <http://www.meteo4.com/mt/index.php/reportage-mainmenu-34/710-devastazione-forestale>
- Motta R., Ascoli D., Corona P., Marchetti M., Vacchiano, G. (2018). Selvicoltura e schianti da vento. Il caso della "tempesta Vaia". *Forest@* 15: 94-98. – doi: 10.3832/efor2990- 015 [online 2018-11-13]
- Regione del Veneto (2018) Relazione evento 27/10/2018 – 01/11/2018 Centro Funzionale Decentrato Prima stesura - 15/11/2018 Rev.01 Pubblicata - 11/01/2019 Pagina 1, 38 pp https://www.regione.veneto.it/c/document_library/get_file?uuid=094022ae-43e7-46b1-86d2-ff3ebf669b89&groupId=90748
- Roch A. (1980). Neve e valanghe. Ed. C.A.I. Milano, 140 pp
- Rüetschi M., Small D., Waser L.T. (2019). Rapid detection of windthrows using Sentinel-1 C-Band SAR data. *Remote Sensing* 11 (2): 115.
- UFAM (2008). Manuale relativo ai danni da tempesta. Aiuto all'esecuzione per far fronte ai danni alle foreste provocati da tempeste di importanza nazionale. Scelta della gestione dei danni nei singoli casi. Ambiente-Esecuzione n. UV-0801-I. Ufficio federale dell'ambiente, Berna. 3a edizione rielaborata, 247 pp
- Valt M., Salvatori R. e Salzano R. (2019). Mapping the effects of VAIA storm using Sentinel 2 data. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 21, EGU 2019-6452, 2019 EGU General Assembly 2019