

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

**Corso di Laurea
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

Studio dell'influenza del cambiamento climatico sui fenomeni di instabilità dei versanti mediante soglie pluviometriche



Relatore

prof. Marco Barla

.....

Candidato

Marco Oggero

.....

Corelatore

ing. Alessandra Insana

.....

Ottobre 2019

SOMMARIO

Il riscaldamento globale è in atto; è indubbio che i cambiamenti climatici possano influenzare la stabilità di pendii naturali o artificiali. In questo contesto si inserisce il presente studio che intende valutare, quanto più quantitativamente possibile, gli effetti dei cambiamenti climatici sull'instabilità di versante. Tale analisi è stata sviluppata tenendo conto del rischio di quest'ultimo fenomeno con un approccio non statico atto a considerare fenomeni meteorologici in cambiamento negli anni a venire. Infatti, in Europa una delle cause del collasso dei pendii è rappresentata dagli eventi piovosi estremi. Nelle analisi si è combinato un approccio statistico con uno meccanico: sono state utilizzate le previsioni sull'incremento dell'intensità della precipitazione massima giornaliera ma anche le leggi fisiche atte a descrivere la risposta della falda a tali precipitazioni e il conseguente equilibrio del pendio. Partendo dai risultati ottenuti si può osservare come i cambiamenti climatici, in termini di variazione della precipitazione giornaliera massima, dovrebbero avere nel 2061- 2090 un impatto pari a circa $-0,2^\circ$ sul limite minimo dell'angolo di inclinazione dei pendii soggetti ad instabilità dovuta alla suddetta precipitazione. Successivamente sono stati utilizzati dei casi studio come banco di prova per le analisi e le previsioni sopra descritte. I luoghi analizzati si trovano nelle Langhe; il primo caso studio esaminato è quello di Cissone nel quale si è osservato come gli eventi meteorologici che hanno innescato un movimento negli ultimi 14 anni si stiano concentrando verso durate minori: ciò è una conferma di quanto previsto per il nord Italia dalle maggiori agenzie che hanno studiato i cambiamenti climatici. Per il caso studio di Monchiero è stato applicato il metodo semplificato sviluppato in questa ricerca. Questa analisi ha condotto alla creazione di una soglia di allerta, non solo basata statisticamente sugli eventi storici, ma anche con una radice fisica alla base. Studiandola si è osservato che se si avesse un incremento del 27% dell'intensità della precipitazione massima giornaliera si raggiungerebbe la soglia rendendo così molto probabile un evento ogni anno e non quattro eventi di instabilità in dieci anni, come si è verificato nel periodo analizzato.

NOMENCLATURA

Grandezza	Simbolo	Unità SI
probabilità di occorrenza	P	-
tempo di ritorno	T	-
pericolosità	H	-
rischio	E	-
danno	D	-
vulnerabilità	V	-
ricarica della falda	R	mm/h
flusso	Q	mm/h
variazione di storage	ΔS	mm
tempo	T	h
conduttività idraulica	K	m/s
specific yield	S_y	-
evapotraspirazione	ET	mm/h
porosità	\emptyset	-
volume di acqua che il terreno o la roccia trattiene per unità di volume del terreno o della roccia stessa	S_r	-

continua...

intensità	i	mm/h
acqua infiltrata	f	h
initial abstractio	I_A	mm
curve number	CN	-
durata	d	h
altezza (pioggia, soggiacenza falda)	h	m
soggiacenza originaria	h_0	m
angolo di inclinazione del pendio	α	°
lunghezza orizzontale del pendio	L	m
densità	γ	kg/m ³
angolo di attrito	ϕ	°
coesione	c	kPa
modulo di elasticità	E	Pa
coefficiente di poisson	ν	-

INDICE

SOMMARIO	I
NOMENCLATURA	III
1 INTRODUZIONE	1
2 I PARAMETRI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI CHE INFLUENZANO L'INSTABILITÀ DEI VERSANTI	5
2.1 Premessa	5
2.2 Inquadramento del contesto	6
2.3 La duplice sfida dei cambiamenti climatici: mitigazione e adattamento.	10
2.4 I cambiamenti climatici in Italia	13
2.4.1 Un caso speciale: Area Alpina.....	17
2.5 I Principali parametri dei cambiamenti climatici	20
2.5.1 Temperatura.....	23
2.5.2 Precipitazioni	25
2.5.3 Parametri dei cambiamenti climatici correlati con i movimenti di versante	29
2.6 Il rischio di instabilità di versante	32
2.6.1 Causalità cambiamenti climatici – Eventi franosi.....	35
2.6.2 Analisi temporale dell'instabilità di versante.....	37
2.6.3 Influenza dei cambiamenti climatici sulla previsione temporale	42
2.7 Sintesi	44
3 RISPOSTA DELLA FALDA ALLE PRECIPITAZIONI	45
3.1 Premessa – cause della variazione della falda	45
3.2 Metodi per stimare la ricarica della falda acquifera	46
3.3 Legge di infiltrazione	52
3.4 Sintesi	57
4 CASI STUDIO	59
4.1 Premessa	59
4.2 Cissone	62
4.3 Monchiero	67
4.4 Somano	71
4.5 Sintesi	75
5 ANALISI DEGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULL'INSTABILITÀ DI VERSANTE	77
5.1 Premessa	77
5.2 Analisi modello semplificato	79
5.2.1 Analisi modello geomeccanico	79
5.2.2 Legge di infiltrazione e Risposta della falda alle precipitazioni– Soglie di allerta	94
5.2.3 Effetto dei cambiamenti climatici valutato sulle curve con condizioni (i;d) tale per cui si ha Δh_i	101
5.3 Analisi casi studio	110
5.3.1 Cissone.....	110
5.3.2 Monchiero.....	114
5.4 Sintesi	120
6 CONCLUSIONI	123
7 BIBLIOGRAFIA	125
8 SITOGRAFIA	127
9 ALLEGATI	129
Ringraziamenti	135

INDICE TABELLE

Tabella 1: Il ciclo del Carbonio negli anni '90. I numeri sono in miliardi di tonnellate di CO ₂ (+ emessi, - assorbiti). (Cook, 2010)	7
Tabella 2: Indicatori di un mondo che si riscalda, Parmesan & Yohe 2003, NOAA	8
Tabella 3: Parametri ed indicatori individuati da SCIA per i rapporti annuali del clima in Italia	20
Tabella 4: Esempi di indicatori di impatto utilizzati in ambito europeo (su un campione di paesi: Germania, Belgio, Francia, Spagna, Svizzera ed Europa), (Giordano et al, 2018).	22
Tabella 5: Trend stimati (e relative deviazioni standard) della temperatura in Italia dal 1981 al 2017. Tutti i trend sono statisticamente significativi al livello del 5%. Fonte "Gli indicatori del clima in Italia nel 2017", SCIA	24
Tabella 6: Relazione tra i principali cambiamenti climatici e gli effetti su opere geotecniche, Fonte: ELGIP, 2019	29
Tabella 7: Principali impatti dei cambiamenti climatici su opere geotecniche in alcune nazioni europee, Fonte: ELGIP, 2019	30
Tabella 8: Valori statistici dello specific yield calcolati su 17 casi studio da Johnson (1967), Fonte Healy et al., 2002	50
Tabella 9: Dati generali frana Cissone, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	63
Tabella 10: Dati generali frana Somano, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	72
Tabella 11: Valori geotecnici rappresentativi dei quattro principali terreni	79
Tabella 12: Valori del CN adottati nelle analisi	94
Tabella 13: Valori di S adottati nelle analisi	94
Tabella 14: Valori dello specific yield utilizzati nelle analisi	95
Tabella 15: Previsioni sulla precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano (SCIA, 2017)	101
Tabella 16: Eventi meteorologici che hanno scatenato un movimento (Monchiero)	116
Tabella 17: Dati di input modello semplificato (Monchiero)	116
Tabella 18: Precipitazioni massime giornaliere tra marzo e giugno nel periodo 2010-2019	118
Tabella 19: tabella riassuntiva delle variazioni del limite minimo dell'angolo di inclinazione dei pendii soggetti ad instabilità a causa della precipitazione massima giornaliera	120
Tabella 20: Portfolio di potenziali indicatori di impatto dei cambiamenti climatici per ciascun settore analizzato, fonte "CRITERI PER LA DEFINIZIONE DI INDICATORI PRIORITARI DI IMPATTO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI: VERSO UN SET A LIVELLO NAZIONALE", Francesca Giordano, Claudia Sebbio, Gabriele Antolini, Lucio Botarelli, Federica Flapp, Veronica Bonati, Luca Onorato, Nicola Loglisci, Graziella Priod, Renata Pelosini, Andrea Motroni, Umberto Morra di Cella.	129

INDICE FIGURE

Figura 1: Andamento della concentrazione di alcuni dei principali gas serra (CO ₂ e CH ₄) e della temperatura, a partire da 800 000 anni fa ad oggi. (Cook, 2010)	6
Figura 2: Mappa del rischio climatico nelle città italiane, (https://www.legambiente.it).....	13
Figura 3: Numero di eventi estremi di ondate di calore in futuro sotto due differenti scenari di emissioni. Fonte: EEA Report No 15/2017, adattato da Russo et al., 2014.	14
Figura 4: Temperature medie giornaliere (a) all'osservatorio di Oropa (1181 m, alpi biellesi) calcolate sui periodi 1961-1989 e 1990-2014 e (b) al Lago Sabbione (2400 m, Val Formazza (Mercalli e Cat Berro, 2016).	17
Figura 5: Grafico temperatura media globale vicino alla superficie ed in relazione al periodo pre-industriale.....	23
Figura 6: Serie delle anomalie medie al Nord, Centro, Sud e Isole, delle precipitazioni nei giorni molto piovosi (R95p), rispetto al valore normale 1971-2000. (SCIA, 2017)	26
Figura 7: Serie delle anomalie medie al Nord, Centro, Sud e Isole, dell'intensità di pioggia giornaliera (SDII), rispetto al valore normale 1971-2000. (SCIA, 2017)	27
Figura 8: Precipitazione nei giorni molto piovosi (mm), scenario RCP4.5. Mappe delle variazioni previste dai modelli e dall'ensemble mean ai tre orizzonti temporali 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga), 2061-2090 (terza riga). (ISPRA, 2015).....	28
Figura 9: Classi di Pericolosità, Tr rappresenta il tempo di ritorno ed è espresso in anni.....	32
Figura 10: Landslide susceptibility for weather-induced landslides: International Centre for Geohazards (ICG) (left) and Joint Research Centre (JRC) (right) models. (EEA, 2017).	33
Figura 11: Expected variations in abundance or activity of four landslide types, driven by projected climate change. (EEA, 2017)	34
Figura 12: Paragone ed evoluzione del ghiacciaio del Trift nel centro delle Alpi svizzere. (a) Foto del 1948 (photo: Gesellschaft für ökologische Forschung). (b) Foto del 2006. (Stoffel, 2012)	35
Figura 13: Verifica correlazione spostamenti-precipitazioni.....	39
Figura 14: Grafico per la valutazione della soglia d'allerta	39
Figura 15: Modello di interazione falda-precipitazione.....	40
Figura 16: Modello di interazione falda-spostamento	41
Figura 17: Grafico per la valutazione della soglia d'allerta e influenza dei cambiamenti climatici ...	42
Figura 18: Ciclo globale dell'acqua, (Materazzi, 2010)	46
Figura 19: Cilindro di sabbia attraversato da acqua utilizzato nella dimostrazione della legge di Darcy, fonte: Wikipedia.....	47
Figura 20: Ipotesi aumento del livello dell'acqua in risposta alle piogge. Rappresentazione del Δh . Fonte Healy et al., 2002	49
Figura 21: Schema del bilancio idrologico per una porzione elementare di bacino, Fonte Musolino, 2015.....	52
Figura 22: Schema concettuale di trasferimento da precipitazioni distribuite nello spazio e nel tempo ad idrogramma di piena nella sezione di chiusura di un bacino, Fonte Musolino, 2015.....	52
Figura 23: esempio applicazione del metodo percentuale con $C=0.4$	53
Figura 24: esempio applicazione del metodo soglia con $S=9\text{mm/h}$	54
Figura 25: schema metodo curve number	54
Figura 26: Esempio di applicazione del metodo curve number, $CN=95$	55
Figura 27: Esempio di applicazione del metodo Horton.....	56
Figura 28: Inquadramento geografico delle Langhe Piemontesi, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	59

Figura 29: Profilo schematico dimostrativo della situazione strutturale del substrato nell'area delle Langhe tra il fiume Tartaro e il Mar Ligure. La sezione posta da NW a SE mostra la disposizione, in monoclinale, della successione sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese posta in discordanza (verso destra) sui litotipi preoligocenici appartenenti ai Domini Brianzonese e Piemontese. Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	60
Figura 30: Comune di Rocca Cigliè, regione Molise. Ripresa aerea di un ampio settore di versante coinvolto in uno scivolamento planare arrestatosi in una fase di evoluzione "intermedia". Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	60
Figura 31: Vista 3D del luogo oggetto del caso studio con individuazione della frana in rosso. Fonte Google Earth	62
Figura 32: Corografia con ubicazione degli strumenti del sistema di monitoraggio, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	64
Figura 33: Misure inclinometriche (S4CISA0A-5.00m) Cissone, versante di Pianezza, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	64
Figura 34: Esempio misure piezometro, inclinometro e pluviometro a Cissone tra il 31/10/2017 e il 28/6/2018, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	65
Figura 35: Esempio misure piezometro, inclinometro, pluviometro e nivometro a Cissone tra il 31/10/2017 e il 28/6/2018, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	66
Figura 36: Vista 3D del luogo oggetto del caso studio con individuazione delle frane planari in rosso e rotazionale in viola. In giallo la frana oggetto di studio. Fonte Google Earth	67
Figura 37: Corografia con ubicazione degli strumenti del sistema di monitoraggio, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	68
Figura 38: Misure inclinometriche Monchiero (www.arpa.piemonte.it)	69
Figura 39: Esempio misure piezometro, inclinometro e pluviometro a Monchiero tra il 15/02/2013 e il 15/08/2013, (www.arpa.piemonte.it)	69
Figura 40: Esempio misure piezometro, inclinometro, pluviometro e nivometriche a Monchiero tra il 15/02/2013 e il 15/08/2013, (www.arpa.piemonte.it)	70
Figura 41: Vista 3D del luogo oggetto del caso studio con individuazione della frana. Fonte Google Earth	71
Figura 42: Corografia con ubicazione degli strumenti del sistema di monitoraggio, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	72
Figura 43: Misure inclinometriche Somano, postazione S10, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	73
Figura 44: Esempio misure piezometro, inclinometro e pluviometro a Somano tra il 01/01/2015 e il 01/06/2015, Fonte Arpa Piemonte, http://www.arpa.piemonte.it/	73
Figura 45: Esempio misure piezometro, inclinometro, pluviometro e nivometriche a Somano tra il 01/01/2015 e il 01/06/2015, (www.arpa.piemonte.it)	74
Figura 46: Schema procedura di analisi	78
Figura 47: Schema geometrico del modello semplificato	79
Figura 48: Schema modello FEM con indicazioni geometriche	80
Figura 49: Esempio di output analisi	80
Figura 50: confronto FS – α con L costante pari a 20 m per le diverse tipologie di terreno elencate in Tabella 11	81
Figura 51: Influenza di α sul FS (Ghiaia)	82
Figura 52: Influenza di L sul FS (Ghiaia)	83
Figura 53: Ruolo della geometria sulla condizione di stabilità di un pendio in ghiaia	83

Figura 54: Δh al variare di α , considerando una posizione originaria della falda con soggiacenza rispetto a monte pari a 4,2m. Analisi effettuate con $L=20m$	84
Figura 55: Influenza di α sul FS (Sabbia)	85
Figura 56: Influenza di L sul FS (Sabbia).....	86
Figura 57: Ruolo della geometria sulla condizione di stabilità di un pendio in sabbia.	86
Figura 58: Δh al variare di α , considerando una posizione originaria della falda con soggiacenza rispetto a monte pari a 7,5m. Analisi effettuate con $L=20m$	87
Figura 59: Influenza di α sul FS (Limo)	88
Figura 60: Influenza di L sul FS (Limo)	89
Figura 61: Ruolo della geometria sulla condizione di stabilità di un pendio in limo.	89
Figura 62: Δh al variare di α , considerando una posizione originaria della falda con soggiacenza rispetto a monte pari a 7,4m. Analisi effettuate con $L=20m$	90
Figura 63: Influenza di α sul FS (Argilla).....	91
Figura 64: Influenza di L sul FS (Argilla)	92
Figura 65: Ruolo della geometria sulla condizione di stabilità di un pendio in argilla.	92
Figura 66: ΔH al variare di α , considerando una posizione originaria della falda con soggiacenza rispetto a monte pari a 10m. Analisi effettuate con $L=20m$	93
Figura 67: Condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh per pendii in ghiaia ($\Delta h=10;20;50;100$ cm)	97
Figura 68: Condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh per pendii in sabbia ($\Delta h=10;20;50;100$ cm).....	98
Figura 69: Condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh per pendii in limo ($\Delta h=10;20;50;100$ cm).....	99
Figura 70: Condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh per pendii in argilla ($\Delta h=10;20;50;100$ cm).....	100
Figura 71: Curve con condizioni (i; d) che comportano lo stesso Δh nei pendii in ghiaia. Δh tra 28 e 38 cm ogni 2 cm con confronto cambiamenti climatici sulle precipitazioni massime giornaliere medie italiane.....	102
Figura 72: Curve con condizioni (i; d) che comportano lo stesso Δh nei pendii in sabbia. Δh tra 22 e 32 cm ogni 2 cm con confronto cambiamenti climatici sulle precipitazioni massime giornaliere medie italiane.....	104
Figura 73: Curve con condizioni (i; d) che comportano lo stesso Δh nei pendii in limo. Δh tra 68 e 78 cm ogni 2 cm con confronto cambiamenti climatici sulle precipitazioni massime giornaliere medie italiane.....	106
Figura 74: Curve con condizioni (i; d) che comportano lo stesso Δh nei pendii in argilla. Δh tra 2,25 e 2,50 m ogni 5 cm con confronto cambiamenti climatici sulle precipitazioni massime giornaliere medie italiane	108
Figura 75: Dati misurati da piezometro e inclinometro nella frana di Cissone	110
Figura 76: Misure piezometriche, inclinometriche, pluviometriche e nivometriche che descrivono lo spostamento del 2014 (Cissone)	111
Figura 77: Eventi di instabilità osservati nel caso studio di Cissone con soglia di allerta interpolata statisticamente.....	112
Figura 78: Eventi piovosi che hanno causato instabilità nel caso studio di Cissone, analizzati in termini di intensità media.....	112
Figura 79: Eventi piovosi che hanno causato instabilità nel caso studio di Cissone, analizzati in termini di durata.	113

Figura 80: Misure piezometriche, inclinometriche, pluviometriche e nivometriche che descrivono lo spostamento di marzo 2011 (Monchiero)	114
Figura 81: Misure piezometriche, inclinometriche, pluviometriche e nivometriche che descrivono lo spostamento di marzo 2014 (Monchiero)	115
Figura 82: Misure piezometriche, inclinometriche, pluviometriche e nivometriche che descrivono lo spostamento di marzo 2015 (Monchiero)	115
Figura 83: Misure piezometriche, inclinometriche, pluviometriche e nivometriche che descrivono lo spostamento di maggio 2013 (Monchiero)	116
Figura 84: Soglia di allerta per il caso studio di Monchiero	117
Figura 85: Analisi soglia di allerta con valutazione.....	118
Figura 86: Trend stimati (e relative deviazioni standard) delle precipitazioni cumulate dal 1961 al 2017. Tra parentesi i trend statisticamente non significativi al livello del 5%. Fonte: “Rapporto clima 2017”, ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.....	131
Figura 87: CN, definizione delle tipologie idrologiche di suolo.....	132
Figura 88: Valori del parametro CN per diverse combinazioni di suolo e di copertura.....	133

1 INTRODUZIONE

Oggi giorno è univocamente riconosciuto l'aumento della temperatura media globale di circa 1.5 - 2°C rispetto ai valori pre-industriali, questo però è solo uno dei risvolti più noti dei cambiamenti climatici. Infatti, esiste un numero molto grande di cause ed effetti che sono tutti in relazione tra loro e ciò rende la situazione complessa e difficile da esaminare. In generale però i principali fenomeni direttamente correlati con i cambiamenti climatici sono la diminuzione dei ghiacciai, la riduzione della copertura nevosa, l'incremento della temperatura media al suolo e di quella superficiale dei mari, l'innalzamento del livello medio del mare, l'aumento medio dell'umidità, lo spostamento della linea del limite degli alberi verso altitudini maggiori, le primavere anticipate.

Nel Capitolo 2 saranno inizialmente introdotti i cambiamenti climatici e le principali strategie atte a ridurre e gestire tali cambiamenti. Infatti, nell'intento di contrastare i cambiamenti climatici sono stati studiati principalmente due sistemi: la mitigazione e l'adattamento. Il primo consiste essenzialmente nella riduzione sostanziale delle emissioni nel corso dei prossimi decenni in modo tale da ridurre i rischi climatici nel ventunesimo secolo ed oltre, aumentando le prospettive di un adattamento efficace, riducendo i costi e le sfide della mitigazione a lungo termine e contribuendo alla resilienza ai cambiamenti climatici percorsi per lo sviluppo sostenibile. Il secondo, invece, consiste nel prevedere gli effetti del cambiamento climatico e adottare misure adeguate a prevenire o ridurre al minimo gli impatti. In questa strategia saranno necessarie strategie e azioni a livello locale, nazionale, transnazionale ed europeo.

Nelle analisi delle suddette problematiche si cercherà anche di dare un inquadramento sulle politiche europee volte in questa direzione, facendo riferimento ad accordi e leggi, tra cui l'accordo di Parigi e quello del 20-20-20.

Successivamente, nel Capitolo 2.4, ci si concentrerà in maniera più peculiare sul territorio italiano, valutando le particolari vulnerabilità (risorse idriche, livello del mare e eventi estremi) e le specifiche strategie in risposta alle possibili problematiche. Sarà inoltre analizzato il caso speciale dell'area Alpina, "sentinella" dei cambiamenti climatici a causa della maggiore sensibilità a quest'ultimo fenomeno.

In questo contesto si inserisce il presente studio che intende valutare, quanto più quantitativamente possibile, gli effetti dei cambiamenti climatici sull'instabilità di versante. Tale analisi sarà effettuata

in particolare tenendo conto del rischio di quest'ultimo fenomeno con un approccio non statico atto a considerare fenomeni meteorologici in cambiamento negli anni a venire.

Infatti, come sarà descritto nel Capitolo 2.6, una delle cause del collasso di pendii è rappresentata dagli eventi piovosi estremi che implicano un repentino innalzamento della falda fino a quando si raggiunge la superficie critica, che definisce la frana, al punto che le forze instabilizzanti superano quelle stabilizzanti e avviene il collasso.

Nel Capitolo 2.5, al fine delle analisi che saranno effettuate, saranno ricercati in letteratura i principali parametri studiati sia a livello globale (es. CSI della EEA) che nazionale (individuati da SCIA) con particolare attenzione a quelli relativi a temperatura e precipitazioni. Per dare un'idea del fenomeno basti pensare che SCIA prevede un aumento di $0,36^{\circ}\text{C}$ ogni 10 anni della temperatura media in Italia e che per le precipitazioni fa notare come si inizi a vedere un segnale di un numero minore di eventi di maggiore intensità per il centro Italia, trend che in futuro potrebbe sempre più espandersi.

Nelle analisi saranno utilizzati due approcci (meccanico e statistico) che possono essere sfruttati per stimare l'influenza dei cambiamenti climatici sull'instabilità di versante, correlando la variazione delle precipitazioni con la risposta della falda e la condizione di equilibrio. Con questi metodi è possibile la costruzione di soglie di allerta su cui la concentrazione degli eventi piovosi comporta una traslazione degli eventi scatenanti verso intensità maggiori e durate minori.

Per quanto riguarda il primo approccio (meccanico), esso sarà applicato studiando anche correlazioni tra eventi di precipitazione e la risposta della falda, in particolare ciò sarà fatto raccogliendo dalla letteratura i principali metodi usati per stimare il fenomeno della ricarica della falda (bilancio idrogeologico, zero-flux plane, legge di darcy, tecniche che studiano tracciatori, metodi numerici, relazioni empiriche, metodo water-table fluctuation) ed anche più nello specifico approcci usati per la determinazione dell'infiltrazione (metodo percentuale, metodo soglia, curve number, metodo horton), uno dei principali processi che determinano la ricarica della falda acquifera. Mettendo insieme queste due metodologie, ed ipotizzando che l'infiltrazione sia il fenomeno che caratterizza la ricarica della falda, sarà possibile stimare l'influenza delle precipitazioni sull'andamento della falda. Questo importante argomento sarà trattato nel Capitolo 3.

Durante le analisi del Capitolo 5.2 saranno utilizzati il metodo WTF e il Curve Number, approcci molto studiati e con un database di dati e risultati numerosi e affidabile.

Infine nel Capitolo 4 saranno introdotti i casi studio, che appartengono al territorio delle Langhe, e sono accomunati dalla geologia costituita da una successione di strati con litotipi prevalentemente marnoso-siltosi e giacitura isoclinale sufficientemente regolare immergente verso NW con un'inclinazione variabile tra 8° e 15° , formando un paesaggio a valli asimmetriche caratterizzate da un versante a debole inclinazione conforme alla stratificazione e da uno, opposto, generalmente ripido, inciso sulla testata degli strati.

In particolare, ci si soffermerà sulla descrizione di tre casi studio di fenomeni franosi di tipo planare:

- Cissone
- Monchiero
- Somano

Essi sono stati scelti in quanto presentano misure in continuo di piezometri e inclinometri che consentiranno analisi sulla legge di infiltrazione basate su serie storiche sufficientemente approfondite.

Infine, per questi casi studio sarà inizialmente eseguita un'analisi dei dati e successivamente quelli che presenteranno un numero di misure sufficientemente abbondanti e validati, nel Capitolo 5.3, saranno utilizzati per confrontare le metodologie studiate con i dati reali ottenuti grazie alle misurazioni di ARPA Piemonte.

2 I PARAMETRI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI CHE INFLUENZANO L'INSTABILITÀ DEI VERSANTI

2.1 PREMESSA

Il riscaldamento globale è stato riconosciuto dall'intera comunità scientifica, come confermato sia dal Rapporto di Valutazione del 2014 (IPCC, 2014) sia nel rapporto dell'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) del 2012 (EEA, 2012).

Per poter comprendere quali siano gli effetti che questo fenomeno avrà sul mondo e sull'ambiente che ci circonda bisogna prima di tutto capire di che cosa si tratta e individuarne le cause.

“Gli uomini hanno causato una profonda e rapida alterazione al nostro Clima” (John Cook, 2010). L'inizio del riscaldamento globale può essere fatto risalire alla nascita del motore a vapore nella seconda metà del 1700. Prima di questa invenzione di fatto l'uomo era dipendente dalla natura per la raccolta di energia, per esempio i mulini funzionavano solo quando era presente vento o acqua. Con l'inizio della rivoluzione industriale lo sviluppo richiese un quantitativo di energia sempre maggiore e questo sfociò nell'invenzione del motore a vapore, grazie al quale si poteva ottenere l'energia che si voleva quando si desiderava. Tutto questo però aveva ed ha un risvolto negativo: una variazione delle concentrazioni atmosferiche del vapore acqueo e di altri gas-serra, come la CO₂, il metano (CH₄), il protossido di azoto (N₂O) e i gas fluorurati a effetto serra. Questi gas assorbono e riemettono verso la superficie terrestre la radiazione emessa dalla Terra stessa ed un aumento delle concentrazioni atmosferiche di tali gas-serra provoca un rafforzamento dell'effetto serra globale, ovvero il cosiddetto riscaldamento globale del pianeta.

L'effetto serra è un fenomeno naturale di regolazione della temperatura di un pianeta dotato di atmosfera. In particolare, quest'ultima risulta essere trasparente alle componenti di breve lunghezza d'onda dello spettro della radiazione solare ma opaca rispetto a radiazioni di maggiore lunghezza d'onda come la radiazione infrarossa. Questo fa sì che parte della radiazione infrarossa sia trattenuta all'interno con un conseguente aumento della temperatura sottostante.

2.2 INQUADRAMENTO DEL CONTESTO

L'effetto serra non è in realtà un fenomeno unico ma raggruppa al suo interno tutti gli eventi che fanno sì che la temperatura superficiale della Terra sia attualmente circa $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. In particolare, sono compresi tutti i fenomeni che fanno variare il contenuto atmosferico di vapore acqueo, CO_2 e metano, dei cosiddetti gas-serra. Infatti, un maggior contenuto di questi elementi comporta un aumento del calore trattenuto dall'atmosfera. La favorevole temperatura della superficie terrestre è dovuta per un terzo all'assorbimento diretto dell'energia solare mentre per due terzi all'effetto serra dell'atmosfera che assorbe i raggi infrarossi e li riemette sia verso lo spazio esterno sia verso la superficie terrestre stessa. Quest'ultima, dovendo emettere una quantità di energia maggiore a quella effettivamente ricevuta dalla radiazione solare incidente, assume una temperatura maggiore, di circa $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ rispetto allo zero. Tutto ciò ci fa comprendere quanto sia importante il contenuto dei gas-serra ed in particolare della CO_2 nell'atmosfera. Questo dato correlato alla temperatura terrestre rappresenta un punto cardine per lo studio del riscaldamento globale. Le misurazioni termometriche esistono solo da circa 132 anni, le temperature del passato più lontano vengono ricostruite principalmente basandosi su variabili sostitutive: sedimenti, pollini e conchiglie fossili, anelli degli alberi, coralli, isotopi dell'ossigeno presenti nel ghiaccio antico. In particolare, i dati per periodi precedenti al campionamento strumentale sono ottenuti soprattutto misurando le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica nelle bolle d'aria (inclusioni di fluidi o gas) intrappolate nelle calotte glaciali dell'Antartide.

Tale metodo è stato studiato ed applicato nella stazione internazionale Concordia, operata in collaborazione tra Francia e Italia. Il progetto prevedeva la perforazione a carotaggio continuo della calotta glaciale fino alla base rocciosa per una profondità totale di 3 270,2 m. Le carote, con un diametro di 10 cm e una lunghezza massima di 3 m, vengono da strati di ghiaccio con temperature comprese tra $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (al fondo) e $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ (in superficie) e le analisi isotopiche realizzate su questi campioni hanno permesso di ottenere la composizione dell'aria (CO_2 , CH_4 , polveri) e ricostruire le variazioni climatiche degli ultimi 800 000 anni. Tale andamento può essere osservato in Figura 1.

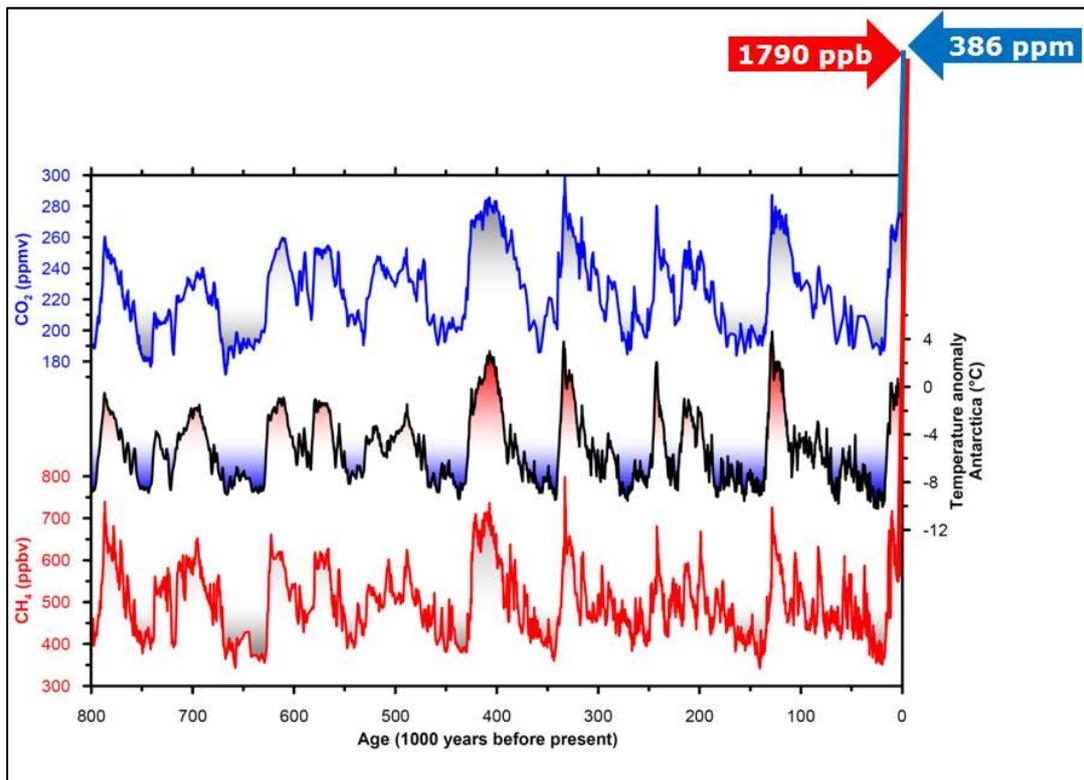


Figura 1: Andamento della concentrazione di alcuni dei principali gas serra (CO_2 e CH_4) e della temperatura, a partire da 800 000 anni fa ad oggi. (Cook, 2010)

Dall'analisi di questi dati si è potuto osservare come la concentrazione dei gas-serra nell'atmosfera non sia mai stata costante, infatti ha sempre avuto un andamento ciclico, come la temperatura.

L'andamento ciclico della temperatura è dovuto alle variazioni orbitali terrestri e alle variazioni nell'attività solare. Nel caso dell'orbita terrestre, essa oscilla periodicamente, modificando la quantità media di radiazione che riceve ogni emisfero nel tempo, e queste variazioni provocano le glaciazioni e i periodi interglaciali. Ci sono tre fattori che contribuiscono a modificare le caratteristiche orbitali facendo in modo che l'insolazione media degli emisferi vari sebbene il flusso globale di radiazione rimanga lo stesso. Si tratta della precessione degli equinozi, dell'eccentricità orbitale e dell'obliquità dell'orbita o inclinazione dell'asse terrestre. Invece per quanto riguarda l'attività solare, essa avviene perché il Sole è una stella di tipo G in fase di sequenza principale, risultando quindi molto stabile. Tuttavia, il flusso radiativo è il motore dei fenomeni atmosferici poiché apporta all'atmosfera l'energia necessaria perché essi si producano. Quindi lievi variazioni nell'attività solare possono apportare più grandi variazioni in alcuni importanti fenomeni collegati al clima. Mentre la caratteristica di ciclicità della concentrazione dell'anidride carbonica è dovuta al fatto che essa essendo presente in natura in quattro grandi serbatoi (biosfera, oceani, geosfera, atmosfera) è soggetta a scambi, da un serbatoio ad un altro, che definiscono il ciclo del carbonio. L'aumento della concentrazione di anidride carbonica è diventato, nel corso del Novecento, argomento di grande dibattito in quanto correlato al riscaldamento del pianeta ed ai mutamenti del clima conseguenti.

Questo andamento ciclico della concentrazione dei gas-serra e della temperatura si è protratto fino allo scorso secolo, periodo in cui i valori hanno iniziato ad essere sfasati rispetto al solito. Al giorno d'oggi è riconosciuto un aumento globale della temperatura media attorno ai 1.5°C e 2°C rispetto ai valori pre-industriali.

Una delle principali tesi degli "scettici" sull'impronta dell'uomo su questo processo è che le emissioni di anidride carbonica (CO₂) da parte delle persone sono una frazione molto piccola rispetto a quelle naturali. Infatti, ogni anno immettiamo 20 miliardi di tonnellate di CO₂ nell'atmosfera invece le emissioni naturali dovute alla respirazione delle piante e al rilascio da parte degli oceani ammontano a 776 miliardi di tonnellate l'anno. Questo sembrerebbe confermare la tesi degli "scettici" ma tale discorso risulta valido solo se non si considera l'intero ciclo del Carbonio. La parte mancante del quadro è che la natura non solo rilascia CO₂, ma la assorbe pure. Le piante respirando assorbono CO₂ ed enormi quantità vengono anche assorbite e disciolte nell'oceano. La natura ne assorbe 788 miliardi di tonnellate ogni anno. L'assorbimento naturale viene ad essere all'incirca bilanciato dalle emissioni naturali. Mentre una parte della CO₂, che immettiamo, viene assorbita dall'oceano e dalle piante, circa metà di queste emissioni rimane in atmosfera. Un riassunto del ciclo del Carbonio negli anni '90 è messo in evidenza in Tabella 1.

Tabella 1: Il ciclo del Carbonio negli anni '90. I numeri sono in miliardi di tonnellate di CO₂ (+ emessi, - assorbiti). (Cook, 2010)

Sorgente	Quantità di CO ₂ scambiata [10 ¹² Kg]
Uso dei Combustibili Fossili	+ 23 -
Vegetazione e Terreno	+ 444 - 450
Oceano	+ 332 - 338

L'aumento della concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera ostacola il rilascio di parte delle radiazioni infrarosse, anche dette radiazioni termiche, verso l'esterno le quali rimangono così intrappolate all'interno degli strati dell'atmosfera più vicini alla superficie terrestre. Ciò comporta un aumento della temperatura negli strati attigui: questo effetto è stato verificato da esperimenti in laboratorio e da monitoraggi da parte dei satelliti che trovano meno calore in uscita verso lo spazio nell'ultimo decennio.

Il processo purtroppo non si conclude così, ma a causa dell'aumento di temperatura si innesca un meccanismo di feedback positivo. Infatti, dai dati raccolti dai carotaggi di ghiaccio dell'Antartide e della Groenlandia è stato possibile riscontrare come temperatura e concentrazione di CO₂ siano estremamente collegate in quanto è stato rilevato che un incremento della prima provoca un aumento della seconda. Questo meccanismo può essere spiegato fisicamente in quanto negli oceani in presenza di un innalzamento di temperatura si verifica un aumento dell'evaporazione; il maggior quantitativo di vapore acqueo comporta una maggior capacità di trattenere calore nell'atmosfera. Un feedback positivo o negativo non rappresenta un fatto buono o cattivo, infatti ciò dipende dal cambiamento stesso. I feedback positivi rafforzano qualsiasi cambiamento climatico in corso, mentre quelli negativi lo contrastano e lo indeboliscono.

Come si può facilmente intuire dalla Tabella 2 le evidenze, che il riscaldamento globale stia avvenendo, sono inequivocabili.

Gli oceani come i ghiacciai sono i principali elementi da cui si possono ottenere riscontri lampanti. Infatti, con l'aumento della temperatura il livello dei mari è destinato a salire a causa del crescente scioglimento dei ghiacciai; inoltre l'acqua dei mari aumenterà anche la propria temperatura e questo avrà come conseguenza l'incremento della salinità. Tutto ciò influirà sulla biodiversità marina riducendola. In generale si può dire che l'effetto dei cambiamenti climatici sulla biodiversità marina e terrestre sarà negativo.

Un altro fattore da tenere molto in considerazione, in particolare per il presente studio, è il cambiamento dei modelli di precipitazioni con eventi estremi sempre più probabili e problemi di siccità in costante diffusione.

Tabella 2: Indicatori di un mondo che si riscalda, Parmesan & Yohe 2003, NOAA

Ghiacciai	↓
Copertura nevosa	↓
Temperatura dell'Aria in prossimità del suolo (troposfera)	↑
Temperatura sulle terre	↑
Temperatura superficiale dei mari	↑
Livello del mare	↑
Contenuto di calore dell'Oceano	↑
Umidità	↑
La linea del limite degli alberi si sta spostando verso i poli e verso altitudini maggiori	↑
Le primavere arriveranno in anticipo	↓
Le specie migreranno verso i poli e verso altitudini maggiori	↑

I pericoli naturali legati al clima ed ad un suo cambiamento sono principalmente le ondate di calore e le precipitazioni intense, che, secondo i rapporti dell'IPCC e della EEA (IPCC, 2012; EEA, 2017), sono già in aumento in Europa. In generale gli eventi climatici estremi sono destinati ad aumentare, sempre secondo i rapporti già citati. Esempi di calamità naturali possono essere le alluvioni dei fiumi, le cicloni di vento, le frane, la siccità, gli incendi boschivi, le valanghe, le grandinate e le mareggiate. Bisogna soffermarsi sul fatto che questi eventi estremi sono tutti correlati tra di loro, perché tutti dipendenti dal ciclo dell'acqua e quindi dal clima. Ad esempio, eventi piovosi estremi possono innescare debris flow e se a questo si aggiungono fenomeni di siccità che possono influenzare il terreno rendendolo più arido e ostacolando così la crescita delle piante è chiaro come l'innescare delle frane sarà più facile e quindi frequente.

2.3 LA DUPLICE SFIDA DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI: MITIGAZIONE E ADATTAMENTO.

La mitigazione e l'adattamento sono strategie complementari per ridurre e gestire i rischi dei cambiamenti climatici. La prima consiste essenzialmente nella riduzione sostanziale delle emissioni nel corso dei prossimi decenni in modo tale da ridurre i rischi climatici nel ventunesimo secolo e oltre, aumentando le prospettive di un adattamento efficace, riducendo i costi e le sfide della mitigazione a lungo termine e contribuendo alla resilienza ai cambiamenti climatici percorsi per lo sviluppo sostenibile. La seconda invece consiste nel prevedere gli effetti del cambiamento climatico e adottare misure adeguate a prevenire o ridurre al minimo gli impatti. In questa tattica saranno necessarie strategie e azioni a livello locale, nazionale, transnazionale ed europeo.

Il cambiamento climatico ha la caratteristica di essere un problema collettivo su scala globale, perché la maggior parte dei gas serra si accumulano nel tempo e si mescolano globalmente e le emissioni di qualsiasi individuo (ad es. singoli, comunità, società, paese) influenzano altri individui.

Una mitigazione efficace non sarà raggiunta se i singoli individui promuovono autonomamente i propri interessi. Risposte cooperative pertanto sono necessarie per diminuire efficacemente le emissioni di gas serra e affrontare i cambiamenti climatici.

Riduzioni sostanziali delle emissioni di gas serra nei prossimi decenni possono limitare sensibilmente i rischi legati ai cambiamenti climatici nella seconda metà del XXI secolo e oltre. Ma alcuni rischi derivanti dai danni climatici sono inevitabili, anche con la mitigazione e l'adattamento.

Esistono molteplici vie di mitigazione che possono limitare il riscaldamento a valori inferiori a 2 ° C ai livelli pre-industriali. Questi percorsi richiedono riduzioni sostanziali delle emissioni nei prossimi decenni per arrivare a circa zero emissioni di CO₂ e altri gas a effetto serra. L'attuazione di tali riduzioni pone notevoli sfide tecnologiche, economiche, sociali e istituzionali. La difficoltà di queste sfide aumenta con l'aumentare del ritardo dell'applicazione della mitigazione.

Come esempio di mitigazione possiamo osservare ciò che è stato fatto grazie al protocollo di Kyoto: nel periodo dal 1990 al 2012, le emissioni di gas serra in Europa sono diminuite nella maggior parte dei settori, con la notevole eccezione dei trasporti (+20% CO₂ equivalente (EEA, 2016)). Le maggiori riduzioni riguardano le emissioni derivanti dall'uso di energia nei settori industriale, residenziale e commerciale (-20% CO₂ equivalente (EEA, 2016)). Tuttavia, le più significative si sono verificate anche in altri settori, come l'agricoltura (-22% CO₂ equivalente (EEA, 2016)) e la gestione dei rifiuti (-26% CO₂ equivalente (EEA, 2016)). Più precisamente, le riduzioni, avvenute nei settori industriali, possono essere spiegate con i miglioramenti dell'efficienza negli impianti di ferro e acciaio e con la diminuzione di combustibili altamente emissivi come il carbone.

L'adattamento può contribuire al benessere delle popolazioni, alla sicurezza e al mantenimento dei beni, delle funzioni e dei servizi dell'ecosistema, ora e in futuro. L'adattamento è specifico per luogo e contesto. Un primo passo verso l'adattamento ai futuri cambiamenti climatici ridurrà la vulnerabilità e l'esposizione alla variabilità del clima.

L'integrazione dell'adattamento nella pianificazione, compresa la programmazione delle politiche, e il processo decisionale possono promuovere sinergie per lo sviluppo e la riduzione del rischio di catastrofi. Costruire capacità di adattamento è fondamentale per una selezione e un'attuazione efficace delle strategie di adattamento.

Le strategie di adattamento e di mitigazione nel loro complesso possono aiutare ad affrontare i cambiamenti climatici, ma singolarmente esse non sono sufficienti. Esse possono essere migliorate attraverso risposte integrate che collegano l'adattamento e la mitigazione con altri obiettivi della società. Inoltre, la loro effettiva attuazione dipende dalle politiche e dalla cooperazione a tutte le scale.

Su un livello pratico è interessante osservare come la pubblicazione della EEA identifichi tre principali sfide (EEA, 2013):

- Approcci coerenti

Se l'Europa realizza misure di adattamento in modo coerente, l'adattamento fornisce un'opportunità per sinergie e ripercussioni positive assicurando che le politiche siano integrate e operino con obiettivi comuni;

- Approcci flessibili

È importante adottare un approccio di 'gestione flessibile', ovvero essere pronti ad adattare i progetti all'evolversi delle condizioni esterne, tenendo in considerazione l'incertezza degli sviluppi futuri e aggiornando costantemente la nostra politica di adattamento alle informazioni provenienti da monitoraggio, valutazione e apprendimento;

- Approcci partecipativi

Il coinvolgimento di parti interessate (responsabili politici, ONG, aziende, cittadini) è importante per creare un senso di responsabilità sulle politiche di adattamento climatico, un fattore fondamentale affinché l'attuazione delle misure relative vengano portate avanti con successo.

Politiche europee di adattamento e mitigazione

La politica europea di mitigazione dei cambiamenti climatici è stata concepita per ridurre progressivamente le proprie emissioni di gas serra fino al 2050. La decisione sulla condivisione degli sforzi stabilisce obiettivi annuali di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra per gli Stati membri per il periodo 2013-2020. L'accordo comprende un insieme di obiettivi climatici ed energetici a livello UE che per il 2020 sono:

- riduzione del 20% delle emissioni di gas serra (a partire dai livelli del 1990);
- ottenere 20% del consumo totale di energia dell'UE da fonti rinnovabili;
- ottenere 20% di miglioramento dell'efficienza energetica.

Il *quadro per il clima e l'energia 2030* propone tre obiettivi chiave per il 2030:

- riduzione del 40% delle emissioni di gas serra (a partire dai livelli del 1990);
- ottenere il 27% del consumo totale di energia dell'UE da fonti rinnovabili;
- miglioramento del 27% dell'efficienza energetica.

Questi obiettivi sono definiti nella tabella di marcia del 2050 all'interno della policy politica Energy RoadMap, che mira a ridurre le emissioni di gas ad effetto serra dell'UE dell'80-95% entro il 2050.

L'UE segue i progressi nel ridurre le emissioni attraverso il monitoraggio e la comunicazione periodici. Gli Stati membri dell'UE stanno monitorando le loro emissioni nell'ambiente. Secondo un rapporto dell'EEA, l'UE è sulla buona strada verso i suoi obiettivi climatici per il 2020.

La strategia dell'UE per l'adattamento ai cambiamenti climatici mira a rendere l'Europa più resiliente nei loro confronti. Tale pianificazione prevede di incentivare l'azione di adattamento in tutta l'UE, la promozione di un maggiore coordinamento, la condivisione delle informazioni di supporto allo sviluppo di cambiamenti climatici sostenibili, assicurandosi che considerazioni sull'adattamento siano affrontate in tutte le politiche pertinenti dell'UE.

Nel 2013, la Commissione europea ha pubblicato (EC, 2013), che comprende diversi elementi per sostenere gli Stati membri nell'adattamento: incentivare l'orientamento e il finanziamento, la promozione di generazione di conoscenza e la condivisione delle informazioni e migliorare la resilienza dei settori vulnerabili. L'UE e i suoi Stati membri a conferma di questa condivisione delle informazioni presentano regolarmente report sulle azioni di adattamento attraverso relazioni nell'ambito dell'UNFCCC (Convenzione delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici).

Riassumendo, gli obiettivi principali dell'Unione Europea per l'adattamento ai cambiamenti climatici sono:

- promuovere azioni degli stati membri
- migliorare le informazioni per un processo decisionale più consapevole
- incentivare azioni comuni principalmente nei settori vulnerabili

A livello mondiale il primo accordo in materia ambientale riguardante il surriscaldamento globale venne raggiunto nel 1997 a Kyoto, in Giappone, dove gli aderenti definirono il protocollo di Kyoto e si accordarono in linea generale sugli obiettivi delle emissioni. Questo primo trattato, molto più improntato alla mitigazione, prevede l'obbligo di ridurre le emissioni di gas-serra in una misura non inferiore all'8,65%, rispetto alle emissioni registrate nel 1985, nel periodo 2008-2012.

Il protocollo di Kyoto inoltre prevede il ricorso ad un meccanismo di mercato, cosiddetto "Meccanismo Flessibile" di cui il principale obiettivo è ridurre le emissioni al costo minimo possibile. Tale metodo prevede la possibilità di acquisire crediti di emissioni in maniera indiretta realizzando progetti per la riduzione delle emissioni di gas-serra in un altro paese ove sia più economico. Inoltre, rende anche possibile lo scambio di crediti di emissione tra Paesi in modo tale da consentire ad un paese, che abbia conseguito una diminuzione delle proprie emissioni superiore al proprio obiettivo, che possa così cedere tali "crediti" a un paese che, al contrario, non li abbia ancora raggiunti.

Successivamente, è importante menzionare l'accordo di Parigi del dicembre 2015, in cui 195 paesi hanno adottato il primo patto universale e giuridicamente vincolante sul clima mondiale. Tale trattato risulta essere innovativo rispetto al precedente protocollo di Kyoto in quanto offre ampio spazio ad obiettivi di adattamento ai cambiamenti climatici.

L'accordo definisce un piano d'azione globale, inteso a rimettere il mondo sulla buona strada per evitare cambiamenti climatici pericolosi limitando il riscaldamento globale ben al di sotto dei 2°C. Inoltre, mira ad aumentare la capacità di adattarsi agli impatti negativi dei cambiamenti climatici e favorire la resilienza climatica e lo sviluppo di basse emissioni di gas serra. Questi obiettivi verranno ricercati rendendo i flussi economici coerenti con un percorso verso basse emissioni di gas serra e sviluppo resiliente ai cambiamenti climatici. Nella pratica si mireranno i cosiddetti obiettivi 20/20/20, ovvero la riduzione delle emissioni di gas serra (del 20%), l'aumento della quota di fonti rinnovabili (al 20% in base al consumo) e l'aumento dell'efficienza energetica, risparmiando così fino al 20% nel consumo di energia.

Dopo l'annuncio del 2016 di Stati Uniti e Cina di stabilire obiettivi nazionali per la riduzione delle emissioni di carbonio e quindi il conseguente ingresso nell'accordo di Parigi, tale trattato è diventato il primo accordo globale sul clima del mondo. Però nel mese di giugno del 2017, il presidente degli Stati Uniti Donald Trump ha annunciato l'intenzione di ritirare il suo paese dall'accordo.

In conclusione, si evince che l'UE è sempre stata in prima linea negli sforzi internazionali tesi a raggiungere un accordo globale sul clima.

2.4 I CAMBIAMENTI CLIMATICI IN ITALIA

La regione italiana si trova quasi al centro della zona temperata dell'emisfero boreale.

Il clima è fortemente influenzato dai mari che la circondano quasi da ogni lato e che costituiscono un benefico serbatoio di calore e di umidità. Determinano infatti, nell'ambito della zona temperata, un clima particolare detto temperato mediterraneo.

L'Italia è una grande nazione ed al suo interno racchiude ambienti e climi che difficilmente possono essere raggruppati e generalizzati. In particolare, all'interno del territorio nazionale si possono distinguere le seguenti zone climatiche:

- freddo nelle Alpi
- continentale nella pianura padana
- mite nelle coste liguri e tirreniche e nel versante adriatico, meridionale e ionico
- fresco e ventoso negli Appennini

Questa distinzione è importante anche ai fini dei cambiamenti climatici in quanto il riscaldamento globale, anche se ha un effetto generale, andrà ad accentuare problematiche relative ad ognuna di esse, per esempio aumenterà la siccità nelle zone calde e produrrà una diminuzione dei ghiacciai nelle zone fredde. Quindi si può capire come sia importante studiare il fenomeno ma anche localizzarlo e comprenderlo in relazione agli effetti sul territorio, proprio perché dipendenti dal clima e dal territorio in questione. Per confermare questa tesi possiamo osservare i rischi che il clima crea oggi in Italia consultando la Mappa del rischio climatico nelle città italiane creata da CasaClima Figura 2, progetto di LegAmbiente. I numeri di questa mappa parlano di 289 comuni colpiti, 469 eventi estremi, 140 stop infrastrutture, 146 allagamenti, 65 esondazioni fluviali. Tutto ciò considerando che il catalogo della mappa analizza gli eventi relativi agli ultimi quattro anni. Questo ci porta a capire quanto il nostro paese sia esposto ai rischi climatici e quanto un incremento di essi possa avere conseguenze importanti.

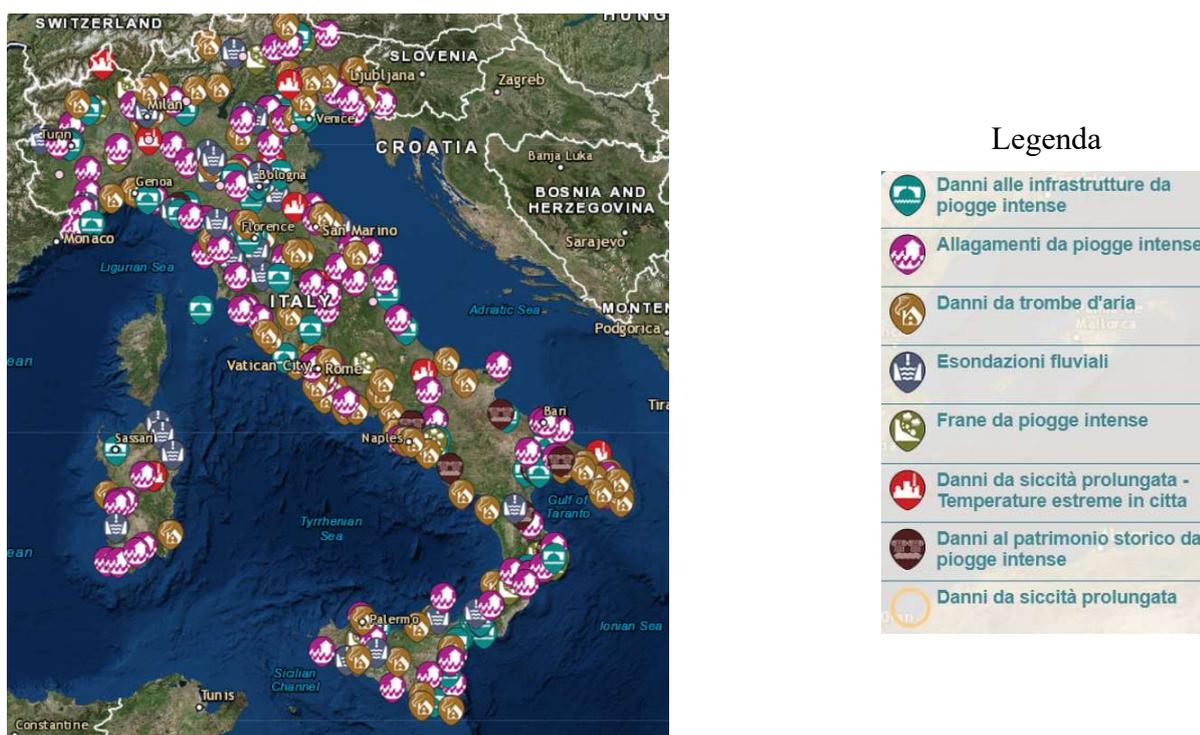


Figura 2: Mappa del rischio climatico nelle città italiane, (<https://www.legambiente.it>)

Nella zona del Mediterraneo, gli impatti negativi, attesi nei prossimi decenni, sono correlati principalmente ad un innalzamento eccezionale delle temperature medie e massime (soprattutto in estate), all'aumento della frequenza di eventi meteo-climatici estremi (ad esempio ondate di calore Figura 3, siccità ed episodi di precipitazioni piovose intense) ed alla riduzione delle precipitazioni medie.

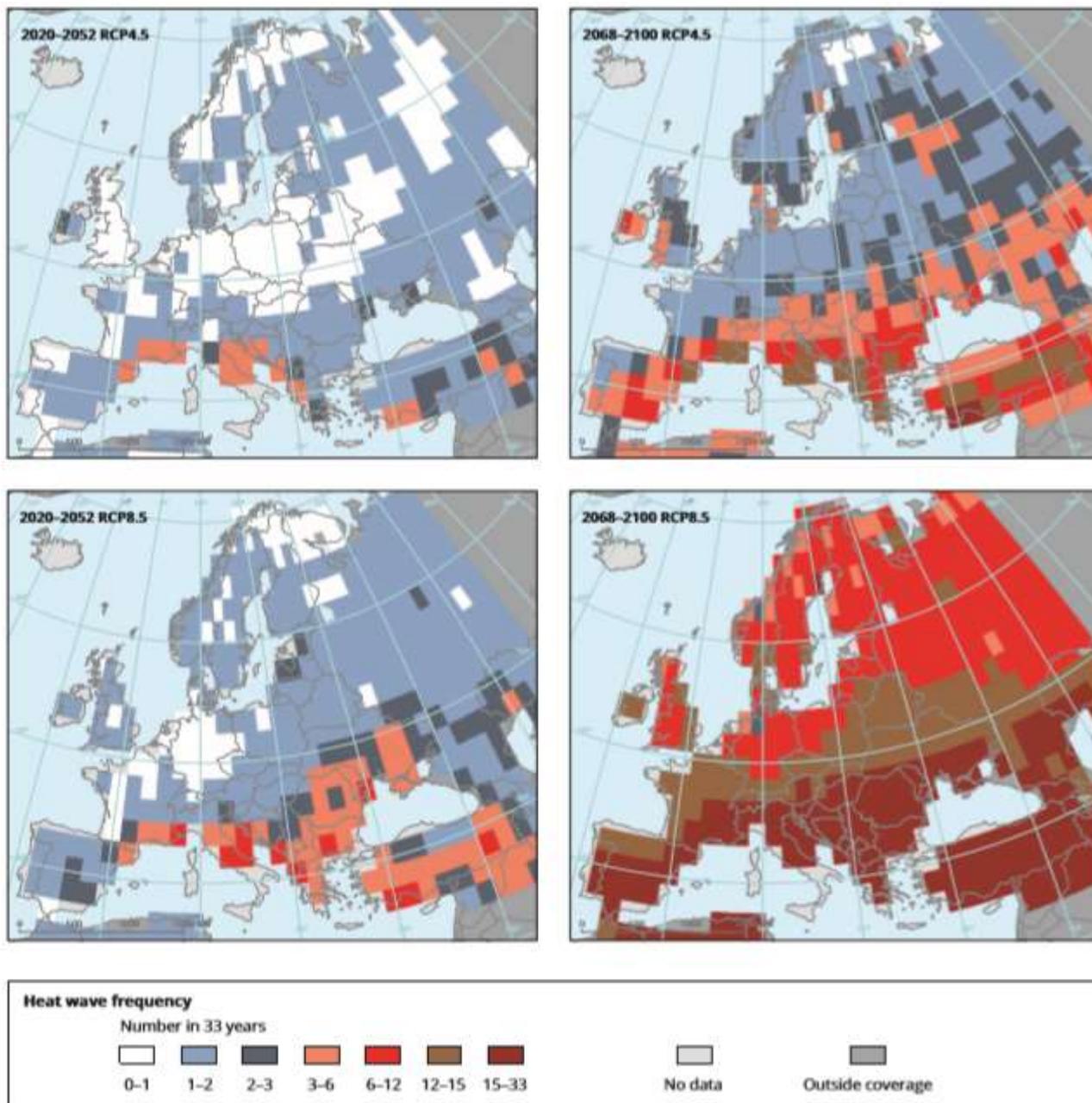


Figura 3: Numero di eventi estremi di ondate di calore in futuro sotto due differenti scenari di emissioni. Fonte: EEA Report No 15/2017, adattato da Russo et al., 2014.

In questo contesto, come indicato dalla Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici del Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare, i potenziali impatti derivanti dai cambiamenti climatici e le principali vulnerabilità per l'Italia tracciano uno scenario potenzialmente critico.

Secondo il già citato report del Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare, in primis, potrebbero esserci condizioni sempre più critiche per quanto riguarda le risorse idriche, soprattutto in estate, nel meridione e nelle isole con una disponibilità d'acqua minore e con una

riduzione anche della qualità. Successivamente le possibili alterazioni del regime idrogeologico potrebbero aumentare la probabilità di frane; in questo caso le zone maggiormente esposte sarebbero la valle del fiume Po e le aree alpine ed appenniniche. Inoltre, è possibile un degrado del terreno a causa dell'erosione con rischio sempre maggiore di desertificazione; tale rischio è più importante nelle regioni del Sud Italia. A causa della riduzione delle precipitazioni medie il rischio degli incendi boschivi e della siccità per le foreste italiane aumenterà ed a tutto questo sarà anche legato una potenziale perdita di biodiversità e di ecosistemi naturali, soprattutto nelle zone alpine, negli ecosistemi montani e nei corpi idrici. Sempre la scarsa disponibilità di acqua potrebbe ridurre la produttività agricola del paese, in particolare delle piantagioni più sensibili all'acqua, quali frumento, frutta, verdura, ulivo, agrumi, vite, grano e mais. Oltre alle possibili perdite agricole, vi potrebbero essere danni economici dovuti principalmente alla riduzione del potenziale di produzione di energia idroelettrica. Non è da sottovalutare come l'aumento della temperatura possa ripercuotersi con effetti negativi sulla salute dei gruppi più vulnerabili della popolazione per via di un incremento di malattie e mortalità legate al caldo, di malattie cardio respiratorie da inquinamento atmosferico, di infortuni, di decessi e malattie causati da inondazioni e incendi.

Si può notare come all'interno del territorio italiano vi sia una variegata casistica di effetti, poiché in esso sono presenti diverse tipologie di climi e quindi i cambiamenti relativi ad essi si presenteranno in maniera differenziata. La suddivisione delle zone climatiche andrebbe elaborata come visto in precedenza, ma in generale, per motivi di semplificazione, viene fatta tra Nord, Centro e Sud. La prima zona è caratterizzata dalla presenza delle Alpi e da un clima più temperato freddo; la seconda è contraddistinta dalla presenza degli Appennini e da un clima mediterraneo continentale ed infine l'ultima zona è caratterizzata da un clima temperato caldo. Da questo ne deriva una maggiore suscettibilità del Sud ad ondate di calore, con tutto ciò che ne consegue, ed invece una marcata sensibilità del Nord a precipitazioni estreme.

Esistono poche analisi economiche complessive dell'impatto dei cambiamenti climatici sul PIL italiano anche perché tale ricerca risulta essere di difficile determinazione dato il grande numero di variabili in gioco. Nell'ambito della Conferenza Nazionale sul Clima del 2007 una ricerca effettuata dimostrava un impatto compreso tra lo 0.12% e lo 0.16% del PIL nel 2050, ipotizzando un aumento della temperatura di circa 0.93°C rispetto al 2001. L'impatto sarebbe ovviamente maggiore per un aumento di temperatura più elevato.

Nel 2012 il Ministero per l'ambiente e della tutela del territorio e del mare ha istituito un Tavolo Istituzionale che ha dato l'input per l'elaborazione di una Strategia Nazionale di Adattamento. Nel 2014 sono stati pubblicati tre documenti, che costituiscono la base aggiornata delle conoscenze tecniche sugli impatti dei cambiamenti climatici e la relativa vulnerabilità e forniscono la prospettiva strategica sull'adattamento:

- Documento strategico "Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici"
- Rapporto tecnico- scientifico "Stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici"
- Rapporto tecnico-giuridico "Analisi della normativa comunitaria e nazionale rilevante per gli impatti, la vulnerabilità e l'adattamento ai cambiamenti climatici"

Inoltre, esiste anche un Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, il cui ultimo aggiornamento risale al 2017, che risulta essere un testo più tecnico e contiene i seguenti documenti:

- Analisi condizione climatica attuale e futura
- Impatti e azioni
- Tavole infografiche
- Database azioni

Mentre la Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici è tipicamente una “visione” strategica dell’adattamento a livello di Nazione, un Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici è la modalità con cui la si persegue ed esegue.

Secondo il report del Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio e del Mare all’interno del territorio italiano (MATTM, 2013) esistono due casi speciali per vulnerabilità: area alpina ed appenninica e distretto idrografico padano. In queste zone gli effetti dei cambiamenti climatici saranno maggiori rispetto alla media e quindi queste particolari zone richiedono una trattazione specifica. Nella prima la caratteristica fondamentale è lo scioglimento del permafrost mentre per la seconda è l’innalzamento del livello del mare per le zone costiere e la gestione della risorsa idrica in diminuzione per le zone interne.

Per quanto riguarda il problema in particolare delle coste veneziane se, a livello globale il mare, dal 1880 ad oggi, è salito di 25 centimetri, la città lagunare ha registrato un andamento diverso. Infatti, dal 1860 il livello è aumentato di 35 centimetri. Un dato dovuto anche alla subsidenza che in tale zona e nel nord Adriatico tocca i 3 millimetri l’anno. Secondo la previsione di Gianmaria Sannino, oceanografo dell’Enea, è “difficile stabilire con precisione il tempo (potrebbe essere il 2030 come il 2070) finché non capiamo come funziona esattamente lo stretto di Gibilterra. Ma ciò che è certo è che queste località saranno inondate entro il 2100.”

Per quanto riguarda i rischi climatici legati ai ghiacciai alpini, secondo uno studio presentato a Vienna alla conferenza di European Geosciences Union, essi andranno incontro ad uno scioglimento di due terzi entro la fine del secolo a causa dei cambiamenti climatici. I ricercatori hanno affermato che la perdita dei ghiacciai comporterebbe un grande impatto sulla disponibilità di acqua per l’agricoltura e l’energia idroelettrica, in particolare durante la siccità, e influenzerebbe la natura e il turismo.

2.4.1 Un caso speciale: Area Alpina

I territori montani costituiscono una zona particolarmente sensibile ai cambiamenti climatici in quanto riuniscono in un'area ristretta ambienti differenti per quota, esposizione e influenza delle circolazioni atmosferiche. In molti rapporti forniti da agenzie, quali IPCC, EEA e ISPRA, questi ambienti sono trattati in sezioni specifiche e posti sotto la lente di ingrandimento in quanto vengono inseriti tra le regioni a maggior rischio climatico. Tale collocamento è principalmente dovuto al fatto che piccole variazioni di clima in pianura vengono amplificate fino ad assumere valori percettibili nelle aree montane. L'amplificazione è prevalentemente dovuta alla riduzione di neve e ghiaccio che rappresentano una superficie riflettente e la cui diminuzione causa un aumento del riscaldamento della superficie terrestre.

Nelle aree montane italiane, e in particolare nell'arco Alpino, è stato riconosciuto che gli effetti del cambiamento climatico saranno tre volte superiori in grado di magnitudine rispetto alla media mondiale (Climate change in the European Alps. Adapting winter tourism and natural hazards management, OECD). L'aumento di temperatura rilevato in circa 120 anni sulle Alpi pari a circa $+1,3^{\circ}\text{C}/\text{secolo}$ (Brunetti et Al., 2009), è infatti quasi doppio rispetto alla media mondiale di $+0,8^{\circ}\text{C}$.

Questa differenza può essere osservata in Figura 4 con due esempi di misurazioni raccolti nelle Alpi.

Questo fa sì che possano essere definite “sentinelle dei cambiamenti ambientali” (Luca Mercalli e Daniele Cat Berro, 2016), costituendo un'eccezionale fonte di osservazione per la ricerca scientifica e un banco di prova per lo sviluppo e la valutazione delle politiche di adattamento. Oltre a questi fattori l'importanza delle montagne è anche dovuta alla risorsa idrica che rappresentano e alla notevole biodiversità che racchiudono.

Secondo l'articolo del noto meteorologo italiano i principali fenomeni dovuti ai cambiamenti climatici che si sviluppano in queste regioni sono l'incremento del rischio idrogeologico, dovuto ad alluvioni e frane, la riduzione della disponibilità di acqua soprattutto in estate, i cambiamenti nel regime delle portate dei fiumi, la riduzione dei ghiacciai e del permafrost con conseguente cambiamento di frequenza delle valanghe, la minaccia alla biodiversità. In particolare, un aumento dell'intensità e della frequenza delle alluvioni è già stato rilevato in alcune regioni delle Alpi. In futuro si attende un aumento di alluvioni in inverno e di siccità in estate, così come si prevede che i picchi delle alluvioni arriveranno sempre prima, anticipando sempre più i tempi, questo anche dovuto allo scioglimento della neve e dei ghiacciai.

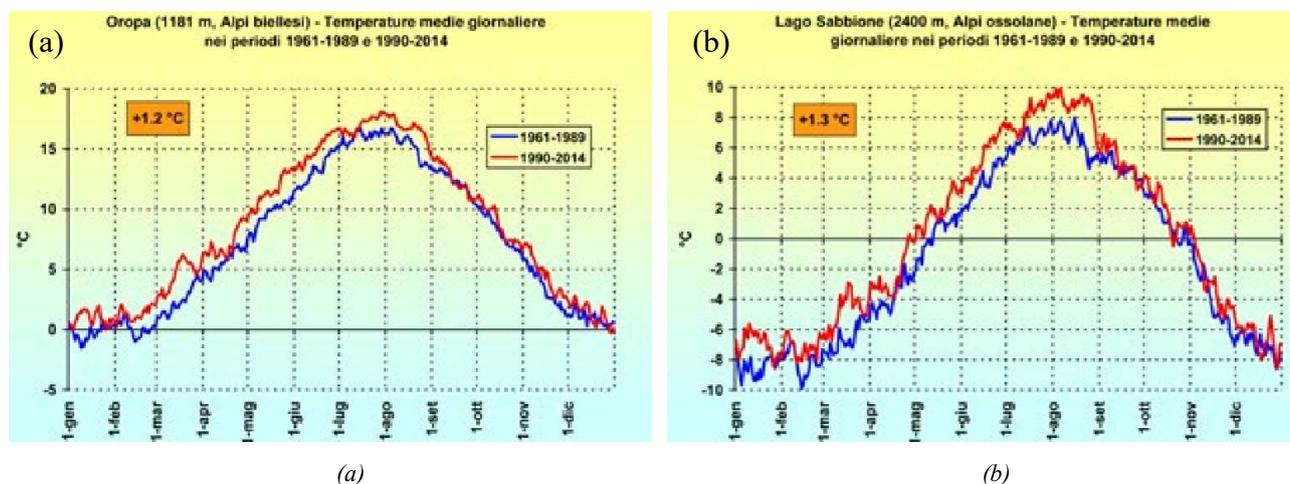


Figura 4: Temperature medie giornaliere (a) all'osservatorio di Oropa (1181 m, alpi biellesi) calcolate sui periodi 1961-1989 e 1990-2014 e (b) al Lago Sabbione (2400 m, Val Formazza (Mercalli e Cat Berro, 2016).

Negli ultimi anni le frane hanno avuto la tendenza a originarsi ad altitudini sempre più elevate in alcune parti delle Alpi ed è stata osservata una diminuzione in alcune zone ad altitudini medie (Mercalli e Cat Berro, 2016). L'aumento della quantità di materiale disponibile vicino ai ghiacciai e l'evoluzione delle precipitazioni potrebbero a loro volta comportare rapidi incrementi locali nell'evoluzione di attività di flusso detritico (debris flow). La perdita di stabilità dei ghiacciai, l'aumento del numero e delle dimensioni dei laghi glaciali e l'innalzamento della temperatura del ghiaccio sembrano essere le principali conseguenze dei cambiamenti climatici nel contesto dei ghiacciai. Il rischio di inondazioni non si verifica solo dai laghi glaciali ma anche dalle emergenti cavità tra i ghiacciai pieni d'acqua (Vincent et al., 2010). Un aumento del numero di caduta massi è stato osservato ad alta quota durante l'ondata di caldo del 2003. Il degrado del permafrost nei pendii ripidi è un fattore importante per la ridotta stabilità delle pareti rocciose. L'aumento delle precipitazioni e l'innalzamento della linea della neve possono portare ad instabilità di frane più frequenti ed estese, come discusso nel report "Alpine strategy for adaptation to climate change in the field of natural hazards" della PLANALP. Onde di calore più frequenti e intense e siccità causeranno un ulteriore aumento della probabilità di incendi boschivi. Questo deve essere previsto non solo per le foreste nella parte meridionale delle Alpi e nelle valli aride, ma anche come un nuovo fenomeno nella parte settentrionale (OcCC / ProClim 2007).

Il cambiamento del pericolo di valanghe in relazione al cambiamento climatico è incerto, anche se si presume che ciò seguirebbe l'evoluzione della copertura nevosa. Una diminuzione dei rischi di valanghe è probabile a basse e medie altitudini, tuttavia eventi di precipitazione intensa possono contrastare questa tendenza, sempre secondo il report della PLANALP.

Infatti, come riportato nel report di SCIA, "Nel corso del 2017 si sono altresì sviluppati numerosi eventi convettivi, localmente violenti, sia nell'interno che lungo le coste. Le notevoli intensità di precipitazione sono state causa di improvvise alluvioni e di colate detritiche, queste ultime anche in concomitanza con temperature elevate in alta quota o con eventi geofisici come la sequenza sismica che ha interessato l'Italia centrale."

(Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, 2017)

Da un punto di vista più pratico la Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici presenta proposte di azioni soft specifiche per i rischi naturali nella zona alpina:

- “
- Revisionare e aggiornare in maniera continua la cartografia di rischio delle aree montane italiane considerando le implicazioni future dei cambiamenti climatici valutando, armonizzando e migliorando i differenti metodi di mappatura, prevenzione e gestione del rischio in aree montane
 - Integrare l'adattamento nella pianificazione territoriale
 - Adeguare gli attuali strumenti di allerta, pre-allerta e gestione delle emergenze, a fronte dell'aumento di frequenza di eventi idrogeologici pericolosi;
 - Ridurre le incertezze sui rischi maggiori, sui potenziali impatti e sulle previsioni future derivate dall'aumento del rischio glaciale;
 - Rafforzare l'attuale rete di monitoraggio e di valutazione dei rischi naturali ed eventi estremi nella pianificazione territoriale, considerare tutti i rischi naturali entro un'area definita;
 - Migliorare le basi per la valutazione dei processi legati ai pericoli naturali e dell'efficacia delle misure di adattamento ai cambiamenti climatici, in cooperazione con i Paesi della regione alpina, assicurando l'armonizzazione e condivisione trasparente dei dati di monitoraggio, terminologia e metodologie di calcolo di rischio integrato, oltre che assicurando lo scambio di esperienze e buone pratiche;
 - Usare gli strumenti di gestione del rischio per indagare le conseguenze sociali ed economiche di diverse misure di adattamento;

- Assicurare l'integrazione e assimilazione dei risultati delle proiezioni climatiche nei modelli idrogeologici e geomorfologici per migliorare lo stato delle conoscenze sui meccanismi di trasmissione degli effetti dei cambiamenti climatici sull'incremento in intensità e frequenza dei rischi naturali prevalenti in aree montane
- Garantire, attraverso il consolidamento del piano d'informazione pubblica in zone montane, un adeguato grado d'informazione alla cittadinanza;
- Adeguare gli attuali sistemi di emergenza allertamento e pre-allertamento dei rischi naturali, attraverso la messa in rete e il sostegno delle attività di monitoraggio esistenti. ”

(MATTM,2015)

Infine, la pericolosità naturale e la gestione del rischio nello spazio alpino devono affrontare le molteplici sfide poste dai cambiamenti climatici. L'obiettivo di livelli di sicurezza adeguati nei paesi alpini in condizioni climatiche variabili richiede una gestione dei rischi integrata allo studio del clima, che sfrutti appieno il potenziale della prevenzione, preparazione, intervento e ricostruzione in modo sostenibile e coordinato. Tali operazioni andranno sempre progettate tenendo in considerazione uno studio di variabilità dei parametri climatici.

2.5 I PRINCIPALI PARAMETRI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

La quantificazione dei cambiamenti climatici non è un argomento di facile trattazione, in quanto i molteplici aspetti che riguardano questo fenomeno e le varie conseguenze che potrebbero comportare influenzano un ampio numero di parametri. Infatti, riguardo a questa problematica, se si va ad eseguire un'analisi sul passato e quindi sulle osservazioni svolte, i principali parametri riguarderanno gli ambiti climatici, socio-economici e le emissioni dei gas serra. Invece se l'analisi svolta si concentrerà maggiormente sugli impatti dei cambiamenti climatici allora i parametri citati in precedenza rimarranno sempre ma saranno anche sfruttati per studiare altre variabili legate principalmente alla natura ed all'impatto sull'economia.

Come sottolinea la Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti climatici (MATTM, 2015), in Italia vi è una necessità crescente di sviluppare e mettere a sistema un set di indicatori di impatto dei cambiamenti climatici a livello nazionale, al fine di migliorare il quadro conoscitivo alla base dei processi di implementazione dell'adattamento. Tale obiettivo non è ancora stato totalmente raggiunto.

Proprio perché questo progetto non è ancora stato totalmente completato verranno di seguito riportati alcuni esempi di indicatori selezionati dalle principali agenzie che si sono occupate di questa problematica.

Per la EEA i CSI (core set of indicators), cioè il nucleo dei parametri dei cambiamenti climatici sono:

- perdite economiche legati ad eventi climatici estremi
- concentrazione dei gas serra
- area dei ghiacciai del mare Artico e Baltico
- temperatura media annuale
- livello del mare
- temperatura media annuale della superficie del mare

Come si può notare il primo riguarda l'ambito socio-economico, il secondo le emissioni dei gas serra e gli altri sono parametri climatici.

Per quanto riguarda questi ultimi in generale i report annuali nazionali sul clima analizzano l'andamento con maggior dettaglio e con un numero più grande di parametri. Di seguito si riportano in Tabella 3 l'esempio dei parametri scelti dal Sistema nazionale per l'elaborazione e diffusione dei dati climatici.

Tabella 3: Parametri ed indicatori individuati da SCIA per i rapporti annuali del clima in Italia

Parametri	Indicatori
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • temperatura media (calcolata come media della temperatura minima e massima giornaliera) • media della temperatura minima giornaliera • media della temperatura massima giornaliera • temperatura minima assoluta • temperatura massima assoluta • numero giorni con gelo (temperatura massima giornaliera < 0 °C)
Precipitazioni	<ul style="list-style-type: none"> • precipitazione media annuale • precipitazione massima giornaliera • numero giorni asciutti (precipitazioni ≤ 1 mm)
Umidità	<ul style="list-style-type: none"> • umidità relativa media (mensile ed annuale)
Nuvolosità	<ul style="list-style-type: none"> • copertura nuvolosa media (mensile ed annuale)
Vento	<ul style="list-style-type: none"> • velocità media del vento • velocità massima del vento

Tali parametri indicati da SCIA possono poi essere a loro volta analizzati, come per esempio per le precipitazioni estreme vengono anche identificati indici R10 (numero di giorni nell'anno con precipitazione ≥ 10 mm), R95p (somma nell'anno delle precipitazioni giornaliere superiori al 95o percentile della distribuzione delle precipitazioni giornaliere nei giorni piovosi nel periodo climatologico 1971-2000) e SDII (precipitazione cumulata annuale divisa per il numero di giorni piovosi nell'anno, considerando piovosi i giorni con precipitazione ≥ 1 mm).

È interessante anche osservare i parametri scelti dall'ente intergovernativo americano sui cambiamenti climatici (IPCC) ed in particolare dal suo dipartimento di distribuzione dei dati (DDC Data Distribution Centre), informazioni che poi sono state utilizzate per stilare il suo famoso report "global warming of 1.5°C" e per analizzare i vari scenari futuri. In particolare i parametri climatici sono:

- temperatura media
- variazione di temperatura diurna
- temperatura massima
- temperatura minima
- precipitazione
- giorni piovosi
- pressione del vapore
- nuvolosità
- giorni di gelo

Tali indici sono studiati ed analizzati a diverse scale: decade, anno, mese e giorno.

Tutti questi parametri sono strettamente legati gli uni agli altri in quanto fanno tutti parte del ciclo dell'acqua o ciclo idrologico ovvero la successione dei fenomeni di flusso e circolazione dell'acqua all'interno dell'idrosfera con i suoi cambiamenti di stato fisico (liquido, aeriforme e solido) ovvero ai continui scambi di massa idrica tra atmosfera e crosta terrestre.

A causa del riscaldamento globale, dato che le temperature più alte aumentano il tasso dell'evaporazione, il ciclo dell'acqua è diventato più intenso durante l'ultimo secolo e questo lo si è potuto notare osservando l'andamento dei parametri precedentemente citati.

Dopo aver analizzato vari esempi di parametri selezionati da diverse importanti agenzie è anche interessante esaminare il lavoro svolto dal Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente avviato nel 2016 e focalizzato nel definire un set di indicatori di impatto dei cambiamenti climatici a livello nazionale.

Nel 2018 sono stati selezionati circa 150 "potenziali indicatori di impatto dei cambiamenti climatici" appartenenti ai seguenti settori: risorse idriche; desertificazione, degrado del territorio e siccità; dissesto idrogeologico; biodiversità ed ecosistemi terrestri, marini e di acque interne e di transizione; salute; foreste e produttività forestale; agricoltura e produzione alimentare; pesca marittima; acquacoltura; energia; zone costiere; turismo; insediamenti urbani; patrimonio culturale; trasporti e infrastrutture; industrie pericolose; aree alpine e appenniniche; bacino fluviale del Po.

In allegato (Tabella 20) è riportato il portfolio dei possibili indicatori.

Questi sono stati selezionati in coerenza con i principali set di indicatori di impatto definiti a livello nazionale da parte di alcuni paesi europei nei rispettivi processi di pianificazione dell'adattamento ai cambiamenti climatici.

Di seguito è riportato un esempio di indicatori di impatto utilizzati in ambito europeo:

Tabella 4: Esempi di indicatori di impatto utilizzati in ambito europeo (su un campione di paesi: Germania, Belgio, Francia, Spagna, Svizzera ed Europa), (Giordano et al, 2018).

Settore	Indicatore	Utilizzo in ambito europeo
Ambiente alpino e appenninico	Bilancio di massa dei ghiacciai	EEA, Francia, Spagna, Svizzera
Ecosistemi marini	Temperature superficiale del mare	EEA, Francia, Germania, Spagna
Zone costiere	Innalzamento del livello del mare	EEA, Belgio, Francia, Germania
Risorse idriche	Portata dei fiumi	EEA, Belgio
Ecosistemi terrestri	Fenologia animale	EEA, Spagna
Degrado del suolo	Contenuto in humus del terreno arabile	Germania
Dissesto idrogeologico	Eventi alluvionali	Belgio
Agricoltura	Fabbisogno idrico per l'irrigazione	EEA, Germania
Foreste e produttività forestale	Incendi boschivi	EEA, Francia, Germania, Spagna
Ecosistemi di acque interne e di transizione	Presenza di specie termofile nelle acque interne	Germania, Spagna
Salute	Ondate di calore e mortalità	EEA, Belgio, Germania, Spagna
Energia	Interruzioni di fornitura elettrica dovuta a cause meteorologiche	Germania
Trasporti e infrastrutture	Incidenti stradali dovuti a cause meteorologiche	Germania
Turismo	Preferenze delle destinazioni di vacanza	Germania

Infine, è importante soffermarsi sulla scelta dei criteri per individuare quali parametri siano più o meno importanti. In questa problematica ci viene in aiuto il report nazionale "Criteri per la definizione di indicatori prioritari di impatto dei cambiamenti climatici: verso un set a livello nazionale" di SNPA (2018) che definisce i seguenti parametri: relazione causa-effetto, intensità dell'impatto, orizzonte temporale, tasso di accadimento, persistenza/reversibilità, probabilità, valore delle risorse potenzialmente a rischio.

Come si può notare dagli esempi precedenti alcuni parametri sono sempre presenti in quanto indicatori diretti e facilmente monitorabili, quali la temperatura e le precipitazioni. È chiaro come queste ultime rispettino ampiamente i criteri prima citati.

2.5.1 Temperatura

L'andamento della temperatura è il parametro da sempre più studiato. Tale parametro può essere esaminato a diverse scale, sia temporali che spaziali. La temperatura globale media annua fornisce una visione più ampia e può dare un'idea di massima dei trend in atto. Come detto nei precedenti capitoli a causa delle eccessive emissioni dei gas serra si sta verificando un riscaldamento globale e ciò può essere riscontrato immediatamente analizzando la temperatura globale media annua (Figura 5).

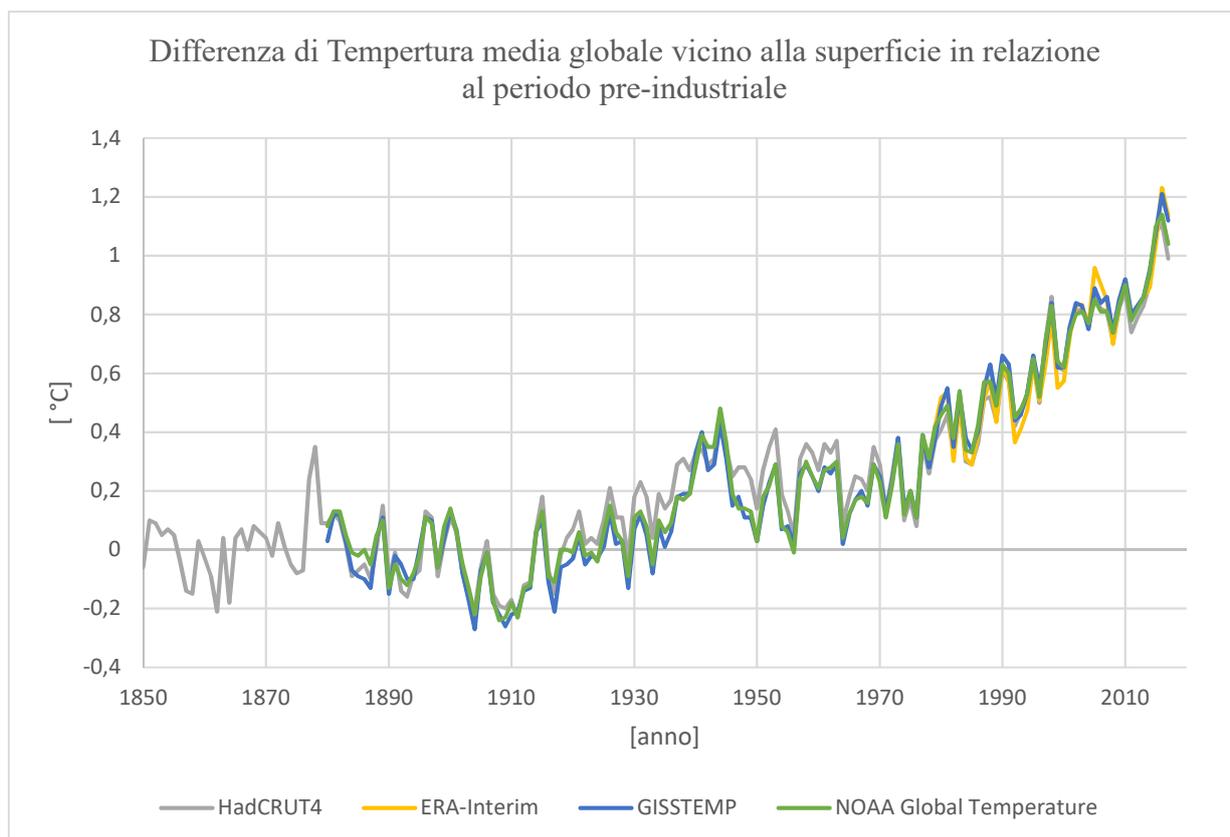


Figura 5: Grafico differenza di temperatura media globale vicino alla superficie in relazione al periodo pre-industriale

Come si può notare dalla figura precedente la temperatura globale media annua nel 2017 è aumentata di circa 1 °C rispetto ai valori pre-industriali. I valori analizzati nella Figura 5 si riferiscono a dati forniti da HadCRUT4 dataset dell'Università di Est Anglia (UK), ERA-Interim del Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine, GISSTEMP progetto della NASA (USA) e NOAA l'Amministrazione nazionale oceanica ed atmosferica.

Tutti i 188 paesi membri dell'UNFCCC (Convenzione delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici) hanno concordato l'obiettivo a lungo termine di mantenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2 °C rispetto ai livelli preindustriali e hanno convenuto di puntare a limitare l'aumento a 1,5 °C. Da considerare che per scenari di emissioni alti l'aumento della temperatura media globale dovrebbe superare i 2 °C rispetto ai livelli pre-industriali entro il 2050.

Si prevede che l'aumento della temperatura globale influenzerà la frequenza e l'intensità degli eventi estremi, come le ondate di calore. Il numero di giorni caldi (quelli che superano la soglia del 90 ° percentile di un periodo di riferimento) sono quasi raddoppiati dal 1960 in tutta l'area territoriale europea.

Queste tendenze del riscaldamento vengono anche confermate da analisi su scala spaziale più ridotta, come quella eseguita dal Sistema nazionale italiano per l'elaborazione e diffusione dei dati climatici (SCIA), infatti lo si può notare dalla seguente tabella (Tabella 5).

Tabella 5: Trend stimati (e relative deviazioni standard) della temperatura in Italia dal 1981 al 2017. Tutti i trend sono statisticamente significativi al livello del 5%. Fonte "Gli indicatori del clima in Italia nel 2017", SCIA

INDICATORE	TREND (°C/10 anni)
Temperatura media	+ 0.36 ± 0.06
Temperatura minima	+ 0.33 ± 0.05
Temperatura massima	+ 0.36 ± 0.06

Secondo il report di SCIA (2015), per la Temperatura massima Media nazionale si prevede in un secolo un incremento compreso tra 1.9 e 3.3°C considerando uno scenario dell'andamento delle emissioni simile a quello odierno e tra 3.4 e 5.7°C in uno scenario caratterizzato da un'elevata emissione e da un alto valore della forzante radiativa. L'aumento è abbastanza costante nel tempo per entrambi gli scenari. Anche per la temperatura minima si prevede in un secolo un incremento compreso tra 1.7 e 3.0°C considerando uno scenario dell'andamento delle emissioni simile a quello odierno e tra 3.4 e 5.1°C in uno scenario più critico. Quest'ultima presenta un aumento abbastanza costante nel tempo per entrambi gli scenari. In sintesi, il riscaldamento previsto nel corso del secolo sull'Italia può essere attribuito ad un aumento più o meno equivalente sia delle temperature massime diurne che delle temperature minime notturne. Infine, per la temperatura media si prevede in un secolo un suo incremento compreso tra 1.8 e 3.1°C considerando uno scenario dell'andamento delle emissioni simile a quello odierno e tra 3.5 e 5.4°C nello scenario più critico.

È interessante notare invece come a livello di distribuzione spaziale, sempre secondo il rapporto di SCIA, il riscaldamento sia abbastanza omogeneo su tutto il territorio in virtù del fatto che tale fenomeno è originato da forzanti e dinamiche a grande scala.

Un altro aspetto che va analizzato è la stagionalità, infatti il riscaldamento non risulta essere costante su tutte e quattro le stagioni ma si prevede essere maggiore in estate e minore in primavera ed autunno.

Infine a livello di variazione degli estremi di temperatura in Italia si prevede un aumento del numero di notti tropicali (numero di giorni nell'anno con temperatura minima > 20°C), una riduzione del numero di giorni con gelo (numero di giorni nell'anno con temperatura minima < 0°C), un aumento del numero di giorni estivi (numero di giorni nell'anno con temperatura massima > 25°C), aumenti consistenti delle onde di calore (numero di giorni nell'anno in cui la temperatura massima è superiore al 90° percentile della corrispettiva distribuzione climatologica normale per almeno 6 giorni consecutivi), una consistente diminuzione delle notti fredde (percentuale di giorni in cui la temperatura minima giornaliera è inferiore al 10° percentile della corrispettiva distribuzione climatologica normale), una diminuzione dei giorni freddi (percentuale di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è inferiore al 10° percentile della corrispettiva distribuzione climatologica normale), un aumento delle notti calde (percentuale di giorni in cui la temperatura minima giornaliera è superiore al 90° percentile della corrispettiva distribuzione climatologica normale), un aumento dei giorni caldi (percentuale di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è superiore al 90° percentile della corrispettiva distribuzione climatologica normale).

2.5.2 Precipitazioni

I cambiamenti previsti nelle precipitazioni variano sostanzialmente tra regioni e stagioni ma a scala globale i fenomeni estremi sono in crescita.

A livello Europeo, secondo la EEA, le precipitazioni annuali dal 1960 mostrano un trend crescente fino a 70 mm per decennio nell'Europa nord-orientale e nord-occidentale e una diminuzione fino a 90 mm per decennio in alcune parti dell'Europa meridionale. Alle medie latitudini non sono stati osservati cambiamenti significativi nelle precipitazioni annuali. Le precipitazioni medie estive sono diminuite significativamente fino a 20 mm per decennio nella maggior parte dell'Europa meridionale, mentre in alcune parti del Nord Europa sono stati registrati aumenti significativi fino a 18 mm per decennio. I cambiamenti previsti nelle precipitazioni variano sostanzialmente tra regioni e stagioni. In generale, le precipitazioni annuali dovrebbero aumentare nel Nord Europa e diminuire nell'Europa meridionale. La prevista diminuzione nell'Europa meridionale è più forte in estate.

Sempre secondo la EEA, l'intensità degli eventi di precipitazione estrema in estate e in inverno è aumentata nell'Europa settentrionale e nord-orientale dagli anni '60. Indici diversi mostrano tendenze divergenti per l'Europa sudoccidentale e meridionale. È probabile che eventi di precipitazioni estremi diventino più frequenti nella maggior parte dell'Europa. I cambiamenti previsti sono più forti in Scandinavia e nell'Europa orientale in inverno.

Secondo la SCIA a livello nazionale italiano considerando uno scenario dell'andamento delle emissioni simile a quello odierno, è probabile una diminuzione della precipitazione cumulata annuale in un secolo compresa tra 6 e 75 mm. Il range delle proiezioni dei modelli al 2071-2100 in percentuale va da una diminuzione dell'8% a un aumento del 5%, con una diminuzione media del 1.5%. Per tradurre i valori percentuali in millimetri, bisogna considerare che il valore medio della precipitazione media cumulata annuale in Italia nel trentennio di riferimento è di circa 900 mm. Secondo lo scenario caratterizzato da un'elevata emissione e da un alto valore della forzante radiativa si prevede una probabile diminuzione della precipitazione cumulata annuale in un secolo, compresa tra 74 e 117 mm. La media tra i modelli indica una diminuzione di 71 mm. Il range delle proiezioni dei modelli in percentuale va da una diminuzione del 15% a un aumento del 2%, con una diminuzione media dell'8%.

Si può notare come in entrambi gli scenari le previsioni indichino una diminuzione della media cumulata annuale delle precipitazioni, quindi una sempre più prevalente caratteristica di siccità. A conferma di questo anche l'indice di siccità "Consecutive Dry Days" (CDD), che rappresenta il numero massimo di giorni asciutti consecutivi nell'anno, nel 2017 ha fatto registrare valori elevatissimi.

Per quanto riguarda invece le precipitazioni estreme "le tendenze nel medio e lungo periodo degli indici rappresentativi della frequenza, dell'intensità e dei valori estremi di precipitazione non mostrano segnali evidenti di variazioni significative" (SCIA, 2017), che però specifica come le stazioni di monitoraggio utilizzabili per il calcolo di questi indici sono ancora abbastanza limitate. Inoltre, l'ente identifica come "un elemento forse significativo, che si può cogliere dalla serie del Centro Italia, è rappresentato dalla sequenza di anomalie positive degli indici R95p (Figura 6) e SDII (Figura 7) negli ultimi anni, che vanno nella direzione di una concentrazione delle precipitazioni in un numero minore di eventi di maggiore intensità" e questo potrebbe essere un primo segnale di un trend che in futuro si espanderà sempre di più.

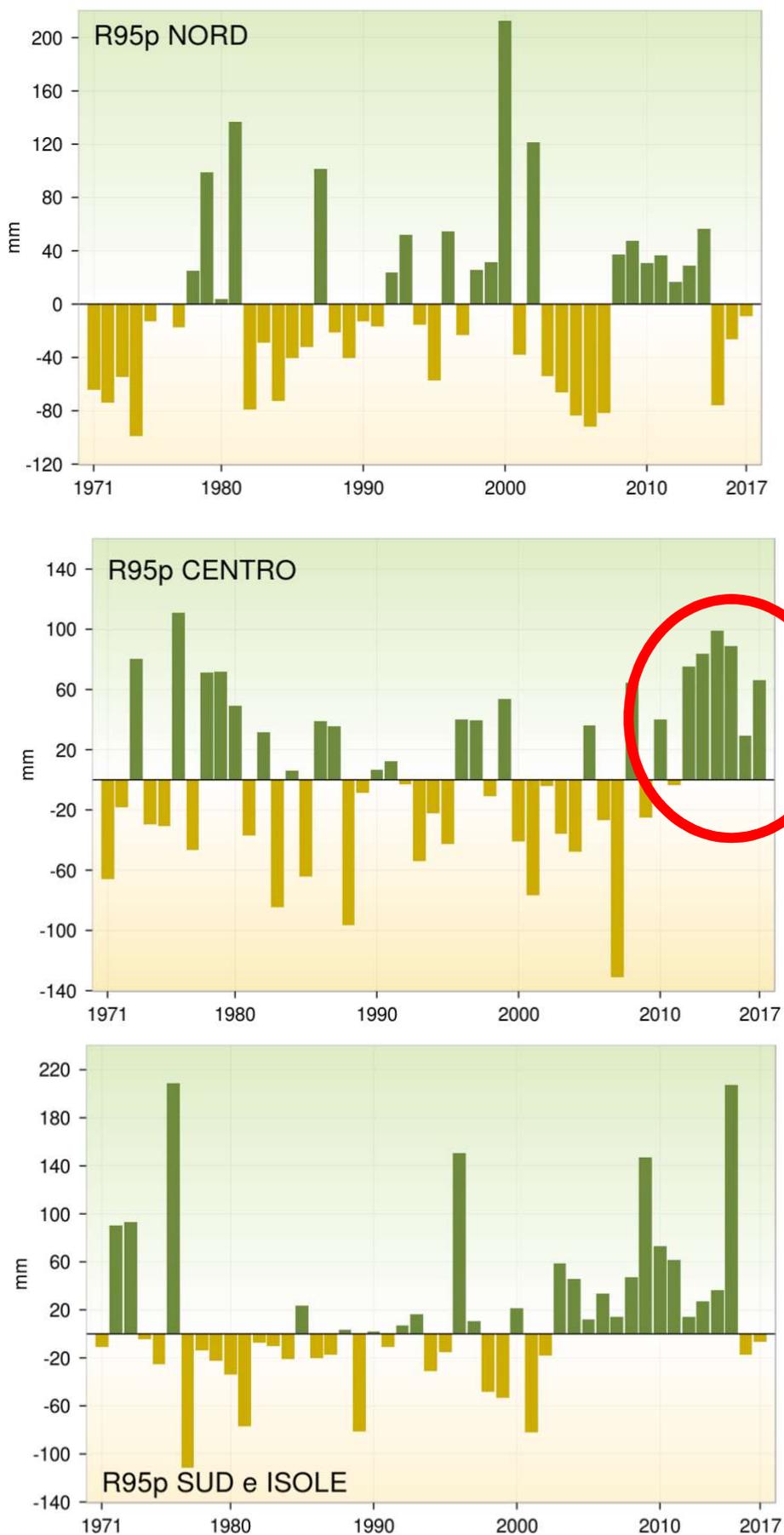


Figura 6: Serie delle anomalie medie al Nord, Centro, Sud e Isole, delle precipitazioni nei giorni molto piovosi (R95p), rispetto al valore normale 1971-2000. (SCIA, 2017)

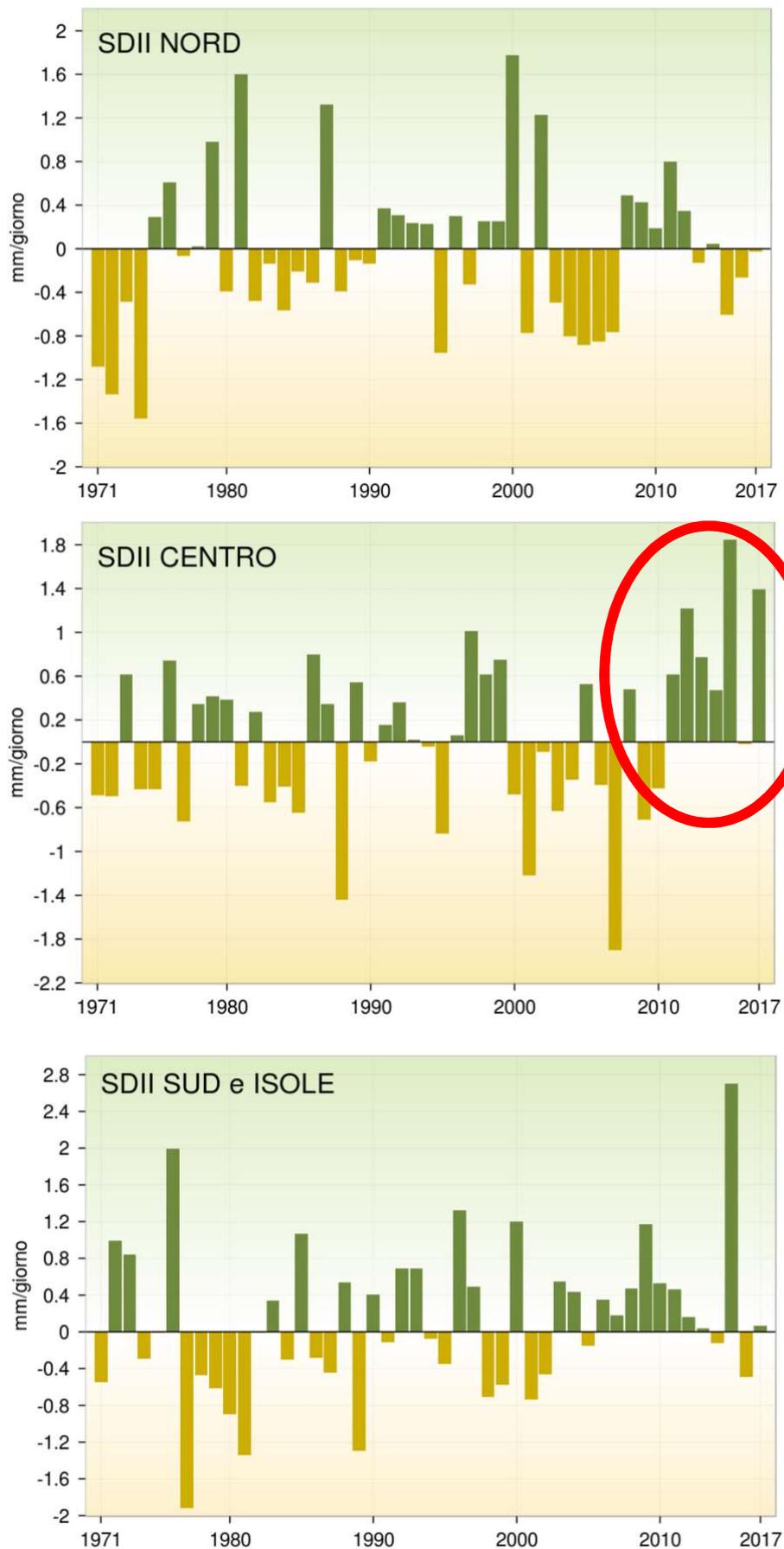


Figura 7: Serie delle anomalie medie al Nord, Centro, Sud e Isole, dell'intensità di pioggia giornaliera (SDII), rispetto al valore normale 1971-2000. (SCIA, 2017)

L'indice R95P indica la somma nell'anno delle precipitazioni giornaliere superiori al 95° percentile della distribuzione climatologica normale.

In generale l'ipotesi che si stia andando verso una concentrazione delle precipitazioni è supportata anche dalla Figura 8 in cui si può notare un aumento delle precipitazioni nei giorni molto piovosi (giorni con precipitazioni giornaliere superiori al 95° percentile della distribuzione climatologica normale).

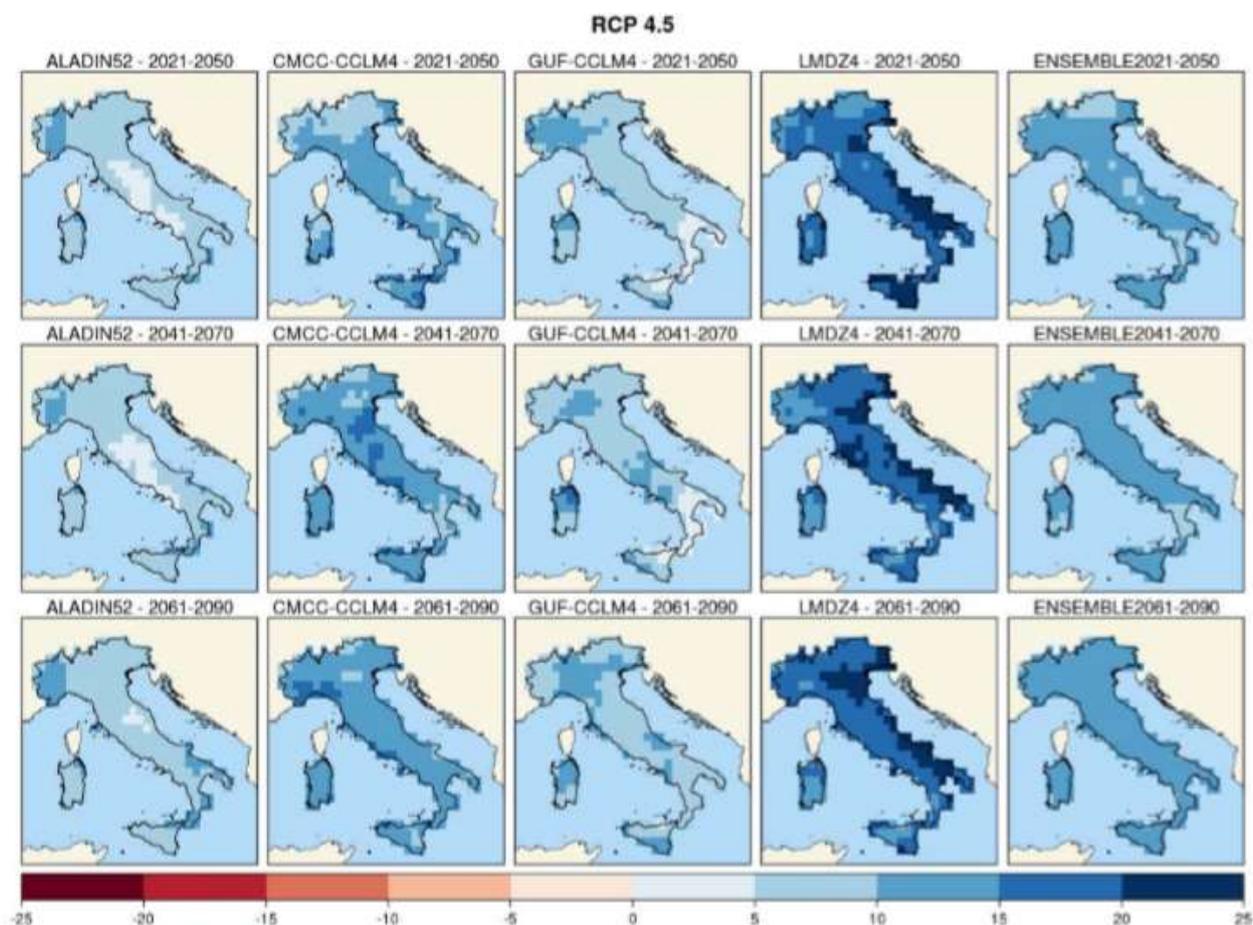


Figura 8: Precipitazione nei giorni molto piovosi (mm), scenario RCP4.5. Mappe delle variazioni previste dai modelli e dall'ensemble mean ai tre orizzonti temporali 2021-2050 (prima riga), 2041-2070 (seconda riga), 2061-2090 (terza riga). (ISPRA, 2015)

Questo incremento degli eventi piovosi estremi risulta essere una problematica sia direttamente ma anche indirettamente poiché può innescare altre calamità naturali quali le frane.

2.5.3 Parametri dei cambiamenti climatici correlati con i movimenti di versante

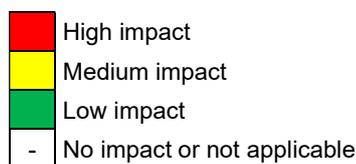
Nelle Tabella 6 e 7 si possono notare alcuni dei principali parametri dei cambiamenti climatici collegati con i movimenti di versante e le loro conseguenze, in particolare nella seconda tabella si può osservare se in alcuni stati si è iniziato a verificare queste correlazioni e con quale entità.

Tabella 6: Relazione tra i principali cambiamenti climatici e gli effetti su opere geotecniche, Fonte: ELGIP, 2019

Climate change parameter:	Climate effects:
A. Increased number of days with intense precipitation	A.1 - Degradation of the shear strength properties due to higher pore pressures in <u>unsaturated</u> soils A.2 - Degradation of the shear strength properties due to higher pore pressures in <u>saturated</u> soils A.3 - Temporary increase of water flow (also causing floods and overflows) A.4 - Temporary increase of water levels in rivers and reservoirs A.5 - Degradation of the shear strength properties due to infiltration of water in joints A.6 - Under designed culverts and drainage systems
B. Increase of the intensity (amount of rain) of heavy showers	B.1 - Degradation of the shear strength properties due to higher pore pressures in <u>unsaturated</u> soils B.2 - Degradation of the shear strength properties due to higher pore pressures in <u>saturated</u> soils B.3 - Sudden increase of water flow (resulting in higher velocities of flow, flash floods, overflows) B.4 - Sudden increase of water levels in rivers and reservoirs B.5 - Under designed culverts and drainage systems
C. Increased yearly amount of precipitation	C.1 - Higher permanent groundwater level C.2 - Degradation of the shear strength properties of soils due to water saturation C.3 - Increased permanent water levels in rivers C.4 - Increased average water flow in rivers
D. Decreased yearly amount of precipitation	D.1 - Death of vegetative cover D.2 - Reduction of water retention D.3 - Permanent lower water level in rivers D.4 - Permanent lower groundwater level
E. Increased average air temperature and increased periods of warm weather in winter	E.1 - Longer periods of snowmelt > Temporary increase of water flow and of water levels in rivers and reservoirs E.2 - Increased intensity of snowmelt > Sudden increase of water flow and of water levels in rivers and reservoirs E.3 - Change of hydraulic and geotechnical properties of perennially frozen debris cones or slopes (variation in the strength properties of the discontinuities due to permafrost changes) E.4 - Decreased number of days with snow cover
F. More frequent and longer drought periods	F.1 - Death of vegetative cover F.2 - Reduction of water retention F.3 - Possible decrease in water, groundwater or pore water pressure levels
G. Increased number of drought-rain cycles	G.1 - Shrinkage of clayey soils due to drying, forming open cracks G.2 - Water pressure increase inside the open cracks
H. Increased number of frost-thaw cycles (number of days with temperature zero crossing)	H.1 - Degradation of the shear strength properties
I. Increased intensity of thunder and hail storms	????
J. Extreme wind speed	Direct impact
K. Variable wind direction	Direct impact
L. Sea level rise	Direct impact
M. Increased intensity of sea storms	Direct impact
N. Change in wave characteristics	Direct impact

Tabella 7: Principali impatti dei cambiamenti climatici su opere geotecniche in alcune nazioni europee, Fonte: ELGIP, 2019

Impact on geoconstruction	Impact degree in each country							
	FR	IT	NL	NO	PT	SI	SW	RO
Increased probability of landslides (A.1, A.2, A.3, A.4, A.5)	High	High	-	High	High	High	High	High
Increased probability of snow avalanches (conn. with E)	High	High	-	Low	Low	Low	Low	High
Increased probability of mudflows (A.1)	Low	High	Low	Low	High	High	High	High
A. Increased probability of debris flow (A.1, A.3)	High	High	High	High	High	High	High	High
Increased probability of surface erosion of slopes (A.3)	High	Medium	High	High	High	High	High	High
Increased probability of rockfall (A.3)	High	High	-	High	High	High	High	High
Increased erosion in the bottom and shore line of river slopes (A.3, A.4)	High	High	Low	High	High	High	High	High
Increased probability of landslides (B.1, B.2, B.3, B.4)	High	High	-	High	High	High	High	High
Increased probability of snow avalanches (conn. with E)	High	High	-	Low	Low	Low	Low	High
Increased probability of mudflows (B.1)	Low	High	Low	Low	High	High	High	High
B. Increased probability of debris flow (B.1, B.3)	High	High	High	High	High	High	High	High
Increased probability of surface erosion of slopes (B.3)	High	Medium	High	High	High	High	High	High
Increased probability of rockfall (B.3)	High	High	-	High	High	High	High	High
Increased erosion in the bottom and shore line of river slopes (B.3, B.4)	High	High	Low	High	High	High	High	High
Increased probability of landslides (C.1, C.2, C.4)	High	Low	-	High	-	High	High	High
Increased probability of surface erosion of slopes (C.3)	High	Low	-	High	-	Low	High	High
C. Increased probability of rockfall (C.1, C.2)	High	Low	-	Low	-	Low	Low	High
Increased erosion in the bottom and shore line of river slopes (C.3, C.4)	High	Low	-	High	-	High	High	High
D. Increased probability of surface erosion of slopes (D.1, D.2)	High	High	-	Low	High	High	High	High
Increased probability of landslides (E.1, E.2, E.4.)	High	High	-	High	High	High	High	High
E. Increased probability of snow avalanches (triggering mechanism) (E.2)	High	High	-	High	High	High	High	High
Increased probability of debris flow (E.3, E.4)	High	High	-	High	High	High	High	High
Increased probability of surface erosion of slopes (E.1, E.2)	High	High	-	High	High	High	High	High
F. Increased probability of surface erosion of slopes (F.1, F.2)	High	High	High	High	High	High	High	High
Increased probability of cracks in slopes of fine grained soil (F.3)	High	High	High	High	High	High	High	High
G. Increased probability of surface erosion (G.1)	High	High	High	High	High	High	High	High
Increased probability of landslides (G.1+G.2)	High	High	-	High	High	High	High	High
Increased probability of snow avalanches	High	High	-	High	High	High	High	High
H. Increased probability of rock falls (H.1)	High	High	-	High	High	High	High	High
Increased probability of landslides (especially in silt, sand)	?	?	?	?	?	?	?	?
I. ?	?	?	?	?	?	?	?	?
J. Increased erosion of slopes with sensitive erosion soil	High	Low	-	Low	High	High	High	High
Increased erosion of coastal cliffs (sandstone)	?	Low	-	High	High	High	High	High
K. Increased erosion of coastal cliffs (sandstone)	?	Low	-	High	High	High	High	High
L. Retreat and instability of coastal cliffs	High	High	?	High	High	High	High	High
M. Destruction of beaches and dune systems	High	High	High	High	High	High	High	High
N. Increased probability of coastal cliffs landslides	High	High	High	High	High	High	High	High
O. Increased probability of coastal cliffs landslides	High	High	High	High	High	High	High	High



Queste tabelle sono state create dal gruppo ELGIP (European Large Geotechnical Institutes Platform) un'organizzazione di ricerca in ambito di geo-ingegneria.

Osservando questi risultati, bisogna premettere che fare un discorso generico che comprenda l'intera nazione italiana è abbastanza complicato in quanto il clima da nord a sud risulta essere molto variegato e gli effetti dei cambiamenti climatici diversi. Infatti, per quanto riguarda il centro Italia "le soglie per gli eventi futuri dipenderanno di più dalla pioggia cumulata rispetto alla durata" (Alviola et al; 2018), quindi in base a ciò per il centro Italia sarebbe più opportuno assegnare un impatto medio rispetto ai parametri di durata, come per esempio: A. Increased number of days with intense precipitation. Invece per il Nord Italia la situazione è diversa ed i parametri di intensità e durata relativi ad eventi estremi hanno un impatto maggiore. Infine, per quanto riguarda i parametri E ed F si potrebbe considerare come effetto anche l'abbassamento medio della falda come suggerito dall'articolo di Tang et al. (2017).

2.6 IL RISCHIO DI INSTABILITÀ DI VERSANTE

Il movimento di versante, movimento franoso o semplicemente frana, è il movimento di una massa di roccia, detrito o terreno lungo un pendio. Esso si verifica come una combinazione di molti fattori meteorologici, geologici, morfologici, fisici e umani.

Bisogna innanzitutto spiegare da cosa è dato e come si valuta la pericolosità del rischio da frana. Esso si può ottenere nel seguente modo:

$$R = D \times H$$

Dove “R” indica appunto il rischio, “H” rappresenta la pericolosità, ovvero l’analisi della probabilità di occorrenza e delle caratteristiche delle frane potenziali, ed infine “D” è il danno. Negli ultimi anni si sta osservando un aumento di tale fattore che può essere spiegato dalla sempre maggiore espansione di insediamenti umani ma anche dagli indiscutibili cambiamenti climatici. Questi ultimi due elementi influenzano rispettivamente il primo ed il secondo fattore della moltiplicazione vista in precedenza. Infatti, l’incremento demografico e l’ampliamento degli insediamenti umani comporta un aumento degli elementi a rischio (E) e il danno (D) risulta essere:

$$D = E \times V$$

Dove “V” indica il grado di perdita di un certo elemento o insiemi di elementi esposti a rischio, derivante dal verificarsi di un fenomeno naturale di assegnata intensità. Dipende sia dalla probabilità che l’elemento a rischio subisca un danno che dall’intensità del fenomeno franoso che procura il danno. Da ciò risulta chiaro come l’aumento di uno dei due fattori comporti un prodotto maggiore.

Invece i cambiamenti climatici influenzano il fattore “H”, cioè la pericolosità, infatti una concentrazione delle precipitazioni in un numero minore di eventi di maggiore intensità condiziona sia la probabilità di occorrenza (P) sia l’intensità (I) degli eventi franosi.

Come si può riscontrare nella Figura 9, un aumento di questi ultimi due fattori comporta una maggiore pericolosità (P).

		Probabilità di occorrenza				
		Tr <1	Tr 1÷30	Tr 30÷100	Tr 100÷500	Tr >500
Intensità (I)	Molto alta	H4	H4	H4	H3	H2
	Alta	H4	H4	H3	H2	H2
	Moderata	H4	H3	H2	H2	H1
	Bassa	H4	H3	H2	H1	H1
	Molto bassa	H4	H2	H2	H1	-

H1: Pericolosità bassa
 H2: Pericolosità moderata
 H3: Pericolosità alta
 H4: Pericolosità molto alta

Figura 9: Classi di Pericolosità, Tr rappresenta il tempo di ritorno ed è espresso in anni

Per comprendere meglio l’influenza dei cambiamenti climatici si potrebbero applicare delle serie temporali di precipitazioni “sintetiche”, ottenute tenendo in considerazione dei cambiamenti climatici e quindi andando ad aumentare la concentrazione delle precipitazioni in un numero minore di eventi di maggiore intensità, e verificare l’effetto di tali serie su casi studio. Una ricerca di questo genere è stata effettuata da Alviolia et al. (2018) ed i risultati ottenuti si possono osservare sull’articolo “Implications of climate change on landslide hazard in Central Italy”.

In questo articolo l'area indagata è situata in centro Italia, nella catena degli Appennini, in particolare lo studio ha analizzato una zona di 422 km² nel bacino del Tevere, luogo molto soggetto a frane.

Gli autori hanno evidenziato come nell'area studiata, secondo le loro analisi, le soglie per gli eventi futuri dipenderanno di più dalla pioggia cumulata rispetto alla durata. A causa della sempre maggiore concentrazione delle precipitazioni. Un altro interessante aspetto che hanno messo in mostra è il fatto che il rischio di frana (definito secondo Guzzetti et al., 2005) è destinato a cambiare nell'area di studio, proprio perché le soglie di precipitazioni per l'innescio di frane dovrebbero cambiare.

In generale, in Europa eventi meteorologici e climatici estremi (come ondate di calore, siccità e forti precipitazioni) sono il fattore scatenante più comune delle frane. Quelle superficiali sono per lo più innescate da eventi di precipitazioni pesanti e/o persistenti, mentre le frane profonde sono solo debolmente legate a eventi climatici o climatici estremi. Nella seguente immagine si possono notare le zone più suscettibili a frane indotte dal clima.

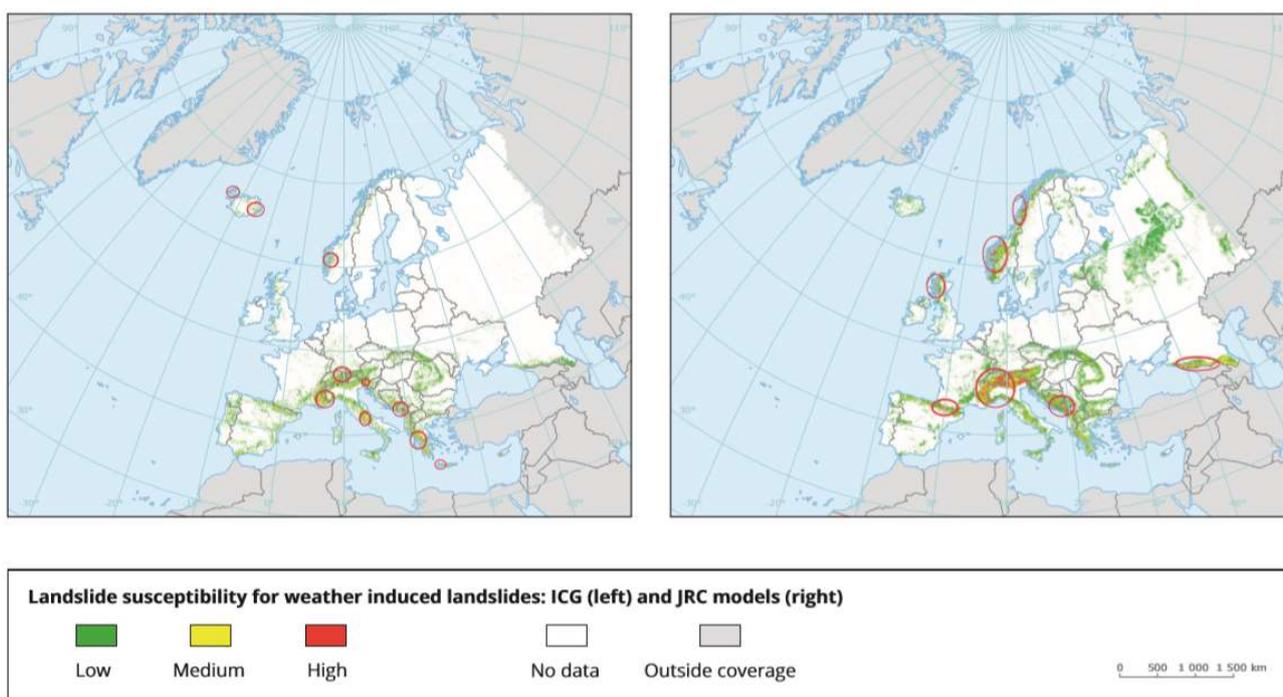


Figura 10: Landslide susceptibility for weather-induced landslides: International Centre for Geo-hazards (ICG) (left) and Joint Research Centre (JRC) (right) models. (EEA, 2017).

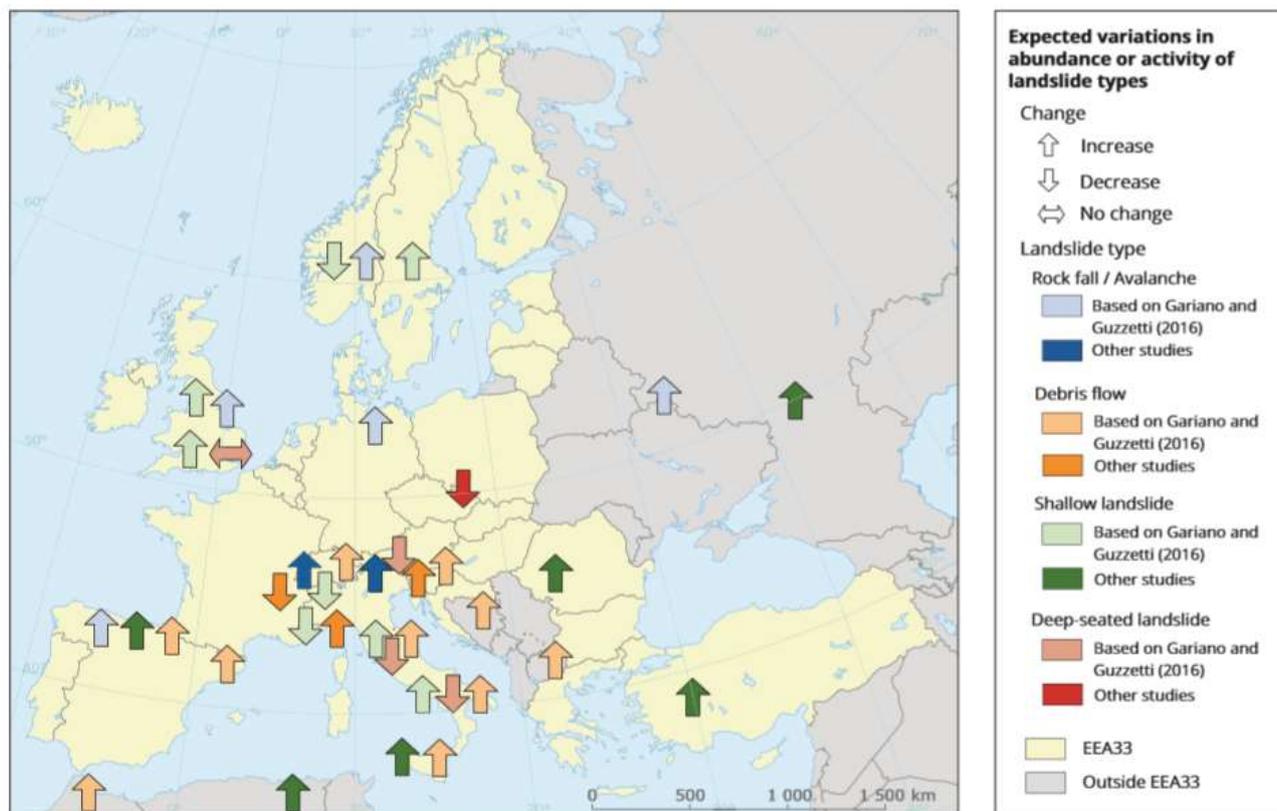
Si può notare come l'arco alpino, in particolare il Piemonte, sia una zona ad alta suscettibilità rispetto a questa problematica.

L'AR5 dell'IPCC (IPCC, 2013) ha valutato solo come verosimile la probabilità che cambiamenti nei principali trend climatici possono influenzare le frane. Questo principalmente perché significative tendenze passate e segnali attendibili per proiezioni future, in termini di occorrenza e magnitudo delle frane, non sono facili da rilevare. Ciò è dovuto in parte alla scarsa disponibilità di dati storici e in parte a causa della complessità dei processi fisici coinvolti: anomalie climatiche, condizioni climatiche che innescano frane, risposta idrologica dei pendii non lineare e geomeccanica.

Valutazioni esaustive dei cambiamenti nella frequenza e nell'ampiezza delle frane su scala nazionale devono anche tenere conto dei cambiamenti in demografia, pianificazione urbana, uso del suolo e copertura del suolo. È quindi difficile analizzare gli eventi solo sulla base dei dati climatici.

Diversi studi si sono concentrati sull'individuazione della relazione tra frequenza delle frane e precipitazioni eccezionali (Polemio e Petrucci, 2010; Polemio e Lonigro, 2014; Gariano et al., 2015).

Per le Alpi italiane del Piemonte, i cambiamenti nelle attività franose e nella distribuzione stagionale delle precipitazioni nel periodo 1960-2011 sono stati analizzati da Stoffel che ha scoperto che le attività franose sono aumentate durante la primavera, correlate all'aumento delle precipitazioni invernali, e in estate, legate principalmente alle condizioni aride in tali stagioni (Stoffel, 2013).



Note: Dark colours are projections from the literature based on different climate scenarios and light colours are projections from a study for the end of the 21st century, based on the RCP8.5 scenario (Gariano and Guzzetti, 2016).

Source: Adapted from Gariano and Guzzetti, 2016.

Figura 11: Expected variations in abundance or activity of four landslide types, driven by projected climate change. (EEA, 2017)

Bisogna dire che le relazioni tra gli impatti dei cambiamenti climatici e le attività franose sono ancora deboli e i collegamenti incerti.

2.6.1 Causalità cambiamenti climatici – Eventi franosi

I principali effetti dei cambiamenti climatici che influenzano la frequenza delle frane sono innanzitutto la concentrazione delle precipitazioni in un numero minore di eventi di maggiore intensità ed in seconda battuta l'aumento di temperatura ed il conseguente ritiro dei ghiacciai.

Il ritiro dei ghiacciai può essere collegato con l'innescò di frane in roccia, quali caduta massi, poiché l'arretramento del permafrost sulle montagne può rivelare nuovi siti potenzialmente attaccati dal rischio di frane. Inoltre, un altro effetto causato da questo fenomeno è la creazione di nuovi laghi che possono esondare e causare anch'essi frane, in questo caso principalmente colate a matrice fluida.

Un esempio di un lago formatosi a causa del ritiro dei ghiacciai è mostrato nella seguente immagine.



Figura 12.: Paragone ed evoluzione del ghiacciaio del Trift nel centro delle Alpi svizzere. (a) Foto del 1948 (photo: Gesellschaft für ökologische Forschung). (b) Foto del 2006. (Stoffel, 2012)

Come si può notare la Figura 12 è un bell'esempio di come il ritiro di un ghiacciaio abbia dato luogo alla formazione di un lago ed abbia rivelato pareti in roccia ripide e soggette a rischio caduta massi. Il lago stesso può essere causa di notevoli rischi in quanto a frane.

Invece gli eventi piovosi estremi possono essere direttamente correlati con l'innescò delle frane superficiali (Debris flow).

Se, oltre alla concentrazione delle precipitazioni, si aggiungono fenomeni di siccità, che possono influenzare il terreno rendendolo più arido e ostacolando così la crescita delle piante, è chiaro come l'innescò delle frane sarà più facile e quindi frequente.

“L'attuale comprensione suggerisce solo variazioni moderate nella frequenza complessiva degli eventi di flusso di detriti ad alta quota nel breve termine, ma nel lungo termine si prevede un aumento della portata complessiva dei flussi di detriti, a causa di una maggiore quantità di sedimento consegnato dai canali, dovuto ad eventi di precipitazione estrema.

Sopra 1500 m slm, la prevista diminuzione del manto nevoso e della sua durata in inverno e primavera probabilmente influenzerà la frequenza, il numero e la stagionalità delle attivazioni franose.

Nelle Alpi francesi e nella regione del Piemonte, è stato dimostrato che le frane nel 21° secolo si verificano più frequentemente all'inizio della primavera e tendono ad essere innescate da piogge moderate. Al contrario, e in linea con le recenti osservazioni, gli eventi in autunno, caratterizzati da una grande densità spaziale, potrebbero diventare sempre più scarsi.”

(M. Stoffel, D. Tiranti, C. Huggel, 2013)

Oltre al pericolo legato ad un incremento delle attività franose, a causa dei cambiamenti climatici potrebbe sorgere anche un problema legato alla stagionalità. Infatti, alcune frane si possono dire in un certo senso periodiche in quanto ogni anno dopo l'innalzamento delle temperature primaverili possono verificarsi tali eventi. Proprio il fatto che alcuni fenomeni siano attesi in determinate stagioni o periodi può essere alterato dai cambiamenti climatici e quindi l'evento può essere anticipato o posticipato. Anche questo aspetto va tenuto in considerazione valutando i trend e revisionandoli di anno in anno.

Le principali problematiche che si riscontrano quando si cercano di fare modelli predittivi per questo genere di eventi sono:

- pochi dati storici
- fenomeni complessi e difficili da simulare nel loro insieme
- dati reologici difficili da stimare, in particolare la legge di infiltrazione (nelle frane superficiali, quelle maggiormente influenzate dalle piogge, solitamente non sono presenti piezometri in quanto particolarmente danneggiabili)
- il comportamento del terreno sottoposto a eventi estremi può alterare il suo comportamento rendendo le previsioni ancora più complicate
- ritiro dei ghiacciai difficilmente simulabile come evento causale
- monitoraggio in alta montagna difficile

Da ciò si può comprendere come lo studio di nuove aree soggette a tale rischio risulti complicato dato che già l'analisi di casi studio è difficile, proprio per la quarta problematica elencata precedentemente: se il terreno in esame non è mai stato sottoposto a eventi di precipitazioni estreme è difficile stimare ed ipotizzare il suo comportamento in tale caso.

2.6.2 *Analisi temporale dell'instabilità di versante*

Questa tipologia di analisi intende collegare il fenomeno con la relativa informazione temporale. Un aspetto fondamentale è che la durata dell'analisi numerica non coincide con la durata del fenomeno reale perché si potrebbe analizzare in pochi secondi un fenomeno che dura giorni e analizzare in giorni un fenomeno che dura pochi secondi. La durata dell'analisi dipende dal livello di complessità del codice, dal computer, ecc.

A seguito della discordanza tra il tempo della simulazione e il tempo impiegato dal fenomeno per manifestarsi, l'analisi restituisce la simulazione di un meccanismo di rottura ma non si hanno indicazioni sul tempo necessario affinché il versante subisca tale processo deformativo.

Questo problema può essere colmato in più modi, ad esempio abbinando il modello agli spostamenti misurati da un inclinometro, che si sviluppano in un certo intervallo di tempo.

L'evoluzione dello spostamento può essere frutto di un processo interno (creep o rilassamento interno del versante) o di cause esterne ed è modellato numericamente, confrontando l'evoluzione degli spostamenti nel modello con quelli reali, non solo in termini di entità ma anche di evoluzione temporale.

Per fare questa operazione, occorre però un elemento di confronto, che è dato dalle misure reali. In questo modo, gli spostamenti del modello cominciano ad assumere un significato temporale e diventa possibile fare una previsione temporale di quando il pendio andrà a collasso (a meno che le condizioni non cambino). Diventa così fondamentale la previsione temporale: essa è la previsione di quando può avvenire una determinata frana in un determinato contesto spaziale.

La modalità con cui avviene la previsione temporale si lega alla definizione di pericolosità, che è la probabilità di occorrenza di un fenomeno potenzialmente instabile in una certa area e in un certo istante. Pertanto, la previsione temporale non definisce l'istante di tempo al quale si instabilizza il volume ma come probabilità di occorrenza P di un evento franoso di intensità I nell'intervallo di tempo di un anno. Da qui si può definire il periodo di ritorno T come:

$$T = \frac{1}{P}$$

L'intensità potrebbe essere espressa in termini di volume coinvolto nel fenomeno franoso. D'altra parte, sono più pericolosi fenomeni di piccole dimensioni e molto rapidi rispetto a fenomeni di grandi dimensioni e molto lenti. Pertanto, l'elemento volumetrico non è l'unico elemento distintivo ed è importante anche la velocità che incide sulla possibilità di fuga.

Dalla probabilità di occorrenza si definiscono la pericolosità e il rischio. Occorre tenere conto che fenomeni a uguale probabilità di occorrenza possono presentare un diverso grado di pericolosità.

Esistono due schemi di pericolosità:

- criterio di Del Prete , valido per fenomeni lenti:

$$H = P$$

- criterio di Fell, valido per diversi tipi di frana:

$$H = P \times I$$

Ai due criteri, si associa un sistema di classificazione della pericolosità di un fenomeno che si lega al periodo di ritorno. Chiaramente la classificazione può essere fatta solo una volta individuate le caratteristiche del fenomeno (lento o veloce). La valutazione delle possibilità di occorrenza avviene secondo due approcci:

- Approccio statistico
- Approccio meccanico

APPROCCIO STATISTICO

L'approccio statistico non considera la fisica del problema ed esegue una semplice analisi statistica su una serie storica. Da una parte si possono analizzare serie storiche relative agli effetti, ossia serie temporali su eventi franosi avvenuti in una zona.

In questo caso, il parametro chiave è la frequenza annua degli eventi franosi in un periodo di N anni, definito come rapporto tra il numero n eventi e il numero N di anni a disposizione.

$$F(n) = \frac{n}{N}$$

Se il numero N di anni monitorati è sufficientemente lungo si può confondere la frequenza annua con la probabilità di occorrenza. Da qui, seguendo la definizione di Del Prete si può calcolare la pericolosità di N anni.

$$H(N) = 1 - (1 - f)^N$$

Se il numero N è piccolo rispetto al periodo di tempo di ritorno T (eventi rari rispetto al numero di anni considerati) si perde l'informazione relativa al fenomeno, la pericolosità si calcola come prodotto tra numero di anni e probabilità di occorrenza:

$$H(N) = N \cdot f$$

D'altra parte, se non si dispone di uno storico delle frane si possono analizzare le serie storiche relative alle cause, ossia lo studio di fenomeni naturali come piogge o terremoti che sono documentati mediante misure in sito nel tempo.

Questa analisi non prevede la raccolta di informazioni dettagliate sul fenomeno franoso ma si monitorano solo le potenziali cause (piogge terremoti ecc.) in modo da stimare i tempi di ritorno dei movimenti.

Le principali cause di innesco del fenomeno franoso sono le seguenti:

- Precipitazioni;
- Attività sismica;
- Attività antropica;
- Erosione, dovuta ad esempio ad un corso d'acqua che scalza la parete, ma è una situazione locale e specifica.

Ci si focalizza sull'uso delle informazioni relative ai fenomeni più comuni cioè precipitazioni.

Per quanto riguarda l'analisi di serie storiche relative alle precipitazioni, il problema è la definizione delle soglie, ossia la quantità di pioggia necessaria per l'innesco del fenomeno.

La definizione si basa su modelli empirici che correlano i dissesti con le serie storiche delle precipitazioni.

Questi modelli si basano su fenomeni in cui è già avvenuto un innesco a causa della pioggia e non guarda la fisica del fenomeno ma solo i numeri. D'altra parte, nella scelta dei casi da mettere insieme per la definizione delle soglie occorre selezionare casi con caratteristiche simili.

Innanzitutto, si valuta la correlazione pioggia-spostamenti: si riporta la cumulata delle piogge misurate dal pluviometro e cumulata degli spostamenti e si confrontano, in modo da verificare la rispondenza tra pioggia e spostamenti.

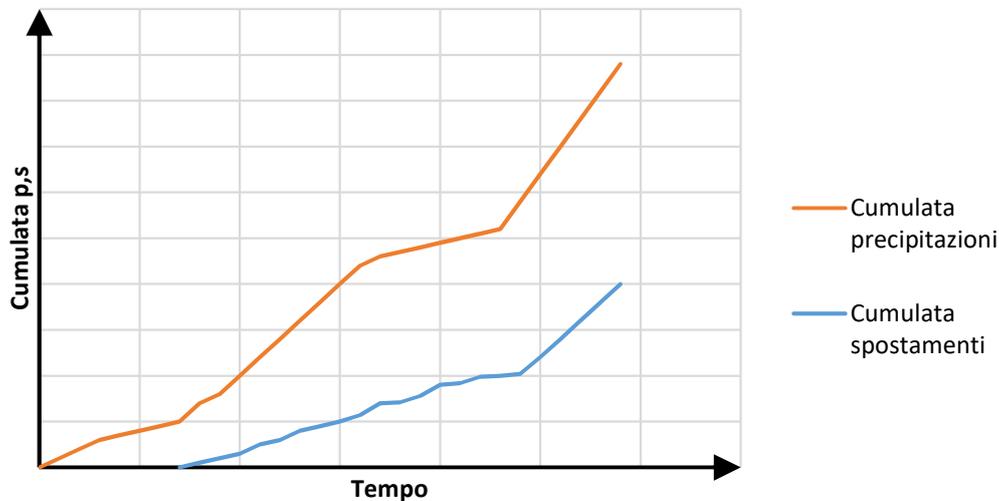


Figura 13: Verifica correlazione spostamenti-precipitazioni

Una volta verificata la rispondenza si valuta l'entità delle piogge che hanno causato l'innesco del fenomeno franoso. In questo modo, ad ogni fenomeno franoso si associa una pioggia avente una certa durata ed intensità.

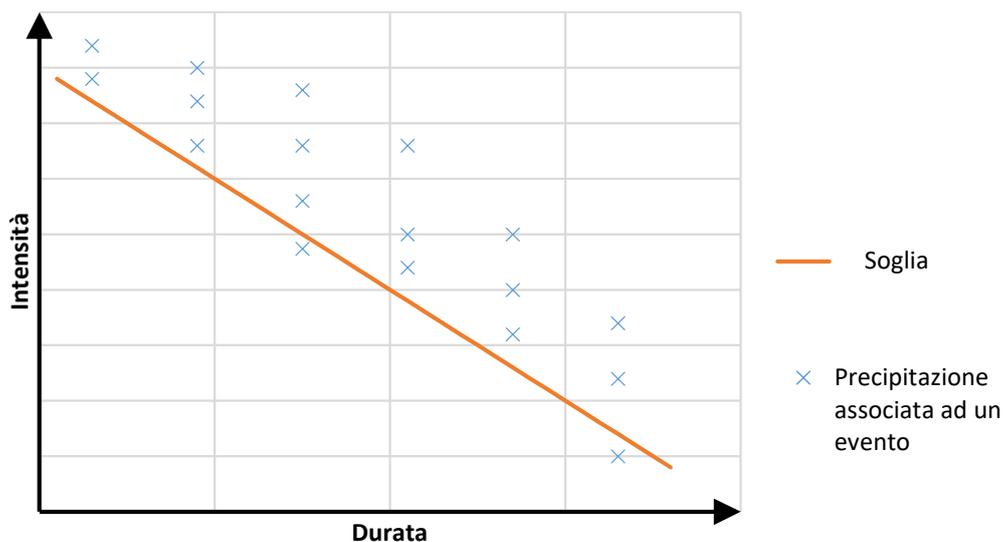


Figura 14: Grafico per la valutazione della soglia d'allerta

Nel grafico ogni punto rappresenta una coppia di intensità e durata della precipitazione associata ad un evento. La retta rappresenta, per quel fenomeno la soglia di precipitazione alla quale si dà l'allerta: essa è la soglia minima di pioggia alla quale è possibile l'inscasso del fenomeno franoso, è accettato che sotto tale soglia ci siano al più 5% del numero di eventi, soprattutto se questi avvengono con intensità bassissime e durate lunghissime.

Con il termine "soglia pluviometrica" si suole indicare un valore minimo o massimo di pioggia necessaria per innescare un processo naturale d'instabilità; quella "minima" è da considerare il livello inferiore al di sotto del quale il processo non s'innesci, quella "massima" rappresenta il livello oltre il quale il processo si manifesta sempre (Crozier, 1996).

La definizione della soglia è difficile soprattutto con pochi eventi, in quanto questa è un'analisi numerica che non tiene conto della fisica dell'evento. Del resto, l'analisi è significativa quando tiene conto di fenomeni simili e concentrati su poche aree (aree diverse hanno materiali diversi e comportamento rispetto alle piogge diverso). Pertanto, questa è un'analisi molto locale. La definizione della soglia si lega al livello d'allerta ed al suo scopo, ad esempio evacuazione.

APPROCCIO MECCANICO

L'approccio meccanico considera la fisica del fenomeno e prevede di introdurre un modello afflussi-deflussi, le caratteristiche geotecniche e la risposta piezometrica e di fare un'analisi meccanica del versante. (Pirulli, 2019)

In riferimento alle piogge, si esegue un'analisi numerica sul sito per valutare l'entità di pioggia che può portare a collasso.

Nell'analisi, dato un pendio che presenta un certo livello di falda, si introduce un evento di precipitazione che modifica il livello di falda $u(t)$ variabile nel tempo.

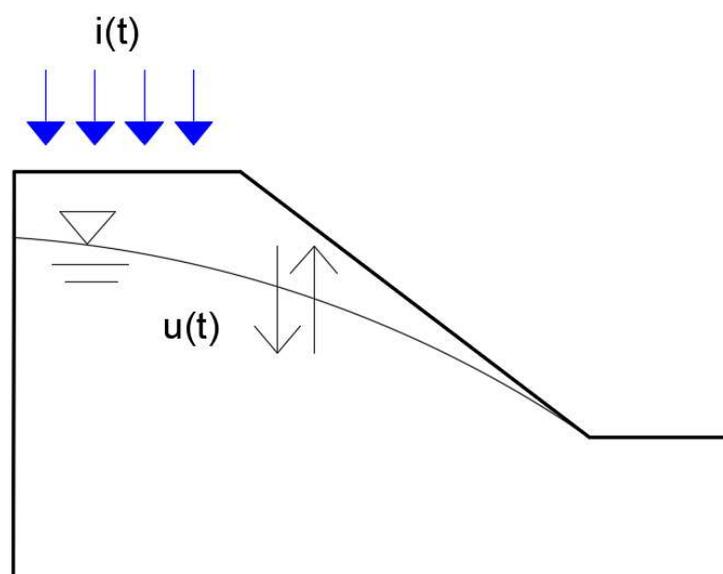


Figura 15: Modello di interazione falda-precipitazione

È necessario definire un modello di infiltrazione, che definisce la risposta del livello di falda e si lega alla permeabilità del versante.

Il modello di infiltrazione si ottiene accoppiando i dati pluviometrici ed i dati piezometrici. In questo, occorre tenere conto che l'infiltrazione di precipitazione varia molto localmente e il dato spaziale è molto importante. Ad esempio, sovente lo strumento piezometrico è collocato a valle mentre il fenomeno può svilupparsi in quota, con minore intensità a valle, falsando così il dato (Pirulli, 2019). In seguito, si esegue l'analisi della possibile instabilità e occorre definire un modello meccanico.

1. Se si adotta l'analisi del continuo, la variazione del livello di falda induce uno spostamento $\delta(t)$ del modello numerico. A un certo punto, esiste una posizione di falda critica che induce uno spostamento δ infinito, che corrisponde alla condizione di collasso.

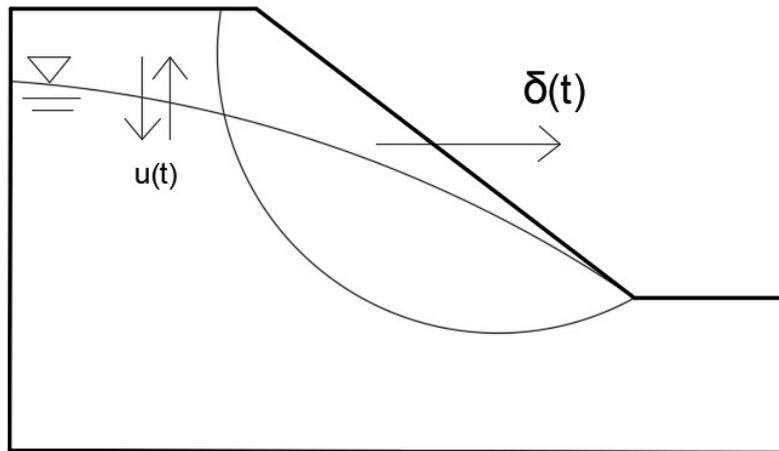


Figura 16: Modello di interazione falda-spostamento

2. Con l'analisi all'equilibrio limite o con un'analisi SR (strength reduction) la falda rientra nell'analisi dell'equilibrio e nel calcolo del fattore di sicurezza o del SRF (strength reduction factor), il livello di falda quindi induce una progressiva variazione del fattore di sicurezza o del SRF fino alla condizione critica.
3. Il livello di falda critico è indotto da un certo livello di pioggia, questo approccio prevede così di individuare un modello di infiltrazione che è usato per determinare la pioggia che da luogo all'innalzamento critico del livello di falda.
4. Da qui si valuta il periodo di ritorno semplicemente guardando nei dati pluviometrici ogni quanto tempo si prevede l'evento di pioggia critica.

2.6.3 Influenza dei cambiamenti climatici sulla previsione temporale

Lo studio di SCIA per l'Italia identifica “un elemento forse significativo, che si può cogliere dalla serie del Centro Italia, è rappresentato dalla sequenza di anomalie positive degli indici R95p e SDII negli ultimi anni, che vanno nella direzione di una concentrazione delle precipitazioni in un numero minore di eventi di maggiore intensità” (SCIA, 2017), questo potrebbe essere un primo segnale di un trend che in futuro si espanderà sempre di più.

Applicando questa concentrazione delle precipitazioni alla previsione temporale dei movimenti di versante, in particolare all'approccio relativo alle cause illustrato nel paragrafo 2.6.2, si può notare come nell'approccio che cerca di definire la soglia di allerta andranno a concorrere a questa formulazione eventi con intensità sempre più alta e durata sempre più bassa, Figura 17.

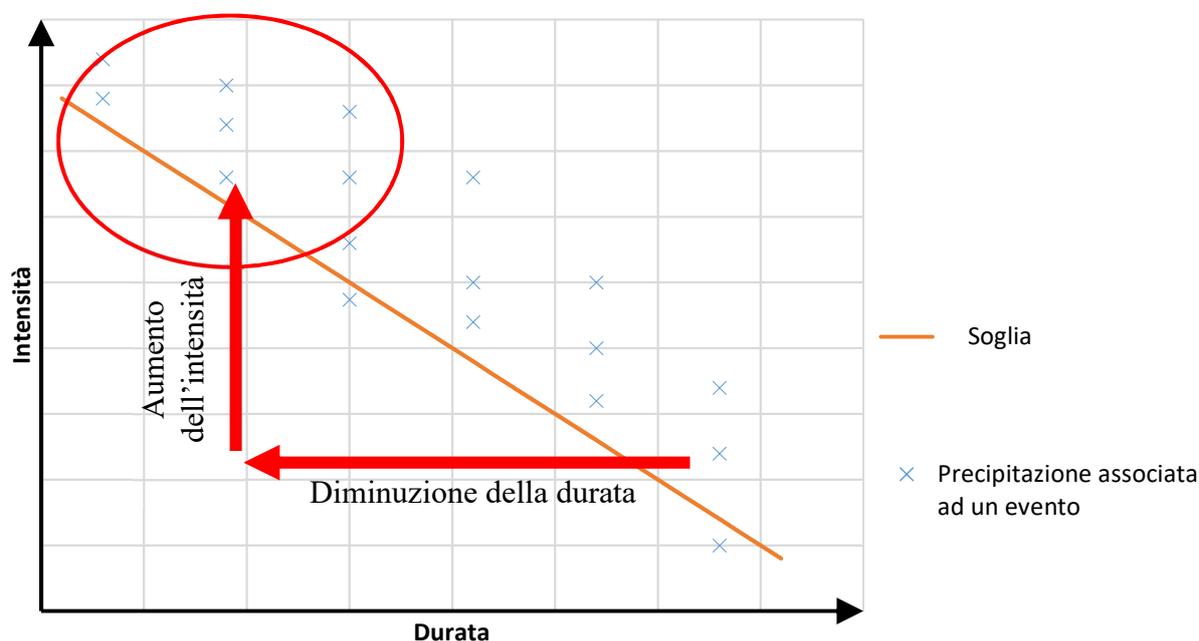


Figura 17: Grafico per la valutazione della soglia d'allerta e influenza dei cambiamenti climatici

Oltre al rapporto sviluppato da SCIA, è bene considerare anche lo studio sull'influenza dei cambiamenti climatici sulle frane nell'Europa meridionale effettuato da Tang et al., infatti esso afferma che per tale zona “l'aumento di temperatura previsto è maggiore della media europea e si prevede che le precipitazioni annuali siano inferiori. Ciò suggerisce che è prevedibile una riduzione del contenuto medio di acqua nel suolo e del livello della falda freatica. Ma, qualsiasi vantaggio ottenuto dalla riduzione delle pressioni dell'acqua interstiziale deve essere bilanciato dallo sviluppo di desiccation cracking (cracking da siccità) e dallo sviluppo di percorsi preferenziali di infiltrazione che consentano la rapida generazione di alte pressioni dell'acqua interstiziale durante eventi di estreme precipitazioni estive. Di conseguenza, rimane il rischio di frane indotte dalla pioggia; tuttavia, gli eventi saranno meno frequenti ma potenzialmente più grandi.” (Tang et al., 2017)

Bisogna quindi dire che date queste numerose variabilità nell'iterazione tra terreno e cambiamenti climatici potrebbe risultare migliore un approccio meccanico che non prescindere dalla fisica del problema e grazie al quale si può tenere conto della variabilità del clima. Ad esempio, si potrebbero

andare a creare delle serie “sintetiche” di precipitazione che tengono in conto dei cambiamenti climatici ed applicarle al modello meccanico.

Infatti, se si cerca di definire statisticamente la soglia di allerta, utilizzando i dati del passato, questa soglia potrebbe risultare definita ad esempio da un gran numero di eventi con grande durata e bassa intensità, parte destra del grafico, ma la concentrazione delle precipitazioni tende a spostarsi verso la parte sinistra del grafico e quindi si rischierebbe di utilizzare una soglia poco significativa.

Tutte queste considerazioni si basano sull'ipotesi che le proprietà del materiale, in particolare la legge di infiltrazione, non cambino per effetto dei cambiamenti climatici ma ciò non è sicuro in quanto proprio l'erosione e la desertificazione dovuta da questi ultimi potrebbero comportare un peggioramento delle caratteristiche meccaniche dei terreni.

2.7 SINTESI

In questo capitolo sono stati introdotti i cambiamenti climatici, contestualizzando le cause con il relativo periodo storico, partendo dalla rivoluzione industriale, ed inquadrando l'impronta dell'uomo, in particolare nelle emissioni di anidride carbonica. Inoltre, sono stati presi in considerazione i principali effetti dei cambiamenti climatici sull'ambiente e le possibili reazioni atte a ridurre o gestire i rischi ad esse collegati: mitigazione e adattamento. Infatti, oggi è riconosciuto un aumento globale della temperatura media attorno ai 1,5°C e 2°C rispetto ai valori preindustriali. Si è cercato anche di dare un inquadramento sulle politiche europee atte in questa direzione, facendo riferimento ad accordi e leggi, tra cui l'accordo di Parigi e quello del 20-20-20.

La seconda parte si è concentrata in maniera più peculiare sul territorio italiano, valutando le particolari vulnerabilità (risorse idriche, livello del mare e eventi estremi) e le specifiche strategie in risposta alle possibili problematiche. È stato inoltre analizzato il caso speciale dell'area Alpina, "sentinella" dei cambiamenti climatici a causa della maggiore sensibilità a quest'ultimo fenomeno.

Al fine delle analisi che saranno effettuate sono stati ricercati in letteratura i principali parametri studiati sia a livello globale (es. CSI della EEA) che nazionale (individuati da SCIA) con particolare attenzione a quelli relativi a temperatura e precipitazioni. Per dare un'idea del fenomeno basti pensare che SCIA prevede un aumento di 0,36°C ogni 10 anni della temperatura media in Italia e che per le precipitazioni fa notare come si inizi a vedere un segnale di un numero minore di eventi di maggiore intensità per il centro Italia, trend che in futuro potrebbe sempre più espandersi.

Infine, si è introdotto il rischio di instabilità di versante valutando i possibili effetti dei cambiamenti climatici su di esso. Nonostante la scarsa disponibilità di dati storici, alcune ricerche (Stoeffel, 2013) hanno scoperto che le attività franose sono aumentate durante la primavera, correlate all'aumento delle precipitazioni invernali, e in estate, legate principalmente alle condizioni aride in tali stagioni. Sono stati anche introdotti due approcci (meccanico e statistico) che possono essere utilizzati per stimare l'influenza dei cambiamenti climatici sull'instabilità di versante, correlando la variazione delle precipitazioni con la risposta della falda e la condizione di equilibrio. Con questi metodi è possibile la costruzione di soglie di allerta su cui la concentrazione degli eventi piovosi comporta in una traslazione degli eventi scatenanti verso intensità maggiori e durate minori.

3 RISPOSTA DELLA FALDA ALLE PRECIPITAZIONI

3.1 PREMESSA – CAUSE DELLA VARIAZIONE DELLA FALDA

La profondità della falda acquifera cambia per molte ragioni. Alcune variazioni sono dovute a fenomeni naturali, altre sono causate dalle attività dell'uomo. Un'altra differenza molto importante è che alcune falde acquifere sono relativamente poco profonde in quanto influenzate dalle attività di superficie, mentre altre sono più profonde e ben isolate dalle influenze superficiali o appena sottostanti. Anche la stratigrafia ha un ruolo importante infatti alcuni acquiferi sono costituiti da unità rocciose “bedrock” mentre altri sono composti da materiali non consolidati.

Tutti questi fattori possono influenzare il modo in cui i livelli dell'acqua nelle falde acquifere cambiano nel tempo. Le variazioni del livello dell'acqua possono essere suddivise in diverse categorie, ci sono cambiamenti a breve termine che possono essere visti solo quando le misurazioni del livello dell'acqua vengono eseguite più volte al giorno e ci sono cambiamenti a lungo termine che possono essere visti solo dopo che i dati sono stati raccolti per molti anni. Anche la magnitudo della variazione può variare notevolmente.

“Le fluttuazioni in un acquifero non confinato sono generalmente dovute a tre principali fattori:

- 1) Evapotraspirazione (precipitazioni);
- 2) variazioni della pressione atmosferica;
- 3) aria intrappolata.

Vi sono inoltre altre cause meccaniche meno frequenti o facilmente identificabili quali: gelo-disgelo, densità dell'aria, solubilità di aria, pompaggio artificiale di pozzi per indurre cambiamenti nella superficie dell'acqua, maree (se l'acquifero è vicino ad un oceano).” (Richard W. Healy et al., 2002)

Molte delle cause dei cambiamenti del livello dell'acqua possono essere facilmente riconosciute semplicemente dalla forma dell'idrogramma. Altri cambiamenti sono più sottili e le loro cause non immediatamente riconoscibili.

3.2 METODI PER STIMARE LA RICARICA DELLA FALDA ACQUIFERA

Risulta grande e molto variegato il numero di metodi disponibili in letteratura per la stima della ricarica naturale e artificiale della falda acquifera, la cui selezione dipende dai dati disponibili, dalle condizioni geografiche e topografiche locali, dalla scala spaziale e temporale richiesta e dall'affidabilità dei risultati ottenuti con metodi diversi. A causa delle incertezze implicate in ciascun approccio, si suggerisce di utilizzare più tecniche per aumentare l'affidabilità dei risultati. (Scanlon et al. 2002)

Di seguito vengono riportati i principali metodi con una breve descrizione.

Bilancio idrogeologico

Gli afflussi e i deflussi delle acque superficiali possono essere stimati utilizzando l'equazione di bilancio delle acque in base ai dati di misurazione del flusso Lerner et al. (1990), Lerner (1997) e Rushton (1997) che forniscono descrizioni dettagliate di questo approccio. La legge di bilancio è descritta come:

$$R = Q_{up} - Q_{down} + \sum Q_{in} - \sum Q_{out} - E_a - \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (\text{Lerner 1997})$$

Dove R è la velocità di ricarica, Q la portata, Q_{up} e Q_{down} sono flussi alle estremità superiore e inferiore delle acque, Q_{in} e Q_{out} sono afflussi e deflussi, E è l'evaporazione dalle acque superficiali o dell'estremità inferiore e ΔS è la variazione di immagazzinamento di acqua della zona analizzata al variare del tempo (Δt).

Una rappresentazione schematica della formula precedente può essere osservata in Figura 18.

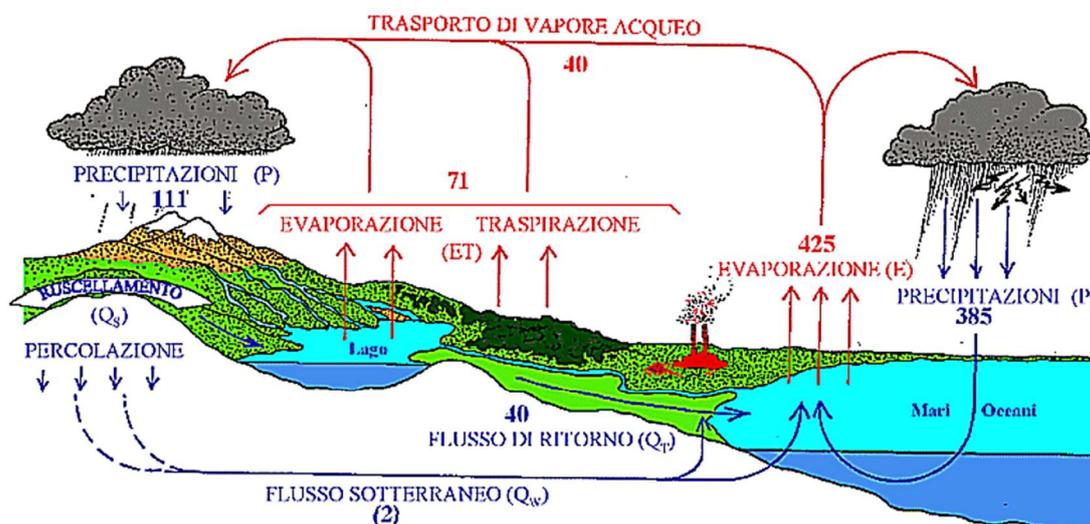


Figura 18: Ciclo globale dell'acqua, (Materazzi, 2010)

La perdita di carico finale si riferisce alla perdita di flusso tra stazioni di misura a monte e a valle. Questa perdita riflette una potenziale ricarica che può comportare una sovrastima della ricarica effettiva a causa dell'immagazzinamento e della successiva evapotraspirazione (Lerner et al. 1990).

Tuttavia, la maggiore limitazione di questo approccio è l'accuratezza della ricarica, infatti le stime dipendono dalla precisione con cui gli altri componenti dell'equazione del bilancio idrico vengono misurati (Scanlon et al., 2002).

Zero-flux plane

Il bilancio idrogeologico può essere semplificato equiparando la ricarica ai cambiamenti nello stoccaggio suolo-acqua sotto il piano zeroflux (ZFP), che rappresenta il piano in cui il gradiente idraulico verticale è pari a zero. Lo ZFP separa il movimento dell'acqua verso l'alto (ET) dal movimento verso il basso (drenaggio). Si presume che il tasso di variazione del termine di immagazzinamento tra misurazioni successive sia uguale alla velocità di drenaggio alla falda o alla velocità di ricarica. Lo ZFP richiede misurazioni del tenore d'acqua del suolo per localizzare la posizione del piano ZFP e del contenuto di acqua immagazzinata per stimare i cambiamenti di immagazzinamento. Il metodo ZFP, descritto per la prima volta in Richards et al. (1956), è stato utilizzato in vari studi (Royer e Vachaud 1974; Wellings 1984; Dreiss e Anderson 1985; Healy et al. 1989). La tecnica ZFP è relativamente onerosa in termini di strumentazione richiesta e quantità di dati raccolti. (Scanlon et al., 2002).

Legge di Darcy

La legge di Darcy viene utilizzata per calcolare la ricarica (R) nelle zone non sature secondo la seguente equazione:

$$\begin{aligned} R &= -K(\theta) \frac{dH}{dz} = -K(\theta) \frac{d}{dz} (h + z) \\ &= -K(\theta) \left(\frac{dh}{dz} + 1 \right) \end{aligned}$$

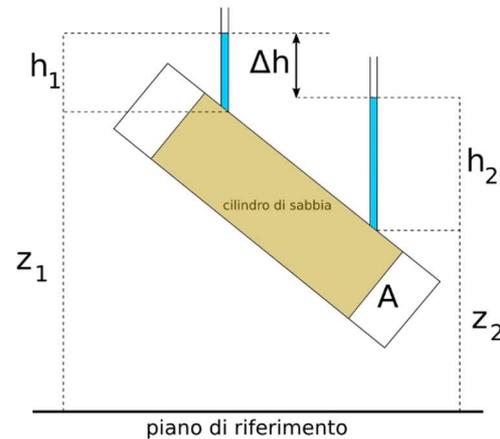


Figura 19: Cilindro di sabbia attraversato da acqua utilizzato nella dimostrazione della legge di Darcy, fonte: Wikipedia

dove $K(\theta)$ è la conduttività idraulica del contenuto d'acqua θ nell'ambiente; H è il carico totale; h , come si può vedere in Figura 19, è l'altezza di pressione delle due colonne d'acqua entro pozzi perforati fino alla base, che è impermeabile, lungo le due sezioni considerate della falda; z è l'elevazione. L'applicazione della legge di Darcy richiede misurazioni o stime del gradiente del carico totale verticale e della conduttività idraulica non satura. Il metodo è stato applicato in molti studi in condizioni secche e semiaride (Enfield et al. 1973; Sammis et al. 1982; Stephens e Knowlton 1986) e anche in condizioni umide (Ahuja e El-Swaify 1979; Steenhuis et al. 1985; Kengni et al. 1994; Normand et al. 1997). Per zone spesse e non sature, al di sotto della zona delle fluttuazioni correlate al clima, in mezzi porosi uniformi o densamente stratificati, il gradiente di pressione matriciale è spesso quasi zero e il movimento dell'acqua è essenzialmente guidato dalla gravità. In queste condizioni, si ottiene un piccolo errore ipotizzando che il gradiente del carico totale è uguale a 1 (presupposto del gradiente unitario) (Gardner 1964; Childs 1969; Chong et al. 1981; Sisson 1987). L'assunzione del gradiente unitario elimina la necessità di misurare il gradiente di pressione matriciale e consente di ricavare la ricarica della falda uguagliandola alla conduttività idraulica del contenuto d'acqua. Il presupposto del gradiente unitario è stato utilizzato in molti studi (Sammis et al. 1982; Stephens e Knowlton 1986; Healy and Mills 1991; Nimmo et al. 1994). Il metodo risulta essere più appropriato per falde profonde. (Scanlon et al. 2002)

Tecniche che studiano tracciatori

Recentemente, le tecniche che prevedono l'utilizzo di traccianti come il calore o l'isotopia chimica stanno acquisendo molta importanza nella stima di ricarica delle acque sotterranee. (Khan et al., 2016)

Traccianti chimici o isotopici vengono applicati sulla superficie del suolo o ad una certa profondità all'interno di esso per stimare la ricarica. L'infiltrazione naturale delle precipitazioni o quella artificiale dell'irrigazione trasportano il tracciante in profondità. Traccianti comunemente usati includono bromuro, ³H e coloranti visibili (Athavale e Rangarajan 1988; Kung 1990; Flury et al. 1994; Aeby 1998; Forrer et al. 1999).

In alternativa traccianti naturali come il cloruro (Cl), che viene prodotto naturalmente nell'atmosfera terrestre, vengono utilizzati per stimare i tassi di ricarica (Allison e Hughes 1978; Scanlon 1991, 2000; Phillips 1994). Questo metodo si basa sulla stima della concentrazione di tale elemento all'interno ed all'esterno del sistema.

Un'altra possibilità è quella di utilizzare isotopi stabili di ossigeno e idrogeno che vengono usati per identificare la ricarica delle acque sotterranee da laghi e fiumi. Nelle regioni in cui i fiumi hanno sorgenti ad alta quota (in zone montuose), l'acqua del fiume è spesso impoverita di isotopi stabili rispetto ai bacini adiacenti. Se i fiumi conservano la firma isotopica della sorgente, le differenze nelle firme di isotopiche di fiumi e precipitazioni locali possono essere utilizzate per determinare il contributo relativo di queste due fonti di ricarica delle acque sotterranee.

Metodi numerici

La modellazione della zona non satura viene utilizzata per stimare il drenaggio profondo o determinare la ricarica in risposta alla forzante meteorologica. I progressi della tecnologia informatica e dei codici di calcolo hanno reso più fattibili le simulazioni a lungo termine della ricarica. Una varietà di approcci viene utilizzata per simulare il flusso non saturo, compresi gli approcci con percorsi preferenziali (bucket model; Flint et al. 2002, this volume; Walker et al. 2002, this volume), approcci quasi analitici (Kim et al 1996; Simmons e Meyer 2000) e soluzioni numeriche dell'equazione di Richards. Esempi di codici che usano l'equazione di Richards includono BREATH (Stothoff 1995), HYDRUS-1D, HYDRUS-2D (Simunek et al. 1996), SWIM (Ross 1990), VS2DT (Lappala et al. 1987; Hsieh et al. 2000) e UNSATH (Fayer 2000).

Relazioni empiriche

Partendo da analisi statistiche possono essere messi in relazione i fattori di ricarica della falda e le precipitazioni. Queste relazioni empiriche sono locali e legate allo studio degli andamenti stagionali delle acque sotterranee. Un esempio di questo metodo è stato proposto da Kumar e Seethapathi (2000) che fecero uno di questi tentativi per la zona del Canale dell'Alto Gange. Quest'ultimo suggerì la seguente relazione tra pioggia e ricarica:

$$R = 0,63 (P - 15,28)^{0,76}$$

Dove R è la ricarica e P la precipitazione.

Metodo Water-table fluctuation

Il metodo delle fluttuazioni delle falde acquifere (WTF) si basa sul presupposto che le variazioni dei livelli delle falde negli acquiferi non confinati siano dovute alla ricarica. La ricarica è stata definita come "il quantitativo di acqua entrante nella zona satura, resa disponibile alla falda freatica, insieme al flusso associato lontano dalla falda freatica ma all'interno della zona satura" (Freeze and Cherry 1979). Essa, in questo metodo, è calcolata come:

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

dove S_y è lo specific yield, h è l'altezza della falda freatica e t è il tempo.

È importante specificare che il Δh rappresenta la differenza tra il picco della zona crescente e il punto allo stesso tempo sul prolungamento della curva decrescente antecedente all'inizio dell'innalzamento, per una maggiore chiarezza osservare Figura 20.

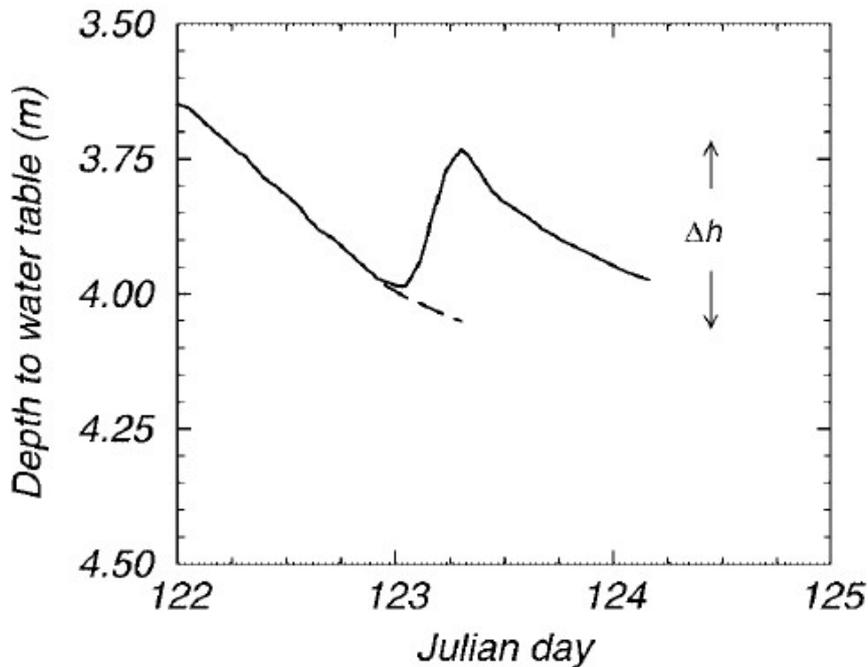


Figura 20: Ipotetico aumento del livello dell'acqua in risposta alle piogge. Rappresentazione del Δh . Fonte Healy et al., 2002

Il metodo WTF è stato utilizzato in vari studi (Meinzer e Stearns 1929; Rasmussen e Andreasen 1959; Gerhart 1986; Hall and Risser 1993) ed è descritto in dettaglio da Healy and Cook (2002).

L'ipotesi alla base del metodo è che l'incremento della falda nell'acquifero non confinato sia dovuto al fenomeno della "ricarica". Inoltre, viene anche considerato che l'acqua che arriva alla falda si trasformi immediatamente in storage e che gli altri termini della seguente equazione siano nulli.

$$R = \Delta S^{gw} + \cancel{Q^{bf}} + \cancel{ET^{gw}} + \cancel{Q_{off}^{gw}} - \cancel{Q_{on}^{gw}}$$

Dove R è la ricarica, ΔS^{gw} rappresenta il cambiamento nell'immagazzinamento di acqua da parte del terreno (storage), Q^{bf} è il deflusso alla base, ET^{gw} è il termine legato all'evapotraspirazione del terreno è Q_{off}^{gw} e Q_{on}^{gw} sono i flussi entranti e uscenti nell'area di studio.

Le limitazioni più importanti sono:

- “Questa procedura è migliore se applicata a falde superficiali che mostrano repentine variazioni. Le falde acquifere profonde potrebbero non presentare aumenti netti poiché i fronti bagnanti tendono a disperdersi su lunghe distanze;
- In genere, i tassi di ricarica variano sostanzialmente all'interno di un bacino, a causa delle differenze di elevazione, geologia, pendenza, vegetazione e altri fattori. Quindi i piezometri devono essere posizionati in modo tale che il monitoraggio sia rappresentativo dell'intero bacino;
- Il metodo non può rappresentare un tasso costante di ricarica. Ad esempio, se il tasso di ricarica fosse costante e uguale al tasso di drenaggio lontano dalla falda, i livelli dell'acqua non cambierebbero e il metodo WTF non prevederebbe alcuna ricarica.
- Altre difficoltà riguardano l'identificazione della causa delle fluttuazioni del livello della falda e il calcolo di un valore per lo specific yield.”

(Healy et al., 2002)

“Lo specific yield di una roccia o di un terreno, rispetto all'acqua, è il rapporto tra il volume di acqua che esso/a tratterrà per gravità, dopo essere stato saturato, e il suo volume” (Meinzer 1923)

Ma in genere nella pratica viene calcolato con la seguente formula:

$$S_y = \emptyset - S_r$$

dove \emptyset rappresenta la porosità del materiale e S_r è il volume di acqua che il terreno o la roccia trattiene per unità di volume del terreno o della roccia stessa.

In Tabella 8 sono riportati dei valori caratteristici per i principali tipi di materiale.

Tabella 8: Valori statistici dello specific yield calcolati su 17 casi studio da Johnson (1967), Fonte Healy et al., 2002

Texture	Average specific yield	Coefficient of variation (%)	Minimum specific yield	Maximum specific yield	Number of determinations
Clay	0.02	59	0.0	0.05	15
Silt	0.08	60	0.03	0.19	16
Sandy clay	0.07	44	0.03	0.12	12
Fine sand	0.21	32	0.10	0.28	17
Medium sand	0.26	18	0.15	0.32	17
Coarse sand	0.27	18	0.20	0.35	17
Gravelly sand	0.25	21	0.20	0.35	15
Fine gravel	0.25	18	0.21	0.35	17
Medium gravel	0.23	14	0.13	0.26	14
Coarse gravel	0.22	20	0.12	0.26	13

Questo parametro può essere calcolato in maniera indiretta con prove di laboratorio che determinano la porosità e S_r oppure con prove in sito come ad esempio la Draw-down-versus-time o prove geofisiche.

“Il metodo WTF viene applicato al meglio per aumenti del livello della falda a breve termine che si verificano in risposta a singoli temporali”. (Healy et al., 2002)

“Questo approccio è una grossolana semplificazione di un fenomeno molto complesso, vale a dire il movimento dell'acqua da e verso la falda freatica. Gli aspetti favorevoli del metodo WTF includono la sua semplicità e facilità d'uso: può essere applicato per qualsiasi piezometro che tocca la falda freatica con un'abbondanza di dati disponibili sul livello dell'acqua. Il metodo non richiede ipotesi sui meccanismi per il movimento dell'acqua attraverso la zona insatura; quindi, la presenza di percorsi di flusso preferenziali non ne limita l'utilizzo. I tassi di ricarica calcolati con il metodo WTF sono valori che possono essere integrati su aree di diverse centinaia di metri quadrati o migliaia di metri quadrati. Questo è un netto vantaggio rispetto agli approcci di misurazione puntuale, come i metodi che si basano su misurazioni all'interno della zona insatura.” (Healy et al., 2002)

3.3 LEGGE DI INFILTRAZIONE

L'infiltrazione è uno dei principali processi che determinano la ricarica della falda acquifera. In questo processo parte dell'acqua presente sulla superficie del terreno, sotto sia la spinta della forza di gravità sia per la capillarità, penetra al suo interno. La restante parte invece viene persa per ruscellamento o evapotraspirazione. Da un punto di vista matematico si può scrivere che:

$$i = i_N + f$$

dove "i" rappresenta la pioggia totale mentre "i_N" la pioggia netta, cioè l'acqua che va a costituire il deflusso superficiale che scorrerà verso la rete idrografica secondo le linee di massima pendenza del terreno, ed infine "f" rappresenta la precipitazione infiltrata. Uno schema grafico è presente in Figura 21.

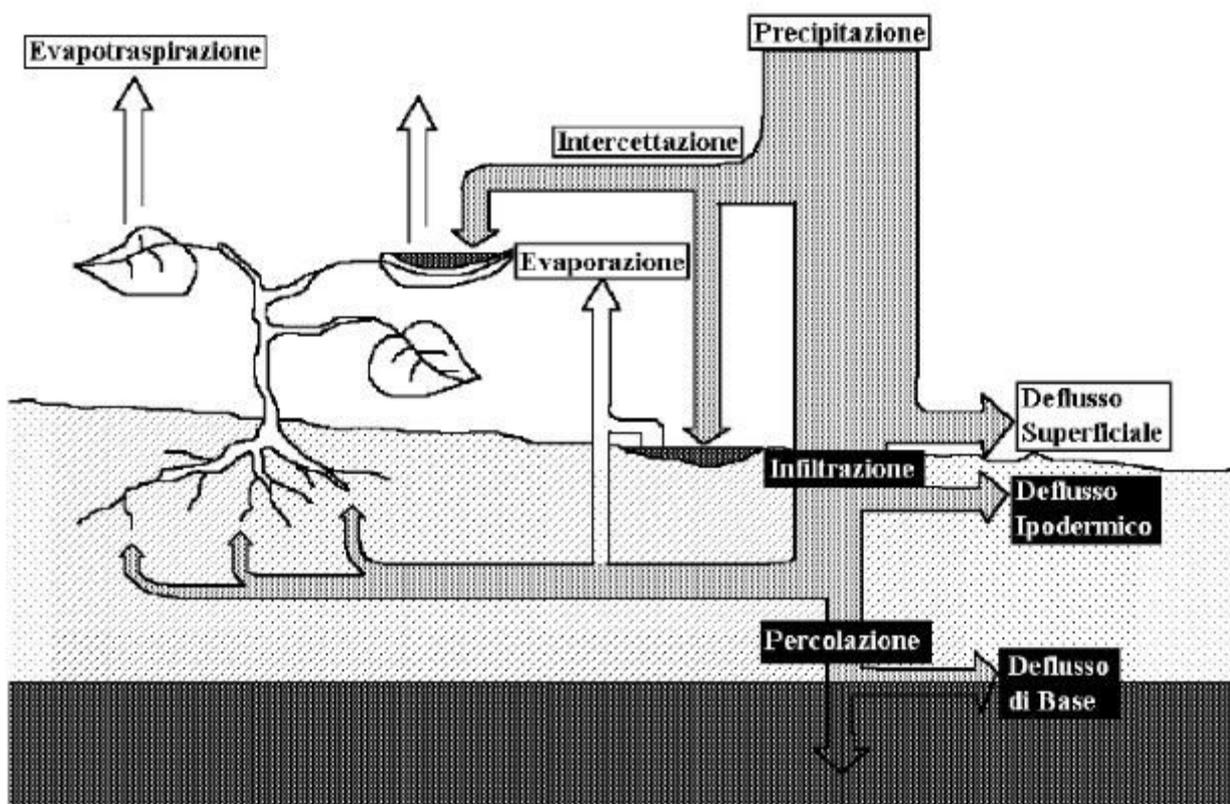


Figura 21: Schema del bilancio idrologico per una porzione elementare di bacino, Fonte Musolino, 2015

La modellazione del processo di trasformazione viene tipicamente utilizzata per la ricostruzione e la previsione di idrogrammi di piena, in una sezione di un bacino imbrifero, a partire dalla distribuzione spazio-temporale delle piogge insistenti sul bacino.

La trasformazione da pioggia al suolo a portata nella sezione di chiusura avviene secondo una successione di processi. In particolare, l'ingresso principale al modello sarà costituito da una serie di misure di pioggia, di tipo puntuale con registrazioni pluviometriche o distribuite con radar

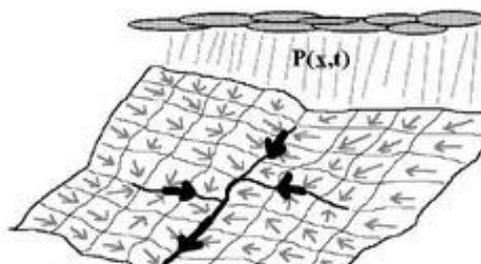


Figura 22: Schema concettuale di trasferimento da precipitazioni distribuite nello spazio e nel tempo ad idrogramma di piena nella sezione di chiusura di un bacino, Fonte Musolino, 2015

meteorologico, che dovranno essere in generale interpolate in modo da ottenere l'andamento delle precipitazioni totali al suolo nello spazio e nel tempo in termini di afflussi. Successivamente in tale processo si applicherà la legge di infiltrazione per determinare la pioggia netta. Infine, la trasformazione si concluderà con la concentrazione dei deflussi superficiali nel reticolo idrografico sino alla sezione di chiusura dove verrà rappresentata l'onda di piena.

I principali metodi empirici per stimare la pioggia netta o l'infiltrazione sono:

- Metodo percentuale
- Metodo soglia
- Curve Number
- Metodo Horton

I primi due sono più semplici ma meno rappresentativi del fenomeno fisico mentre gli ultimi due sono più complessi e con una maggiore radice fisica. Da un punto di vista matematico i primi due hanno un solo parametro per calibrare il modello mentre gli altri due hanno più parametri, anche se il Curve Number con opportune semplificazioni può essere ricondotto ad un modello con un solo parametro. I metodi dovranno essere tarati in base alla natura del suolo, al tipo di copertura vegetale ed alle condizioni di umidità del suolo antecedenti la precipitazione. Oltre a questi esistono oggi metodi numerici che si basano sulla soluzione numerica dell'equazione di Richards che rappresenta il movimento dell'acqua in terreni insaturi ed è attribuita a Lorenzo A. Richards che pubblicò l'equazione nel 1931. Essa è un'equazione differenziale alle derivate parziali con coefficienti molto non lineari.

Metodo percentuale

Questo procedimento prevede di calcolare l'intensità di pioggia netta come un tasso di quella totale.

$$i_N(t) = C \cdot i(t)$$

Quindi la quantità di acqua che si infila nel terreno si potrà ottenere come:

$$f(t) = i(t) - i_N(t) = (1 - C) \cdot i(t)$$

Questo metodo va usato con consapevolezza in quanto risulta essere molto semplice e facile da utilizzare ma dimentica la fisica del problema, infatti il processo non è lineare come ipotizzato in questo metodo. Inoltre, questo procedimento non mette in mostra come la capacità di infiltrazione di un terreno decresca nel tempo. (Laio, 2017)

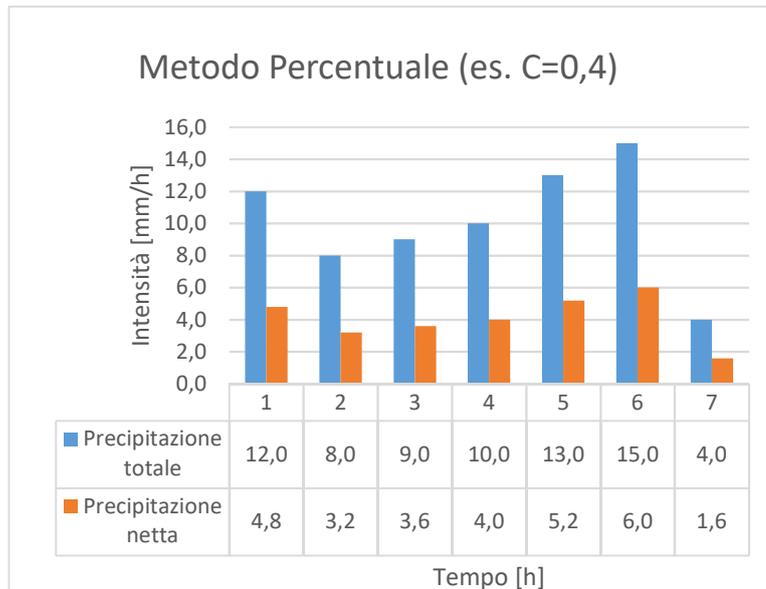


Figura 23: esempio applicazione del metodo percentuale con C=0.4

Tutte le variabilità del problema vengono ricondotte ad un unico parametro “C” che quindi risulta difficile da stimare e con notevoli incertezze.

Metodo Soglia

Questa procedura considera una capacità di infiltrazione del terreno costante e pari al parametro S .

$$i_N(t) = i(t) - S \quad \text{se } i(t) \geq S$$

$$i_N(t) = 0 \quad \text{se } i(t) < S$$

Questo metodo ha una radice fisica migliore di quello precedente infatti risulta essere non lineare e quindi più vicino alla realtà. Ciò nonostante, come detto in precedenza, la capacità di infiltrazione del terreno dovrebbe decrescere nel tempo e questo non corrisponde all'ipotesi base di questo metodo.

Proprio per quest'ultimo motivo, sebbene la semplicità dovuta all'unico parametro da stimare, il metodo è poco utilizzato.

(Laio, 2017)

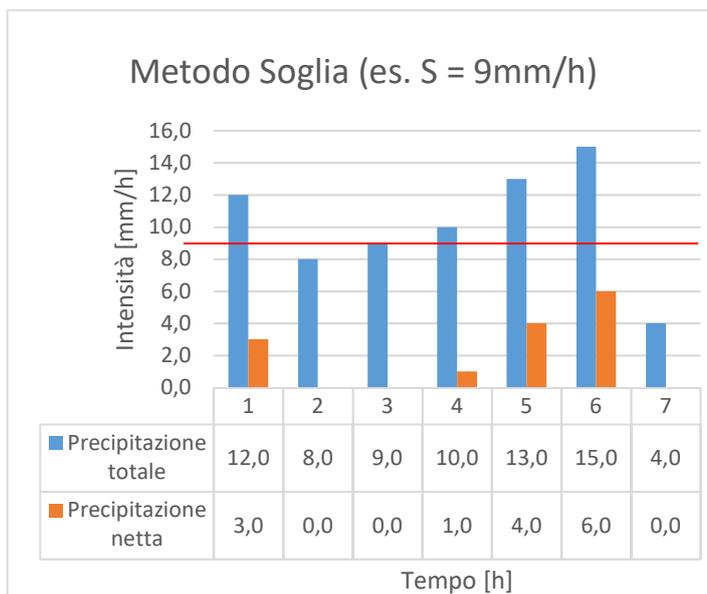


Figura 24: esempio applicazione del metodo soglia con $S=9\text{mm/h}$

Curve Number

“Il metodo CN, sviluppato dal Dipartimento degli Stati Uniti del Servizio di conservazione del suolo agricolo (USDA-SCS), ora Servizio di conservazione delle risorse naturali (USDA-NRCS), è stato ampiamente utilizzato per stimare il deflusso superficiale.” (Lim, Kyoung Jae, 2006)

Questo metodo parte dall'equazione di bilancio:

$$h = F + I_A + h_N$$

dove “ h ” rappresenta l'altezza della precipitazione totale in una data finestra temporale, “ F ” indica il flusso principale di infiltrazione, “ I_A ” è l'initial abstractio cioè la quantità di acqua che non arriva al suolo perché intercettata ed infine h_N rappresenta l'altezza di pioggia netta in un determinato intervallo di tempo (o deflusso superficiale). Uno schema grafico è presente in Figura 25.

La seconda equazione empirica ipotizza che durante l'intero evento preso in considerazione resti invariata la seguente relazione di proporzionalità tra le perdite per infiltrazione e il deflusso superficiale:

$$\frac{h_N}{h - I_A} = \frac{F}{S}$$

Dove “ S ” è lo storage, cioè il quantitativo di acqua che un terreno può immagazzinare.

Sostituendo la prima formula nella seconda si ottiene:

$$h_N = \frac{(h - I_A)^2}{h - I_A + S}$$

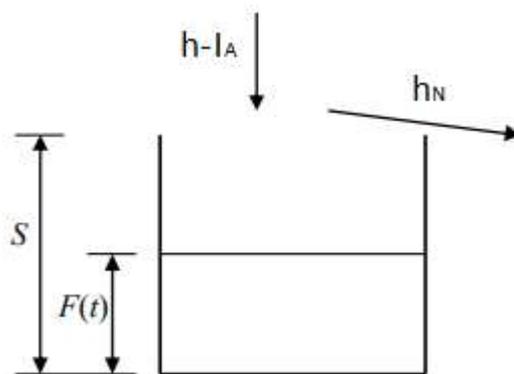


Figura 25: schema metodo curve number

In questo modo però i parametri da stimare sarebbero due (I_A e S) ma il metodo introduce un'ipotesi semplificativa:

$$I_A = 0,2 S$$

Questa ipotesi risulta dall'esperienza di casi studio in cui è presente poca vegetazione e quindi I_A risulta piccolo. Questo valore venne successivamente adottato e suggerito dalla guida del National Engineering Handbook, Sezione 4, Hydrology (USDA-SCS, 1985).

La formula finale su cui si basa il metodo è quindi:

$$h_N = \frac{(h - 0,2 \cdot S)^2}{h + 0,8 \cdot S}$$

In questa equazione l'unico parametro è lo storage, questo fattore viene stimato a partire dal Curve Number (CN) che è un indice ricavabile da tabelle. Queste tabelle grazie all'ampia base di dati risultano essere affidabili.

La relazione tra lo storage e il curve number risulta essere la seguente:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

Questa formula ha una radice empirica, infatti 254 è l'equivalente in millimetri di 10 pollici. "Il parametro CN è un numero adimensionale e varia da 98 (per suoli impermeabili) a circa 25 per suoli molto permeabili con elevati tassi di infiltrazione." (USDA-SCS, 1986) Il CN è quindi essenzialmente legato alla natura del suolo, al tipo di copertura vegetale ed alle condizioni di umidità del suolo antecedenti la precipitazione. In allegato è riportata la tabella utilizzata per stimare il CN (Figura 88)

Metodo Horton

"Questa procedura fu originariamente formulata da Robert E. Horton nel 1939 e, sebbene questo approccio sia stato sostituito al giorno d'oggi con metodi più complessi e dettagliati, rappresenta il primo serio tentativo di descrivere i processi di infiltrazione e quantificare il deflusso superficiale per scopi ingegneristici." (Serena Ceola, 2014)

Questo metodo risulta essere anche quello più complicato rispetto ai precedenti in quanto i parametri da stimare sono tre:

- k_s permeabilità del suolo in condizioni sature
- f_0 capacità di infiltrazione iniziale
- β rapidità di crescita

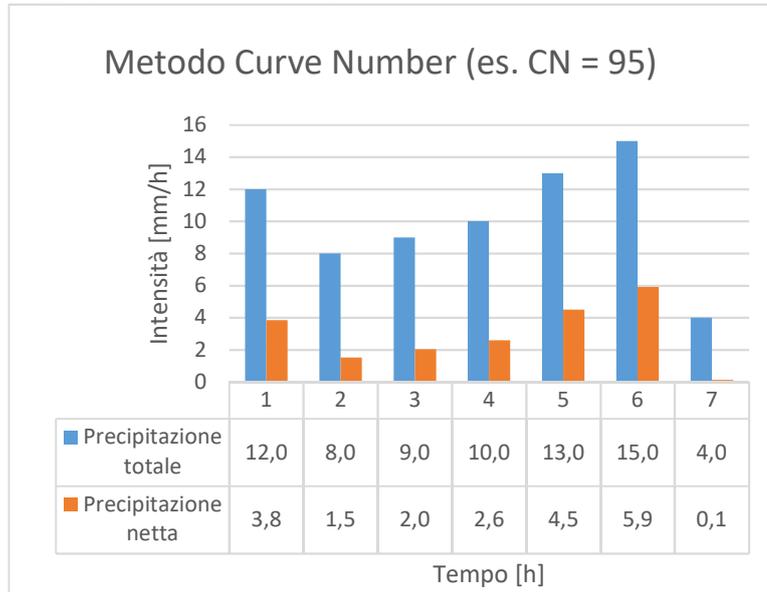


Figura 26: Esempio di applicazione del metodo curve number, CN=95

La metodologia migliore per ottenere i valori di questi parametri è quella con stime di campo ma esse risultano onerose e raramente vengono eseguite.

Il volume d'acqua infiltrato nel suolo al tempo t è pari a:

$$F(t) = k_s t + \frac{(f_0 - k_s)}{\beta} [1 - e^{-\beta t}]$$

Le formule valgono quando la pioggia (mm/h) è superiore alla capacità di infiltrazione f(t) ed il suolo è secco; infatti bisogna ricordare che esiste un altro parametro da determinare, cioè t₀ il tempo da cui fare partire la curva di infiltrazione, in particolare se la precipitazione iniziale è minore della capacità di infiltrazione iniziale si sovrastimerebbe l'infiltrazione. Questo metodo viene corretto traslando in tale caso la curva di infiltrazione di un quantitativo t₀ in modo che i millimetri di pioggia caduti fino all'istante in cui l'acqua inizia a defluire siano uguali a quelli infiltrati fino a quel momento.

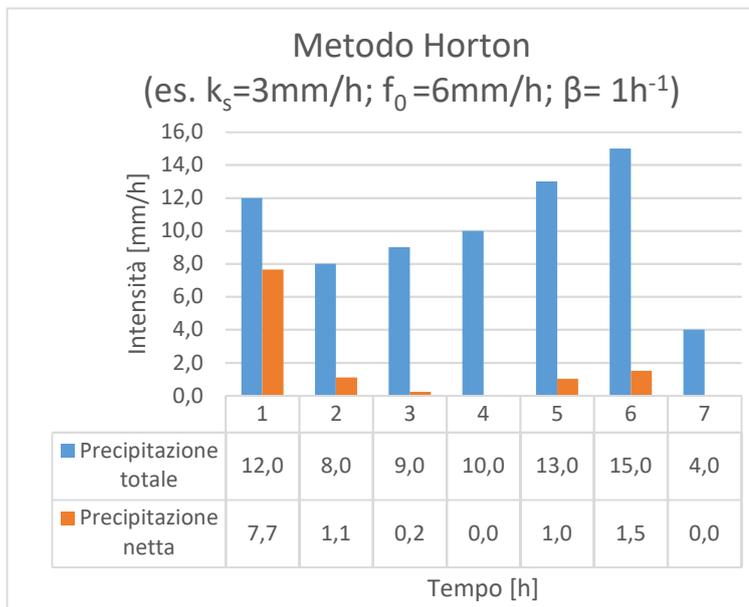


Figura 27: Esempio di applicazione del metodo Horton

3.4 *SINTESI*

In questo capitolo si è cercato di esporre le principali correlazioni tra eventi di precipitazione e la risposta della falda, raccogliendo dalla letteratura i principali metodi usati per stimare il fenomeno della ricarica della falda ed anche in particolare approcci usati per la determinazione dell'infiltrazione, uno dei principali processi che determinano la ricarica della falda acquifera.

I sistemi valutati, appartenenti alla prima categoria, sono:

- Bilancio idrogeologico
- Zero-flux plane
- Legge di Darcy
- Tecniche che studiano tracciatori
- Metodi numerici
- Relazioni empiriche
- Metodo Water-table fluctuation

Mentre quelli appartenenti al secondo gruppo, cioè che cercano di determinare l'infiltrazione, sono:

- Metodo percentuale
- Metodo soglia
- Curve Number
- Metodo Horton

Mettendo insieme queste due categorie, ed ipotizzando che l'infiltrazione sia il fenomeno che caratterizza la ricarica della falda, è così possibile stimare l'influenza delle precipitazioni sull'andamento della falda.

4 CASI STUDIO

4.1 PREMESSA

Nel seguito si analizzeranno alcuni casi studio situati nelle Langhe, un territorio del Piemonte meridionale collocato tra le provincie di Cuneo e Asti (Figura 28). Tale zona si distingue per la sua poliforme produzione enogastronomica. Esse sono costituite da un esteso sistema collinare, definito dal corso dei fiumi Tanaro, Belbo, Bormida di Millesimo e Bormida di Spigno. Proprio grazie alle sue colline e vigneti che si alternano a castelli e borghi storici le Langhe sono state ufficialmente incluse, assieme a Roero e Monferrato, nella lista dei beni del Patrimonio dell'Umanità dall'UNESCO nel 2014.

“Dal punto di vista geologico, i rilievi collinari delle Langhe, appartenenti al Bacino Terziario Piemontese, sono rappresentati da successioni ritmiche di rocce sedimentarie terrigene di età compresa tra l'Oligocene ed il Miocene superiore. Si tratta di facies a sedimentazione normale di mare poco profondo passanti ad ambienti di sedimentazione turbiditica conseguenti ad una trasgressione marina che, a partire dall'Oligocene, si è propagata da NE verso SW. Nella zona centrale la successione Oligo-Miocenica possiede una potenza non inferiore a 4000 m. I litotipi prevalenti sono marnoso-siltosi da grigio-giallognoli ad azzurri ed arenaceo-sabbiosi grigi, gialli e rossastri, potenti anche un paio di metri, ma più frequentemente compresi tra 5 e 50 cm. Strutturalmente questi depositi

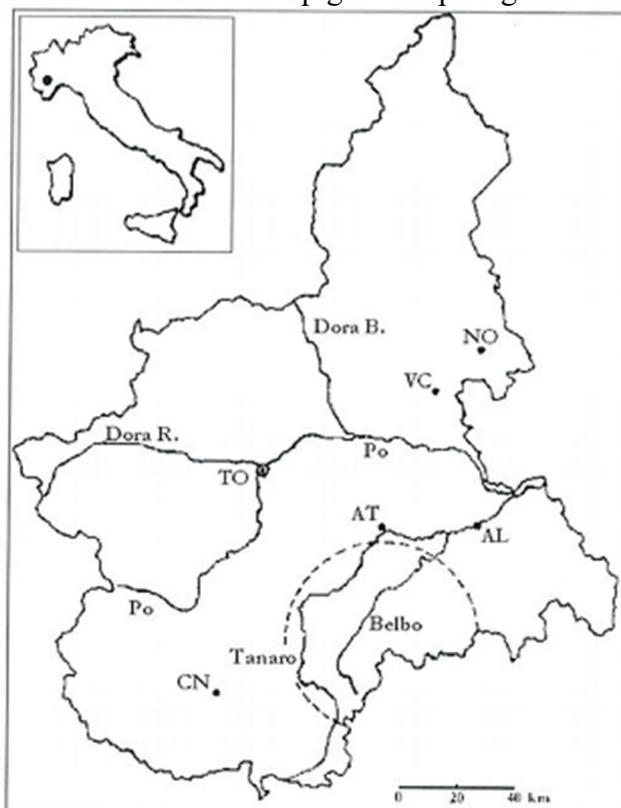


Figura 28: Inquadramento geografico delle Langhe Piemontesi, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

sono caratterizzati da una giacitura isoclinale sufficientemente regolare immergente verso NW con un'inclinazione variabile tra 8° e 15° , che ha portato alla formazione di un paesaggio a valli asimmetriche caratterizzate da un versante "lungo" a debole inclinazione conforme alla stratificazione e da uno, opposto "corto", generalmente ripido, inciso sulla testata degli strati" (Figura 29). (Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>)

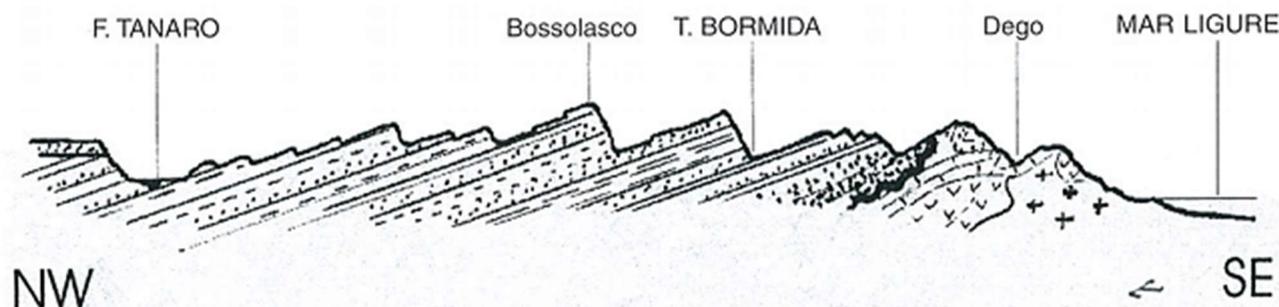


Figura 29: Profilo schematico dimostrativo della situazione strutturale del substrato nell'area delle Langhe tra il fiume Tartaro e il Mar Ligure. La sezione posta da NW a SE mostra la disposizione, in monoclinale, della successione sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese posta in discordanza (verso destra) sui litotipi preoligocenici appartenenti ai Domini Brianzonese e Piemontese. Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

Le principali instabilità dei versanti identificate in questa zona si distinguono essenzialmente in tre tipologie di movimento:

1. fenomeni franosi per saturazione e mobilizzazione dei materiali sciolti costituenti le coperture superficiali, sviluppatasi prevalentemente sui versanti più acclivi;
2. fenomeni franosi coinvolgenti il substrato roccioso anche a notevole profondità, sviluppatasi come scivolamenti planari lungo giunti paralleli alle superfici di strato, aventi inclinazione compresa tra 8° e 15° , generalmente coincidente con quella dei versanti (esempio in Figura 30)
3. fenomeni franosi coinvolgenti le coperture più potenti e talora parti di substrato più disaggregato, sviluppatasi come scorrimenti rotazionali, su versanti generalmente più acclivi dei precedenti e diversamente orientati. (Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>)



Figura 30: Comune di Rocca Cigliè, regione Mollie. Ripresa aerea di un ampio settore di versante coinvolto in uno scivolamento planare arrestatosi in una fase di evoluzione "intermedia". Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

In particolare, i casi studio sono stati selezionati, grazie all'aiuto di geologi dell'Arpa Piemonte, per essere dipendenti dalle precipitazioni e per avere sistemi di monitoraggio che prevedessero la presenza di inclinometri e piezometri. Questi ultimi due strumenti sono necessari per verificare la relazione tra l'instabilità del pendio e la variazione della falda.

I casi studio selezionati sono:

- Caprauna
- Cissone
- Cortemilia
- Monchiero
- Narzole
- Paroldo
- Somano

Tutti questi luoghi presentano un pendio instabile monitorato sia con piezometro sia con inclinometro ma solo alcuni di essi hanno le misure effettuate in continuo e date le numerose variabili introdotte nelle analisi si è deciso di procedere principalmente con lo studio di questi ultimi, così da avere una banca dati delle misurazioni ampia ed affidabile. Inoltre, l'analisi è stata concentrata sui casi che presentassero una serie storica di dati sufficientemente ampia.

Per questi motivi lo studio si è concentrato principalmente sui seguenti casi:

- Cissone
- Monchiero
- Somano

I capitoli successivi di approfondimento sono basati sulle schede SIFraP (Sistema Informativo Frane in Piemonte), cioè scheda riassuntive delle informazioni contenute nel Sistema Informativo Geologico di Arpa Piemonte relative a dissesti di versante.

4.2 CISSONE

Ciszone è un piccolo comune della provincia di Cuneo, situato all'estremità occidentale della dorsale collinare che s'innalza sino a Serravalle Langhe. Il paese domina una valletta coperta di boschi scavata nel corso degli anni dal torrente Riavolo.

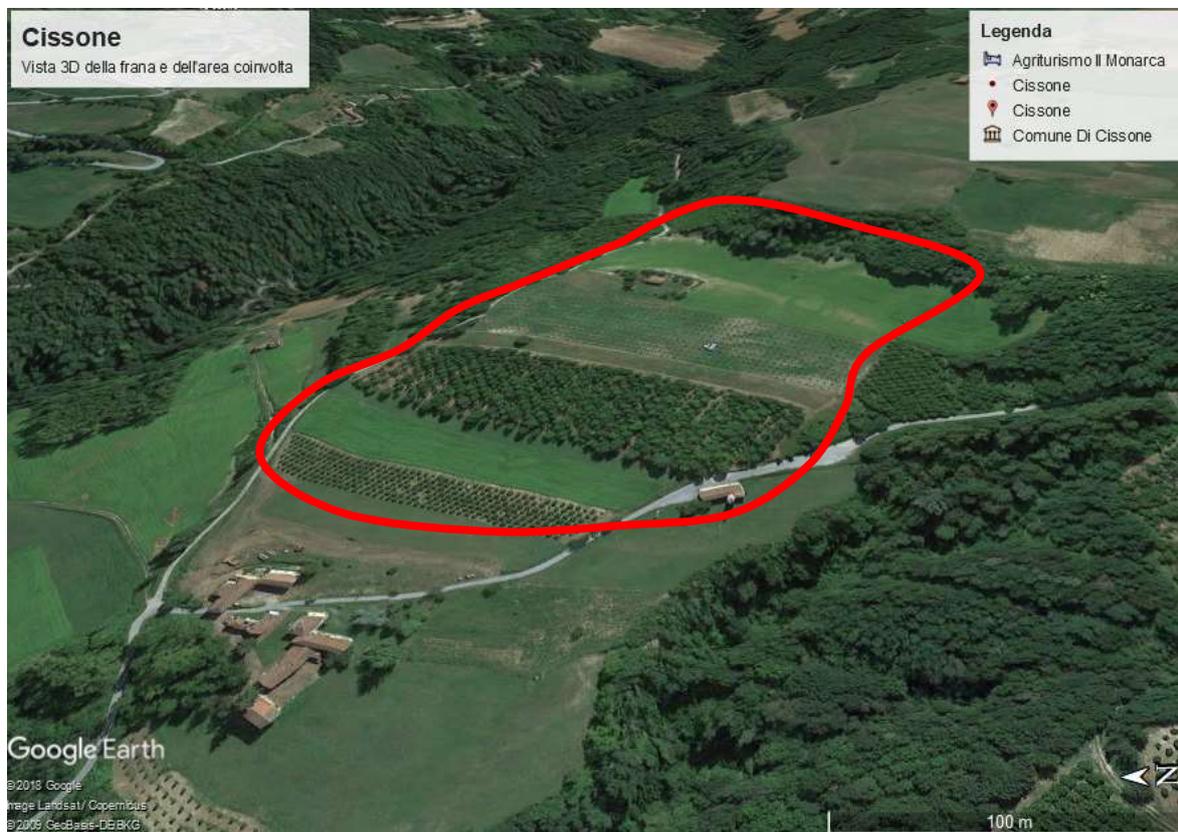


Figura 31: Vista 3D del luogo oggetto del caso studio con individuazione della frana in rosso. Fonte Google Earth

Come si può notare in Figura 31 il comune di Ciszone, in particolare la frazione Pianezza, è stato interessato da un vasto fenomeno franoso di tipo planare, tipico della zona collinare delle Langhe. Tale processo si è attivato in conseguenza dell'evento alluvionale di novembre 1994, coinvolgendo gravemente anche il centro abitato della frazione.

Sullo stesso versante, ma ad una distanza di circa 450 m verso sudovest rispetto alla zona colpita nel novembre 1994, si era già verificata nel 1941 l'attivazione di un fenomeno planare simile, anche se con superficie di scivolamento più profonda, che aveva causato la morte di due persone. Il movimento del 1994 ha interessato una superficie di strato marnosa situata ad una profondità di 8 metri dal piano campagna come era possibile osservare subito dopo l'attivazione immediatamente a valle del coronamento, dove era in origine ubicata la frazione Pianezza. I terreni, e con questi le abitazioni della frazione Pianezza, subirono una traslazione verso valle di circa 50 metri (Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>).

Geologia

Il terreno, su cui si è attivata nel 1994 la suddetta frana, è caratterizzato da una successione, sedimentata in ambiente marino, che ha originato una monoclinale molto regolare con immersione a NW e inclinazione degli strati compresa tra 5° e 20°. Nello specifico, si tratta di una monotona

successione di sabbie e arenarie alternate a marna. In superficie i depositi marini della Formazione di Lequio sono ricoperti da una coltre di terreno colluviale.” (Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>).

Le caratteristiche principali della frana sono riportate in Tabella 9.

Tabella 9: Dati generali frana Cissone, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

DATI GENERALI			
Quota corona Qc (m)	550	Azimut movim. α (°)	309
Quota unghia Qt (m)	485	Area totale A (m ²)	87 932
Lungh. orizz. Lo (m)	375	Larghezza La (m)	280
Dislivello H (m)	65	Volume massa sp. (m ³)	500 000
Pendenza (°)	22.6	Profondità sup. sciv. Dr (m)	8

Idrogeologia

Il versante, su cui si è sviluppato l'evento del 1994, è profondamente inciso da un rio affluente di sinistra del torrente Riavolo, presenta una circolazione idrica legata alla diversa permeabilità dei litotipi che si alternano ed all'assetto strutturale. In ordine, dal più al meno permeabile, si succedono: sabbie (permeabilità per porosità), arenarie (permeabilità secondaria per fratturazione) e marne. La circolazione dell'acqua avviene all'interno dei livelli sabbiosi lungo la direzione di immersione degli strati e quindi da SE verso NW, mentre gli strati marnosi fungono da separatori tra le diverse falde. Oltre alle falde profonde, contenute nei livelli più permeabili del substrato, possono essere presenti locali falde sospese superficiali, all'interno della coltre colluviali, alimentate direttamente dalle precipitazioni meteoriche e quindi sovente con carattere stagionale, ovvero legate a periodi di intense precipitazioni. Il limite inferiore di queste falde, comunque caratterizzate da modeste portate, è rappresentato dal tetto dei depositi marini della Formazione di Lequio. Generalmente lo spessore del terreno saturo è quindi limitato alla porzione inferiore di colluvio a contatto coi depositi marnoso-arenacei con direzione del deflusso sotterraneo di norma coincidente con la linea di massima pendenza dei versanti. (Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>)

Monitoraggio

Gli inclinometri attraverso i quali è stato monitorato il settore di versante di Pianezza sono 8; il controllo strumentale è iniziato nel giugno del 1999 per la maggior parte degli strumenti. Gli strumenti ricadono in minima parte nell'area di frana conclamata e in prevalenza nei pressi delle borgate limitrofe al movimento franoso del 1994, come si può notare in Figura 32. Di tutti gli strumenti installati rimangono attivi solo più l'inclinometro I2, attrezzato con una sonda automatizzata alla profondità di 5 m, che evidenzia, rispetto all'origine (aprile 2002), una deformazione di entità pari a circa 2,3 cm, e il piezometro S9, anch'esso attrezzato con sistema di acquisizione dati in continuo.

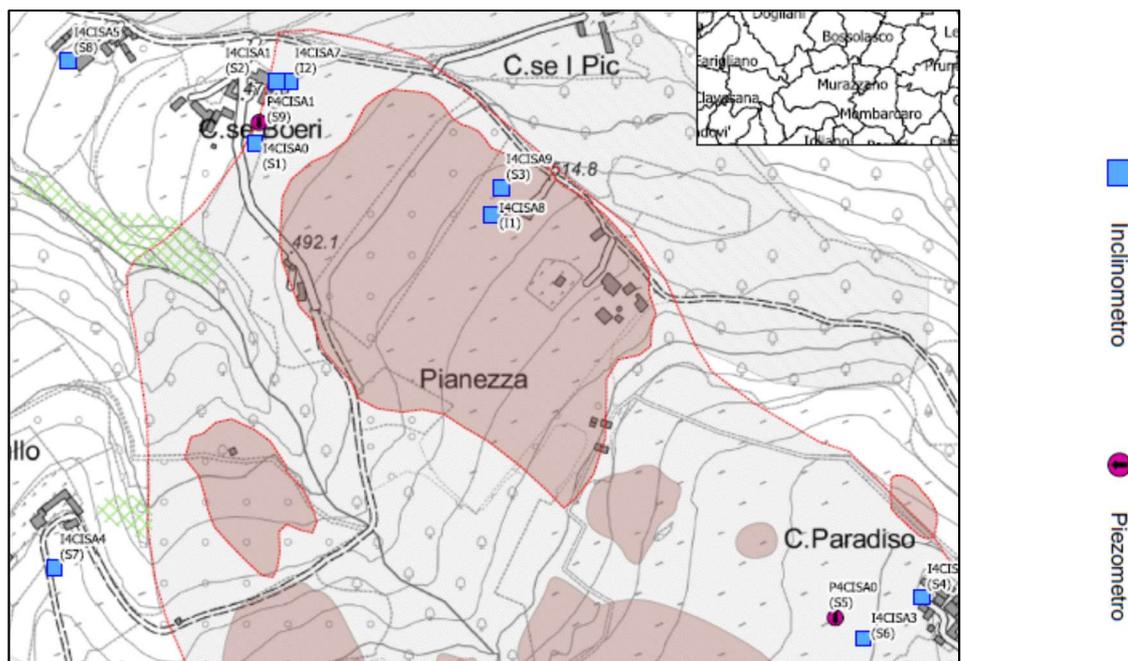


Figura 32: Corografia con ubicazione degli strumenti del sistema di monitoraggio, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

Particolarmente significativo risulta il fatto che le condizioni climatiche instauratesi nella zona tra la fine dell'autunno 2008 e l'inizio della primavera 2009 abbiano causato riattivazioni o accelerazioni di alcune porzioni del versante di Pianezza che sono state registrate dagli strumenti di misura (vedi Figura 33). In particolare, è significativo il comportamento dei tubi inclinometrici I2 ed S4, i quali, rispettivamente, nei 7 e 10 anni di monitoraggio precedenti non avevano manifestato deformazioni di entità rilevante. Un'accelerazione dei movimenti è stata registrata in modo analogo anche in concomitanza degli eventi meteorologici del 16-17 marzo 2011 e marzo-aprile 2015. In particolare, l'inclinometro fisso ha registrato tra il 16 e il 18 marzo 2011 un aumento di 3 mm della deformazione alla profondità di 5 m. Inoltre, nel mese di marzo 2018, probabilmente in concomitanza con lo scioglimento della coltre nevosa, la sonda automatizzata ha registrato un ulteriore incremento di circa 3 mm.

(ArpaPiemonte, www.arpa.piemonte.it/)

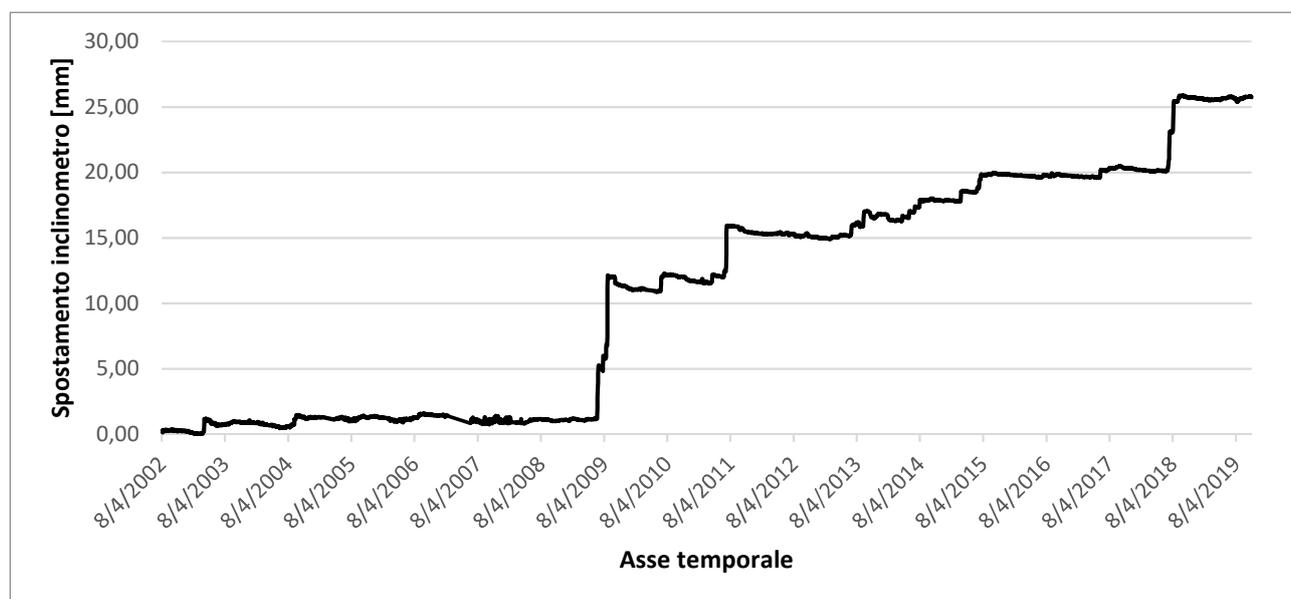


Figura 33: Misure inclinometriche (S4CISA0A-5.00m) Cissone, versante di Pianezza, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

In Figura 34 si può osservare un estratto dei dati raccolti.

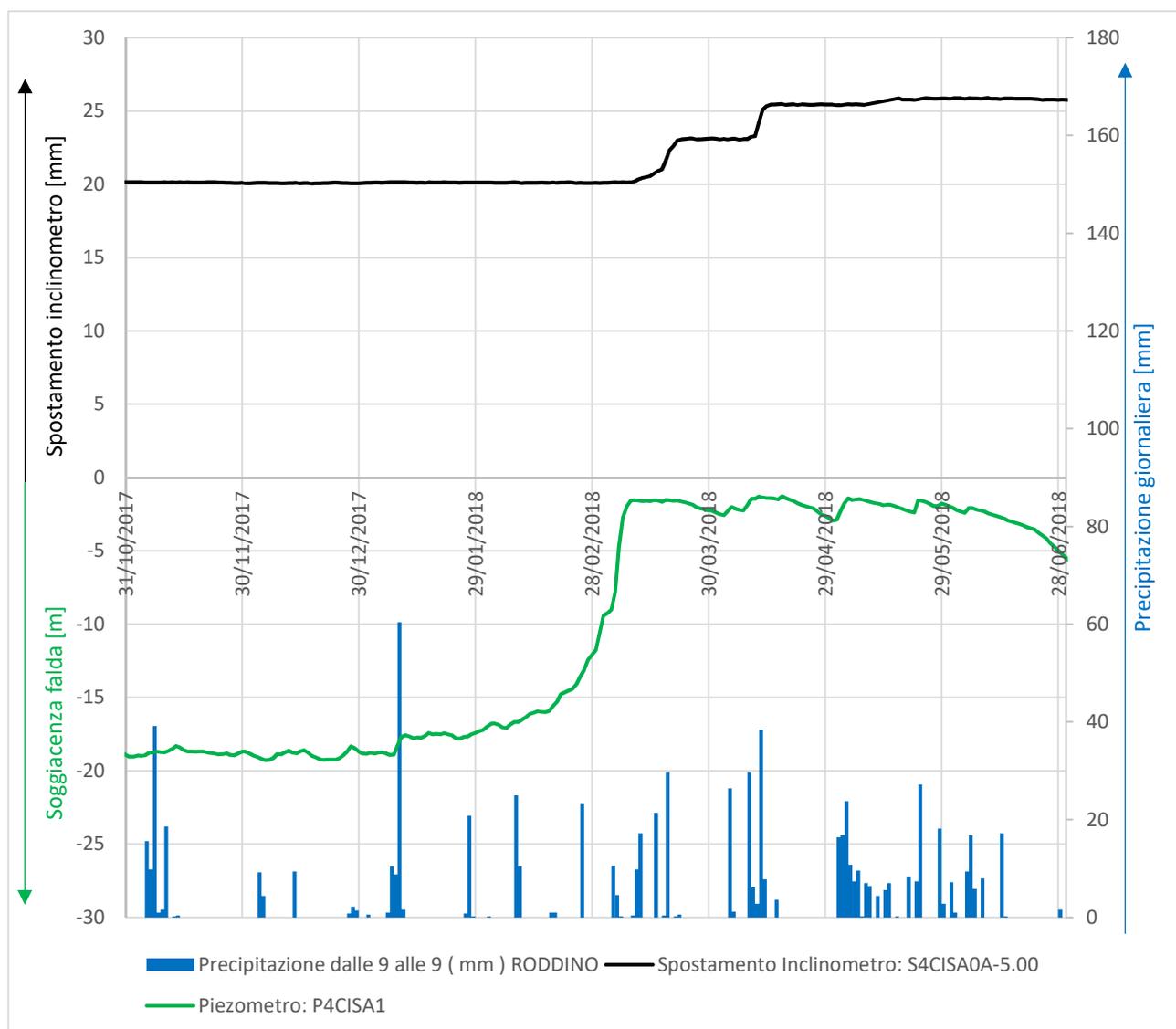


Figura 34: Esempio misure piezometro, inclinometro e pluviometro a Cissonne tra il 31/10/2017 e il 28/6/2018, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

Come si può notare in Figura 34 vi è una certa corrispondenza tra eventi pluviometrici, innalzamento della falda e infine instabilità, che si manifesta in uno spostamento. Infatti, gli eventi di precipitazioni che si sviluppano fino al 8/3/2018 comportano un innalzamento della falda fino a -1,54 m di profondità e questo scatena uno spostamento letto dall'inclinometro S4CISA0A pari a 3 cm.

In Figura 35 è stata aggiunta anche la componente nevosa, infatti tale fattore non va trascurato. Come si può notare in Figura 35, in primavera, l'apporto di acqua dovuto allo sciogliersi della neve negli eventi estremi incrementa notevolmente il quantitativo totale di acqua. Per creare questo grafico sono state utilizzate le misure pluviometriche e nivometriche più vicine al caso studio, rispettivamente Roddino (circa 1,5 km) e Feisoglio (7 km).

Per la conversione tra neve e pioggia si è adottato il rapporto:

“1 cm di neve = 1 mm di precipitazione acquosa” (Pasqualini, 2017)

Bisogna però considerare che questa è una forte semplificazione, infatti la conversione tra neve e pioggia risulta molto dipendente dalla densità della neve. Infine, così facendo si è potuto ottenere la linea azzurra del grafico in Figura 35, che rappresenta l'apporto totale di acqua al suolo da precipitazioni piovose e nevose.

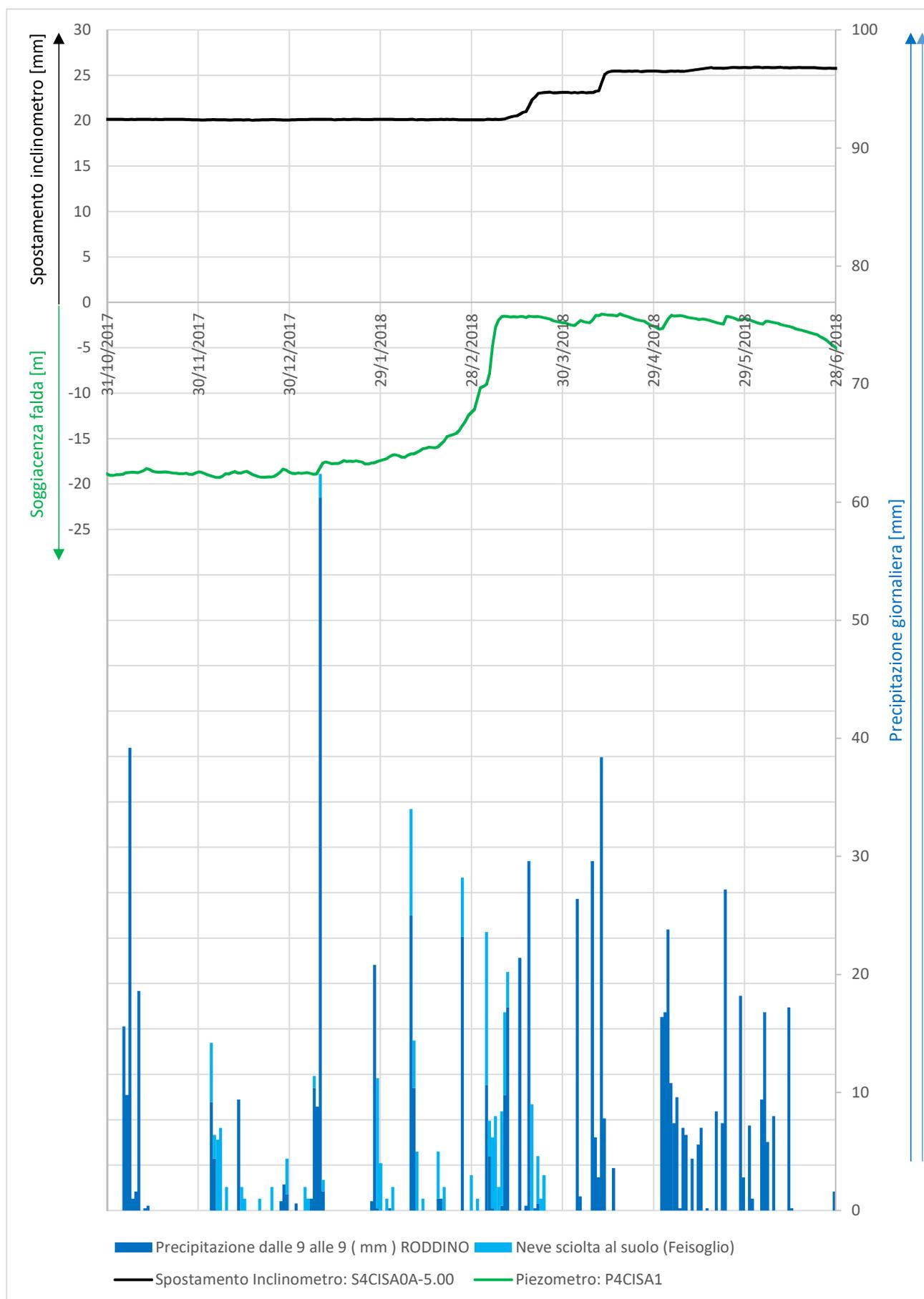


Figura 35: Esempio misure piezometro, inclinometro, pluviometro e nivometro a Cissone tra il 31/10/2017 e il 28/6/2018, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

4.3 MONCHIERO

Monchiero è un piccolo comune della provincia di Cuneo; il nucleo storico di questo luogo si trova sulla strada che sale a Monforte, alla confluenza del torrente Rea col fiume Tanaro.

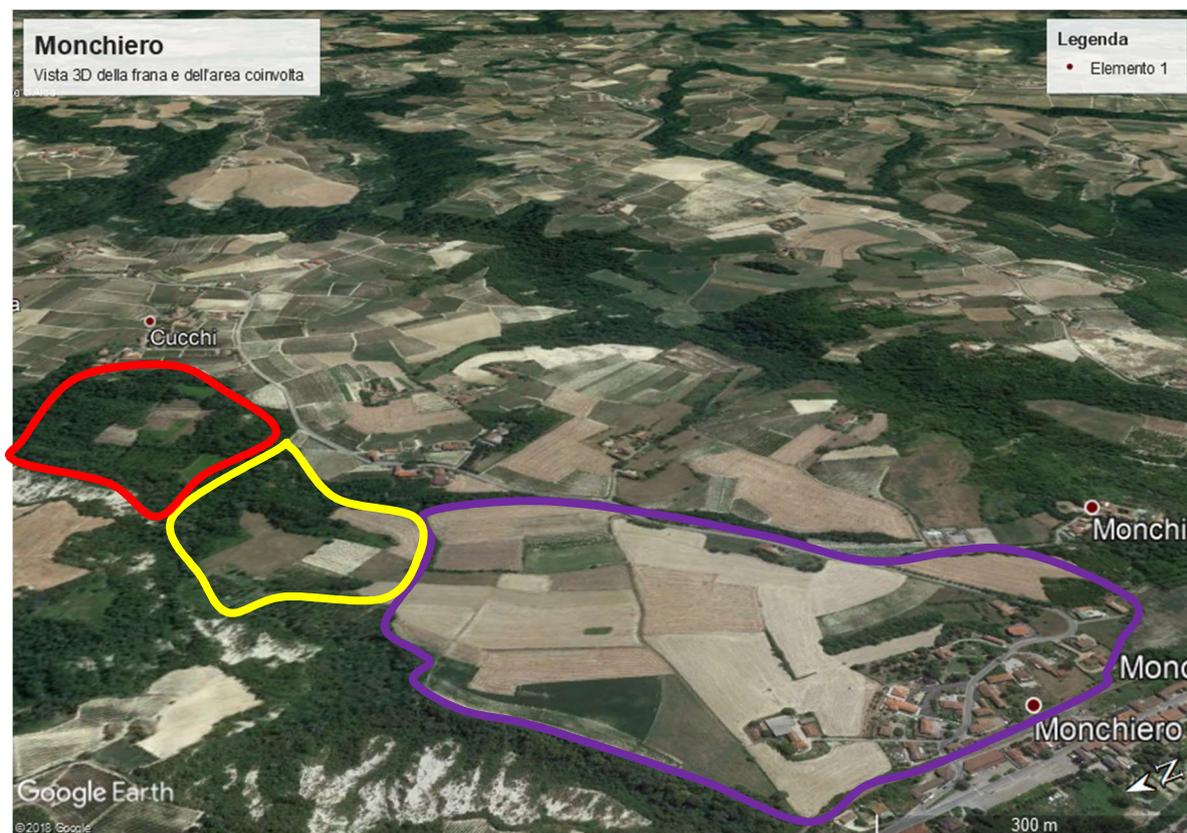


Figura 36: Vista 3D del luogo oggetto del caso studio con individuazione delle frane planari in rosso e rotazionale in viola. In giallo la frana oggetto di studio. Fonte Google Earth

Il settore in esame è caratterizzato dalla presenza di quattro frane di dimensioni significative riconoscibili per evidenti indizi morfologici di movimento planare e di una che si è sviluppata in modo rotazionale (Figura 36). La parte centro-settentrionale del settore presenta indizi morfologici di movimento molto evidenti, tali da permettere l'individuazione di corpi di frana specifici. La porzione meridionale, sulla quale sorge gran parte dell'abitato, è caratterizzata da segnali più sfumati. Tenendo conto dello studio fotointerpretativo condotto su riprese aeree di annate differenti (1954, 1980, 2001), è stato possibile perimetrare, tra l'abitato di Monchiero e la frazione C. Nuova, un buon numero di antiche zolle di frana ancora ben evidenti nel 1954 che testimoniano lo sviluppo di un importante fenomeno in un passato non precisabile. Tali elevazioni vennero spianate agli inizi degli anni '70 come riferito da un abitante della zona. La presenza della frana è avvalorata dal monitoraggio inclinometrico che segnala in questa zona movimenti millimetrici a profondità variabili tra 5 e 20 metri dal piano campagna che subiscono incrementi rilevanti in corrispondenza dei periodi primaverili. Sulla base dei dati di monitoraggio la fase di attività più rilevante si è verificata nel periodo tardo invernale/inizio primaverile dell'anno 2015 caratterizzato da piogge persistenti che si sono accompagnate alla fusione della neve al suolo.

(Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>).

Geologia

La stratigrafia è caratterizzata da marne marine grigie, talora sabbiose, qua e là fossilifere.

(Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>).

Monitoraggio

“Il sistema di monitoraggio è focalizzato nella zona meridionale dell'ampio settore di versante in frana sulla quale è edificata parte del concentrico comunale. Senza tenere in considerazione i piezometri a lettura manuale non più gestiti da Arpa Piemonte complessivamente sono presenti sul sito 6 verticali inclinometriche a lettura manuale (S2, S3, S4, S5, S6, S7N), una verticale inclinometrica automatizzata e a lettura manuale (S1) e una verticale piezometrica automatizzata (PZ4); l'inclinometro S1 è dotato di due sonde installate alla profondità di 9,0 e 13,5 metri dal piano campagna. La misura di origine dei tubi inclinometrici con lettura manuale risale a settembre del 2002 per S1, S2 e S3, ad aprile del 2006 per S4, S5 e S6, ad aprile del 2008 per S7N (l'originale strumento S7 è stato danneggiato da lavori agricoli e quindi accorciato); la misura iniziale con sistema automatizzato per l'inclinometro S1 risale invece al mese di febbraio del 2010.” (Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>).

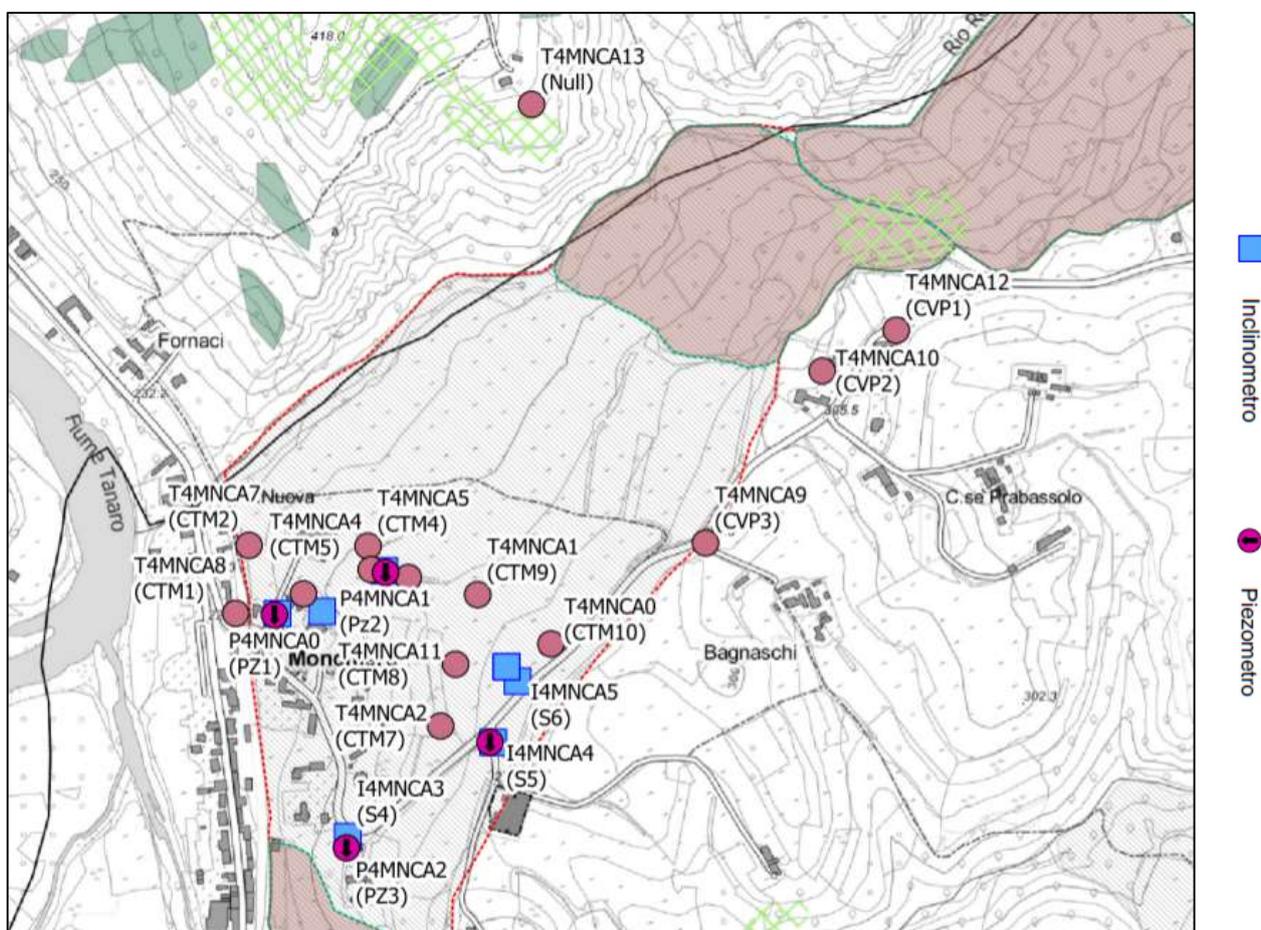


Figura 37: Corografia con ubicazione degli strumenti del sistema di monitoraggio, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

Come si può notare dalla Figura 38 l'inclinometro S1 dalla data di giugno 2018 non ha rilevato incrementi di movimento; gli incrementi di movimento più importanti si sono verificati nei periodi primaverili, in particolare: 1.5 mm a marzo 2011, 1.0 mm a maggio 2013, 1.0 mm a marzo 2014, 3.0 mm a febbraio/marzo 2015.

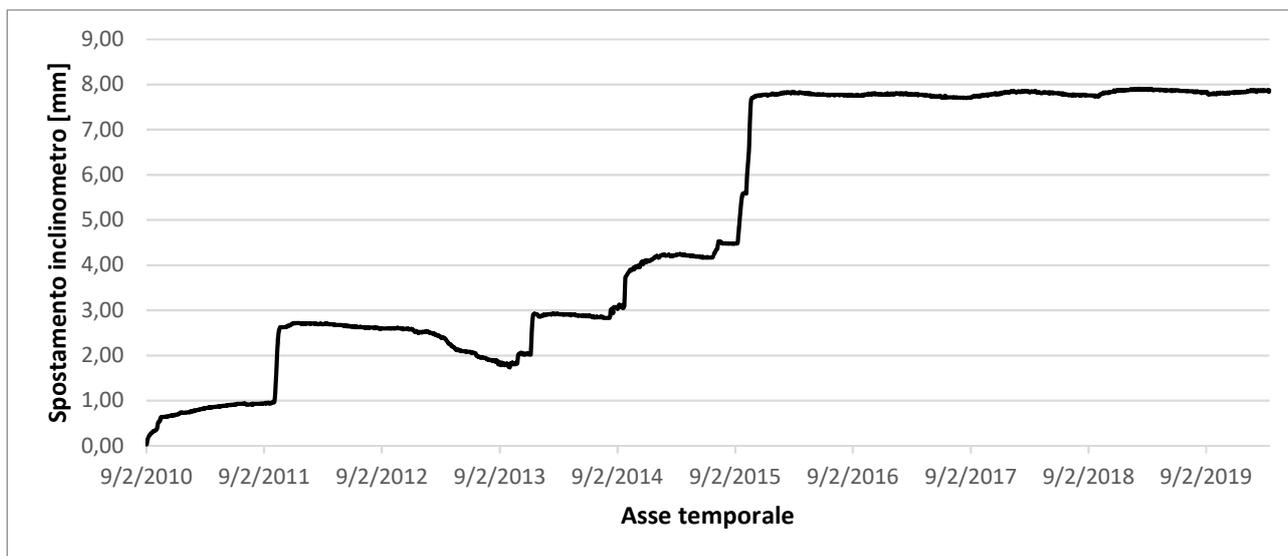


Figura 38: Misure inclinometriche Monchiero (www.arpa.piemonte.it)

In Figura 39 si può osservare un estratto dei dati raccolti dal piezometro P4MNCA0, inclinometro S4MNCA0B e del pluviometro di Roddino.

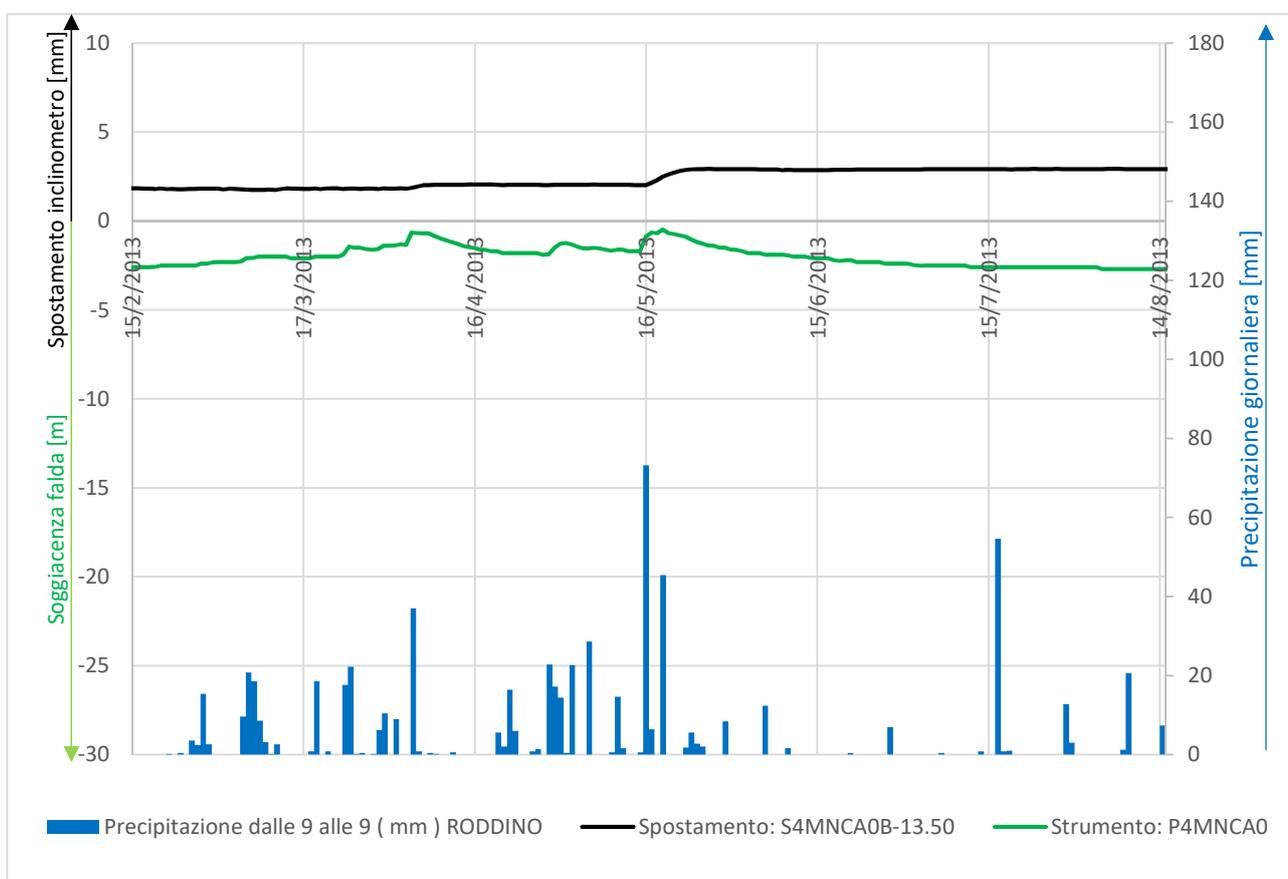


Figura 39: Esempio misure piezometro, inclinometro e pluviometro a Monchiero tra il 15/02/2013 e il 15/08/2013, (www.arpa.piemonte.it)

Come si può notare in Figura 39 vi è una certa corrispondenza tra eventi pluviometrici, innalzamento della falda e infine instabilità, che si manifesta in uno spostamento. Infatti, gli eventi di precipitazioni che si sviluppano fino al 19/5/2013 comportano un innalzamento della falda fino a -0,47 m di profondità e questo scatena uno spostamento letto dall'inclinometro S4MNCA0B pari a 0,7 cm.

In Figura 40 è stata aggiunta anche la componente nevosa, infatti, come suggerito da un tecnico dell'ARPA, tale fattore non va trascurato. Come si può notare in Figura 40, in primavera, l'apporto di acqua dovuto allo sciogliersi della neve negli eventi estremi incrementa notevolmente il quantitativo totale di acqua. Per creare questo grafico sono state utilizzate le misure pluviometriche e nivometriche più vicine al caso studio, rispettivamente Roddino (circa 1,5 km) e Feisoglio (7 km).

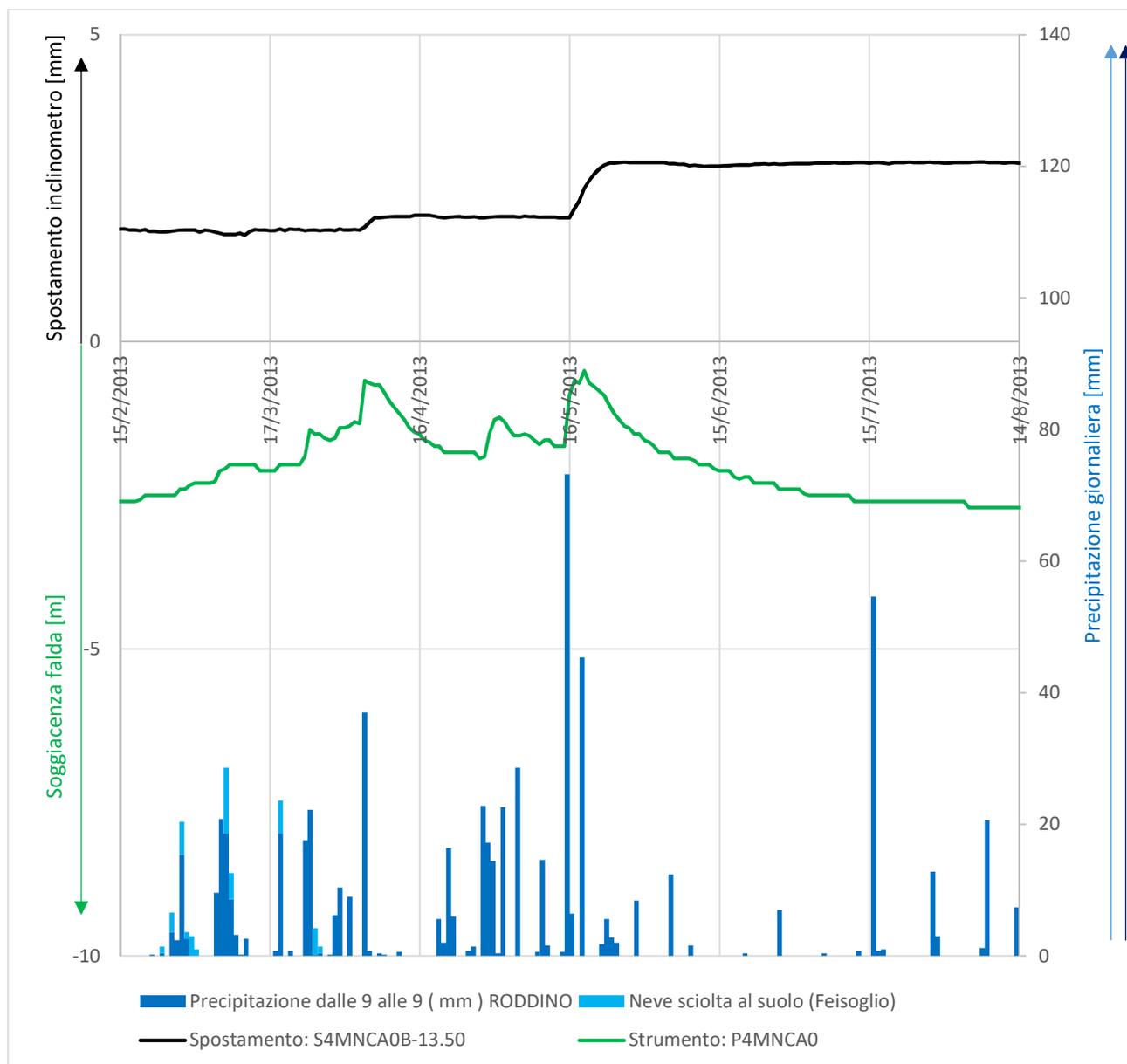


Figura 40: Esempio misure piezometro, inclinometro, pluviometro e nivometriche a Monchiero tra il 15/02/2013 e il 15/08/2013, (www.arpa.piemonte.it)

Per la conversione tra neve e pioggia si è adottato il rapporto descritto nel caso studio di Cissone (Paragrafo 4.2).

4.4 SOMANO

Somano è un piccolo comune della provincia di Cuneo, incastonato tra le colline dell'Alta Langa; si trova in un'area di transizione tra le vigne a metà percorso della provinciale che da Dogliani porta a Bossolasco.



Figura 41: Vista 3D del luogo oggetto del caso studio con individuazione della frana. Fonte Google Earth

Il dissesto oggetto dello studio, avvenuto nei pressi dell'abitato di Somano, riguarda esteso settore interessato da diffusi scivolamenti planari non sempre identificabili nella forma e nello stato evolutivo. Tale fenomeno franoso coinvolgente il substrato roccioso, si è sviluppato come scivolamento planare lungo un giunto di strato di inclinazione compresa tra 8° e 15° . La stratificazione è a franapoggio minore del pendio. Il coronamento si è formato dalla coalescenza delle fratture che hanno tagliato trasversalmente il pacco di strati fino al giunto. Quest'ultimo ha assunto il ruolo di superficie di scivolamento. Il detrito generatosi ha continuato a muoversi seguendo una dinamica di colamento rapido in corrispondenza del sottostante Rio Somano. Il carattere retrogressivo del fenomeno è rivelato dalla presenza di fratture e ondulazioni a monte del coronamento, interpretabili come precursori di probabili future riattivazioni. Questi segnali sono anche una manifestazione della generalizzata instabilità del versante. (Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>)

Geologia

La stratigrafia è rappresentata da depositi Oligo-Miocenici strutturalmente caratterizzati da una giacitura isoclinale sufficientemente regolare immergente verso NW con inclinazione compresa tra 8° e 15° . Nel versante in questione la giacitura degli strati è a franapoggio con inclinazione minore del pendio. (Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>)

Le caratteristiche principali della frana sono riportate in Tabella 10.

Tabella 10: Dati generali frana Somano, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

DATI GENERALI			
Quota corona Qc (m)	520	Azimut movim. α (°)	310
Quota unghia Qt (m)	480	Area totale A (m ²)	22 400
Lungh. orizz. Lo (m)	170	Larghezza La (m)	180
Dislivello H (m)	40	Volume massa sp. (m ³)	-
Pendenza (°)	13,2	Profondità sup. sciv. Dr (m)	5

Idrogeologia

A causa della scarsa pendenza del versante (13°) favorisce l'infiltrazione delle acque piovane piuttosto che il loro deflusso. Per la presenza di sistemi di discontinuità verticali si viene a formare una diversa circolazione idrica verso il basso che viene parzialmente interrotta in corrispondenza dei piani di stratificazione delle marne ed, in particolare, dove le superfici sono costituite da elementi più argillosi, così aumentando il rischio di completa saturazione localizzata. La maggiore apertura dei giunti di strato rispetto ad altri sistemi di discontinuità e la presenza di materiali argillosi all'interfaccia fanno sì che la circolazione avvenga di preferenza, anche se non in modo arealmente diffuso, lungo tali piani. (Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>)

Monitoraggio

Come si può osservare in Figura 42 gli inclinometri attivi sono 7 e sono tutti posizionati a monte del corpo di frana. La misura di origine risale a maggio 1999, l'ultima misura di esercizio è stata effettuata a marzo 2018. Quasi tutti gli strumenti misurabili sono caratterizzati da deformazioni a profondità comprese tra 6 e 16 metri, riconducibili a movimenti gravitativi; tra gli strumenti non più in funzione, l'inclinometro S2, tranciato alla profondità di 7 metri, ha fatto registrare una velocità massima di circa 10 mm/anno. (Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>)

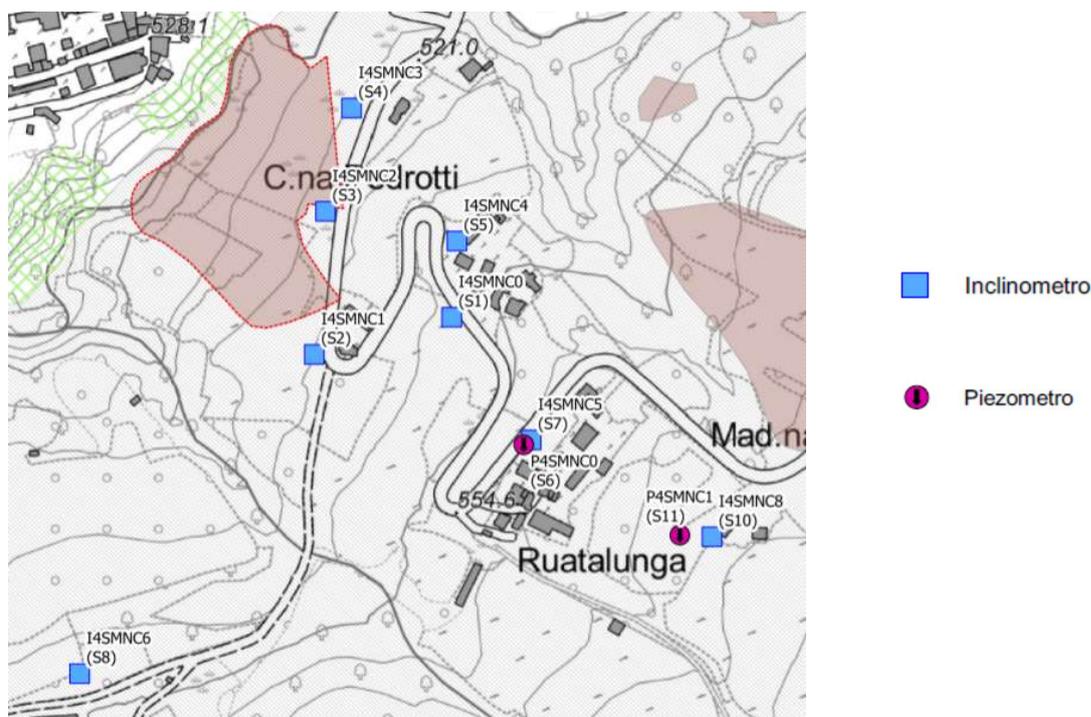


Figura 42: Corografia con ubicazione degli strumenti del sistema di monitoraggio, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

La postazione S10, come si può osservare in Figura 43 è stata installata nel febbraio 2005, ha subito un'interruzione nell'acquisizione dei dati tra novembre 2010 e ottobre 2011; ad ottobre 2011 è stata fissata una nuova misura di origine, ma i dati rilevati sono caratterizzati da una forte incertezza; nel corso del 2013 non ha fornito dati significativi. E' stata ripristinata a partire dal gennaio 2014.

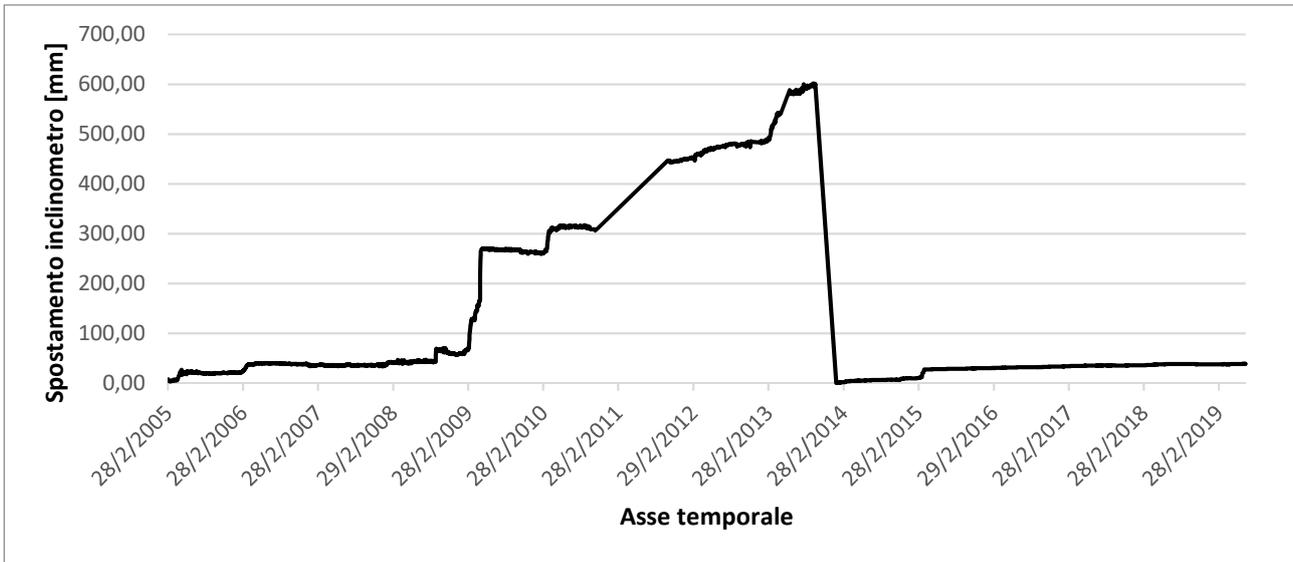


Figura 43: Misure inclinometriche Somano, postazione S10, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

In Figura 39 si può osservare un estratto dei dati raccolti dal piezometro P4SMNC1, inclinometro S4SMNC0B e del pluviometro di Somano.

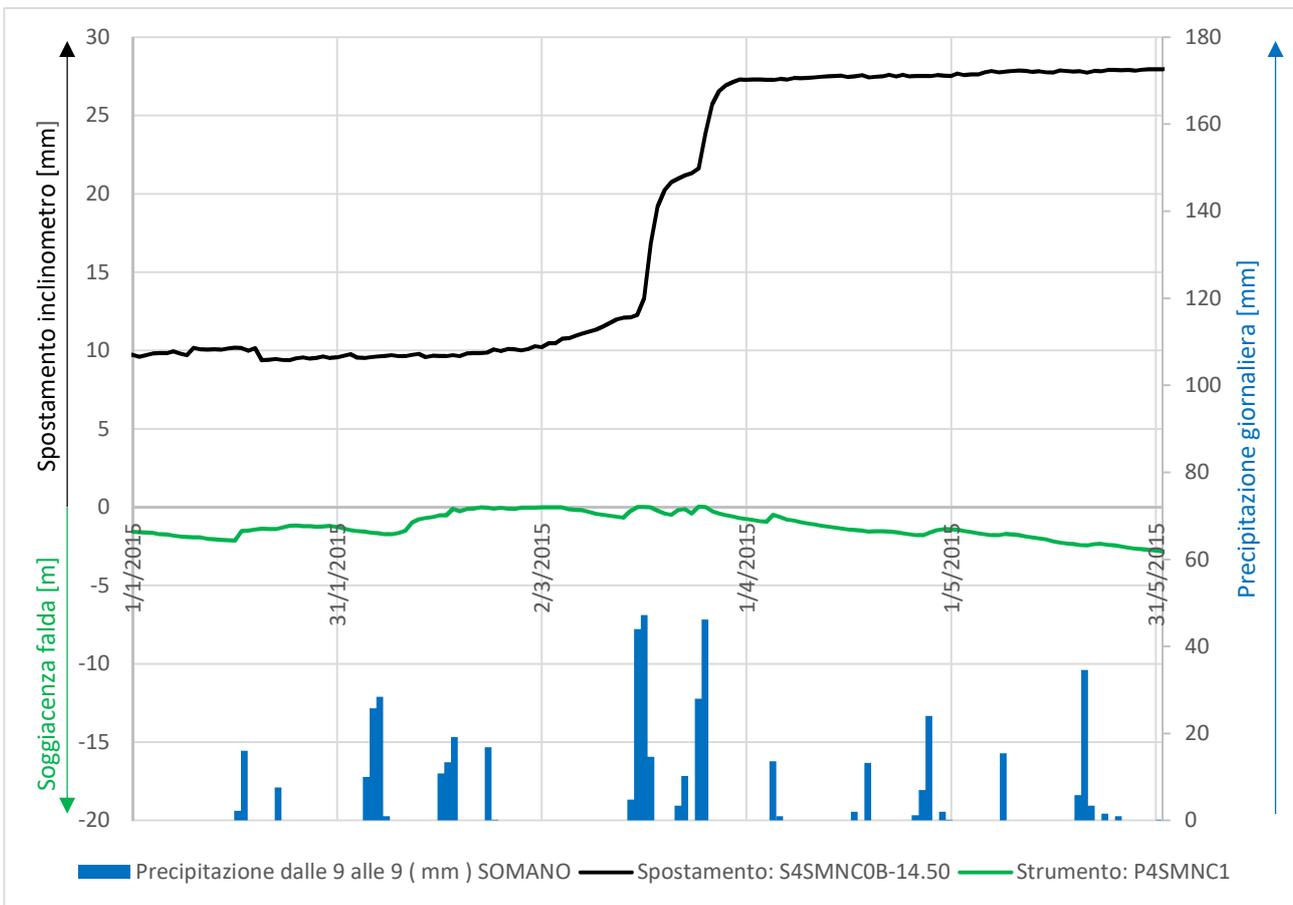


Figura 44: Esempio misure piezometro, inclinometro e pluviometro a Somano tra il 01/01/2015 e il 01/06/2015, Fonte Arpa Piemonte, <http://www.arpa.piemonte.it/>

Come si può notare in Figura 44 vi è una certa corrispondenza tra eventi pluviometrici, innalzamento della falda e infine instabilità, che si manifesta in uno spostamento. Infatti, gli eventi di precipitazioni che si sviluppano fino al 16/3/2015 comportano un innalzamento della falda fino a -0,77 m di profondità e questo scatena uno spostamento letto dall'inclinometro S4MNCA0B pari a 1,6 cm.

In Figura 45 è stata aggiunta anche la componente nevosa, infatti, come suggerito da un tecnico dell'ARPA, tale fattore non va trascurato. Come si può notare in Figura 45, in primavera, l'apporto di acqua dovuto allo sciogliersi della neve negli eventi estremi incrementa notevolmente il quantitativo totale di acqua.

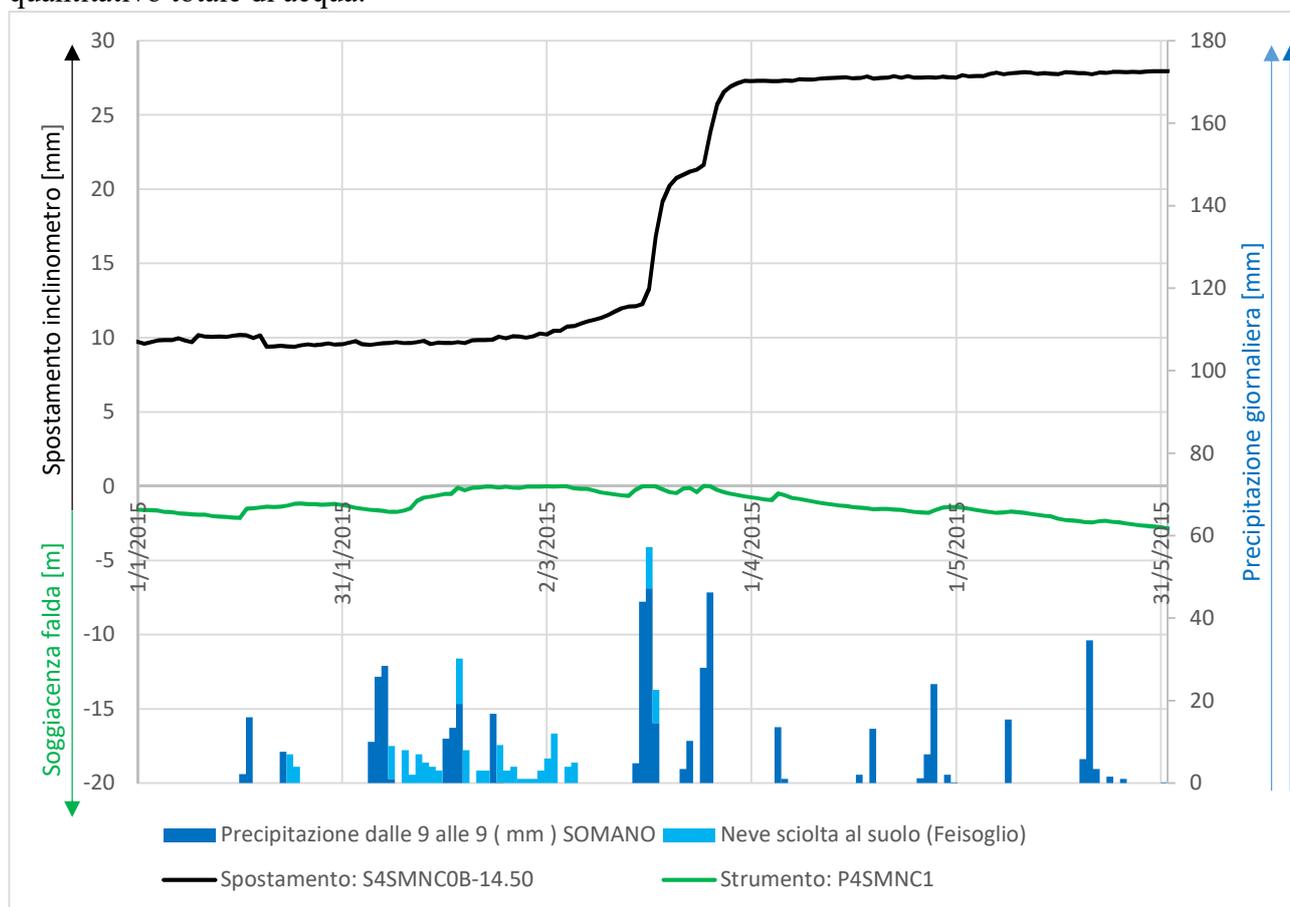


Figura 45: Esempio misure piezometro, inclinometro, pluviometro e nivometriche a Somano tra il 01/01/2015 e il 01/06/2015. (www.arpa.piemonte.it)

Per la conversione tra neve e pioggia si è adottato il rapporto descritto nel caso studio di Cissone (Paragrafo 4.2).

4.5 *SINTESI*

In questo capitolo sono stati introdotti i casi studio analizzati, che appartengono al territorio delle Langhe, e sono accomunati dalla geologia costituita da una successione di strati con litotipi prevalentemente marnoso-siltosi e giacitura isoclinale sufficientemente regolare immergente verso NW con un'inclinazione variabile tra 8° e 15°, che porta alla formazione di un paesaggio a valli asimmetriche caratterizzate da un versante a debole inclinazione conforme alla stratificazione e da uno, opposto, generalmente ripido, inciso sulla testata degli strati.

In particolare, ci si è soffermati sulla descrizione di tre casi studio di fenomeni franosi di tipo planare:

- Cissone
- Monchiero
- Somano

Essi sono stati scelti in quanto presentano misure in continuo di piezometri e inclinometri e consentiranno analisi sulla legge di infiltrazione basate su serie storiche sufficientemente prosperose e approfondite. In particolare, dall'analisi dei dati si è riscontrato come il primo caso studio sia caratterizzato da una riattivazione nel periodo tra l'autunno del 2008 e la primavera del 2009. Mentre i dati relativi al secondo caso studio sono caratterizzati da principalmente tre fenomeni di spostamento rilevati dall'inclinometro, nel 2011, 2013, 2014 e 2015. Infine, l'ultimo caso studio elencato presentasse degli errori per lunghi periodi di tempo, circa un anno, e successive operazioni di ripristino che alteravano i risultati e non consentono un'adeguata conoscenza.

5 ANALISI DEGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULL'INSTABILITA' DI VERSANTE

5.1 PREMESSA

L'analisi condotta intende mettere insieme l'approccio meccanico e quello statistico in modo tale da conferire una radice fisica al secondo metodo e aumentare l'attendibilità del risultato.

Innanzitutto, si intende costruire un modello meccanico inserendo la geometria, la stratigrafia, le proprietà geotecniche e le informazioni sulla falda. L'analisi di questo modello sarà 2D, quindi data la superficie topografica del terreno sarà scelta la sezione più caratteristica. Da questo studio si otterrà la variazione di falda che porta in condizioni limite il pendio (Δh).

L'approccio che si utilizzerà per analizzare il problema sarà agli elementi finiti ed in particolare sarà adottato il software RS2 della Rocscience. Tale programma è un software FEM, una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime a un sistema di equazioni algebriche.

Prima di effettuare l'analisi di casi studio si intende approcciare l'indagine con modelli semplificati composti da un unico strato di terreno omogeneo e caratterizzati da una geometria in cui due direzioni sono prevalenti rispetto alla terza (pendio indefinito).

Successivamente, esaminati i modelli geomeccanici, si intende applicare la legge afflussi-deflussi e quella di infiltrazione per ricondursi alle soglie di allerta. In particolare, saranno utilizzati gli approcci suggeriti dal metodo del Curve Number e del Water-Table Fluctuation. Nei modelli semplificati i parametri dei metodi di afflussi-deflussi e di infiltrazione saranno ottenuti da letteratura, infatti, grazie al fatto che entrambi i metodi scelti sono stati molto studiati, sono presenti tabelle con valori caratteristici affidabili. Invece nei casi studio la legge afflussi-deflussi e quella di infiltrazione saranno calibrate in base alle misure piezometriche e pluviometriche in sito.

Infine, si intende mettere in relazione la soglia così identificata con i risultati ottenuti dal modello geomeccanico. Tale collegamento sarà effettuato tramite il Δh , cioè la variazione della falda per cui

si ha instabilità, infatti nelle soglie di allerta possono essere inserite le precipitazioni (in termini di durata e precipitazione) che hanno causato l'instabilità di pendii e ad esse possono essere applicate le variazioni indotte dai cambiamenti climatici, una volta fatto ciò può essere ottenuta la nuova soglia di allerta (Δh_i), quest'ultimo può essere utilizzato nel modello geomeccanico per effettuare un'analisi di sensibilità dei parametri geometrici (principalmente inclinazione e lunghezza del pendio). Quindi questo studio intende verificare che impatto avrebbero i cambiamenti climatici delle precipitazioni sull'instabilità dei pendii, in particolare sull'inclinazione e sulla lunghezza dei pendii soggetti ad instabilità. Quindi per esempio capire se associato al nuovo Δh_i , vi possa essere una variazione nella magnitudo o nella frequenza dell'instabilità di alcuni pendii ed in particolare ricercare i parametri che caratterizzano questi ultimi.

Uno schema semplificato del procedimento adottato è illustrato in Figura 46.

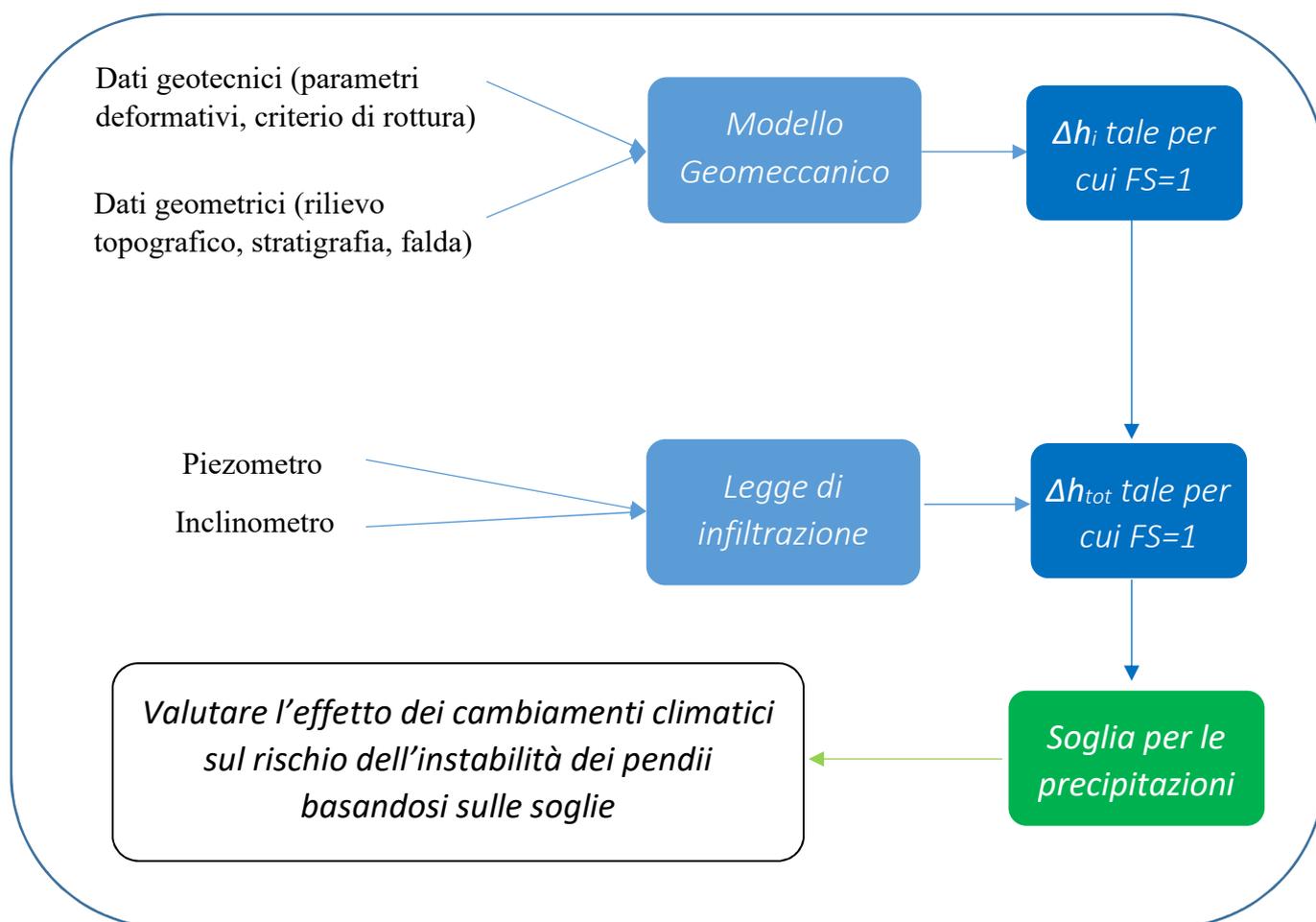


Figura 46: Schema procedura di analisi

Bisogna sempre considerare che, data la complessità del fenomeno dei cambiamenti climatici e le numerose variabili in gioco in queste analisi, sarà più opportuno valutare i risultati ottenuti in maniera relativa e non assoluta e quindi per esempio non considerare il risultato sulla pendenza del pendio (α_i) ma valutare la sua variazione ($\Delta\alpha_i$).

5.2 ANALISI MODELLO SEMPLIFICATO

5.2.1 Analisi modello geomeccanico

Data la complessità del fenomeno e le molte variabili richieste da un modello geomeccanico inizialmente si è studiato il caso più semplice e cioè quello di pendio indefinito quindi deformazione piana, inclinazione del pendio costante, terreno omogeneo ed isotropo. Su questo modello si è cercato di analizzare l'influenza dei principali parametri:

- L lunghezza orizzontale del pendio
- α angolo di inclinazione del pendio
- H soggiacenza della falda rispetto al piano campagna a monte

Per quanto riguarda la falda si è assunto un andamento semplificato lineare suddiviso principalmente in tre tratti: costante e coincidente con il piano campagna a valle, costante e ad una profondità H rispetto al piano campagna a monte ed infine variabile linearmente lungo il pendio in modo da congiungere gli altri due tratti. I principali parametri possono essere osservati graficamente in Figura 47.

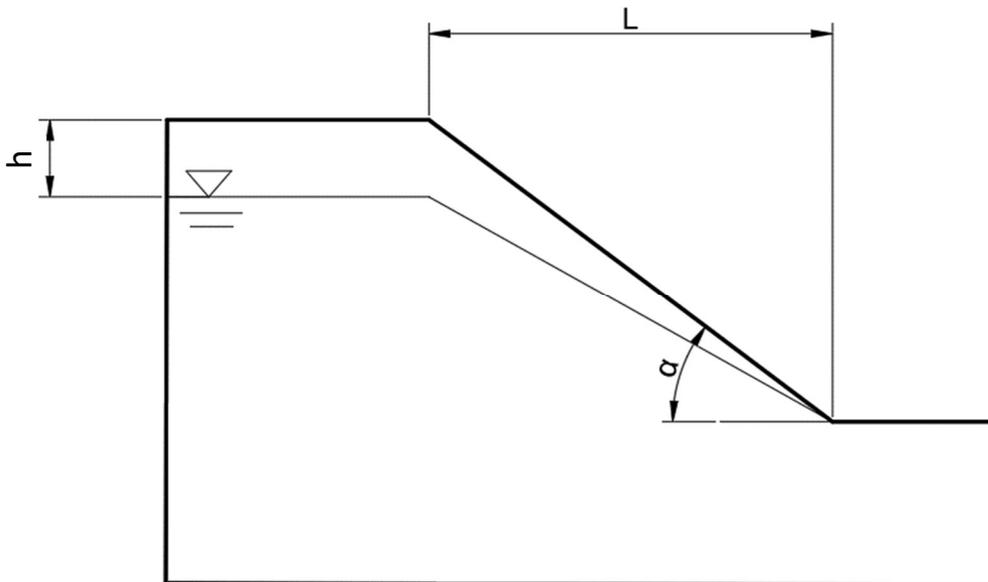


Figura 47: Schema geometrico del modello semplificato

L'obiettivo di questo modello è valutare l'influenza della falda sul fattore di sicurezza, dal momento che la variazione di falda è la principale conseguenza di eventi piovosi a loro volta influenzati dai cambiamenti climatici.

In questa prima fase sono state selezionate quattro tipologie di materiale ed i relativi parametri caratteristici rappresentativi, riportati in Tabella 11.

Tabella 11: Valori geotecnici rappresentativi dei quattro principali terreni

	γ (kN/m ³)	φ (°)	c (MPa)	E (MPa)	ν (-)
Ghiaia	19	35	0	20	0.4
Sabbia	17	32	0	17.64	0.3
Limo	18	27	0.01	9.8	0.3
Argilla	20	22	0.03	34.3	0.2

In Figura 48 sono mostrate le dimensioni geometriche del modello FEM utilizzato nelle analisi, tali parametri sono stati scelti in modo tale che le condizioni al contorno non influenzassero il risultato.

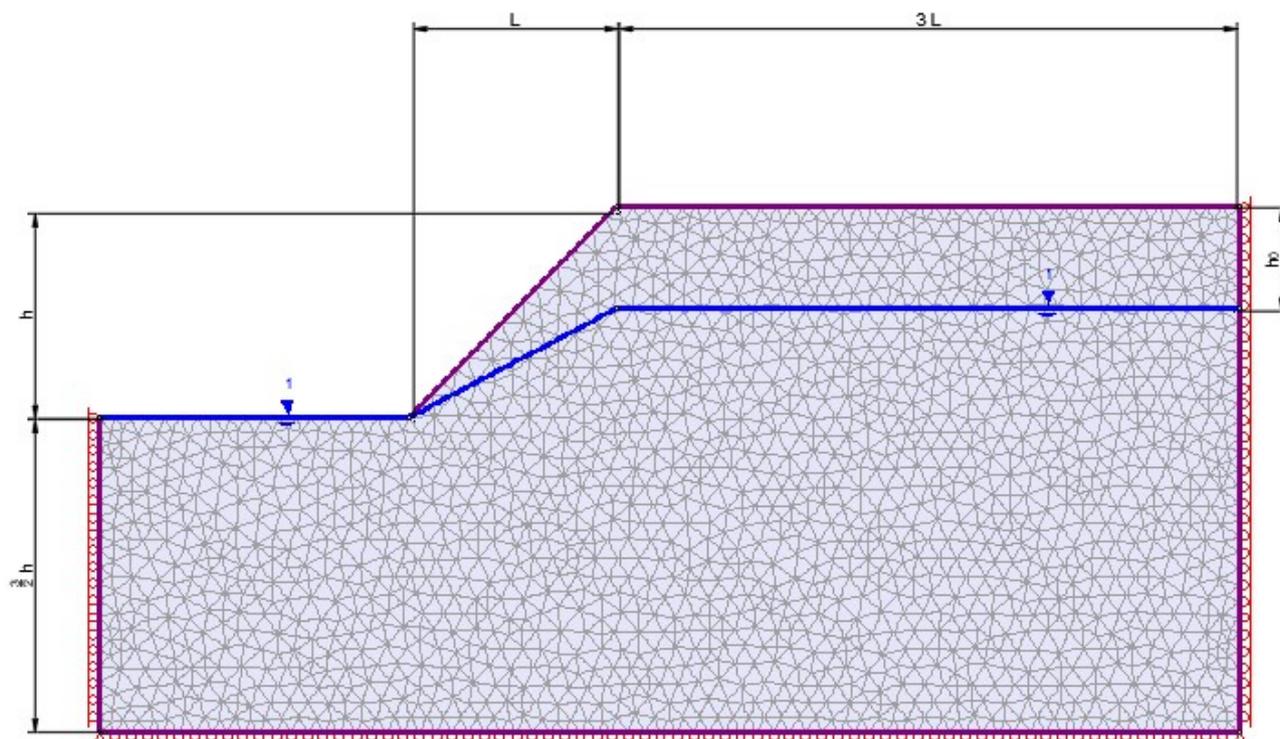


Figura 48: Schema modello FEM con indicazioni geometriche

Per quanto riguarda la mesh, è stata scelta in modo tale che la superficie critica risentisse il meno possibile della discretizzazione del continuo. Per calcolare il fattore di sicurezza del pendio è stato adottato il metodo dello SRF (strength reduction factor) e per fare ciò è stata utilizzata una legge costitutiva del materiale elasticamente perfettamente plastico.

In Figura 49 è riportato a scopo esemplificativo un tipico output delle analisi.

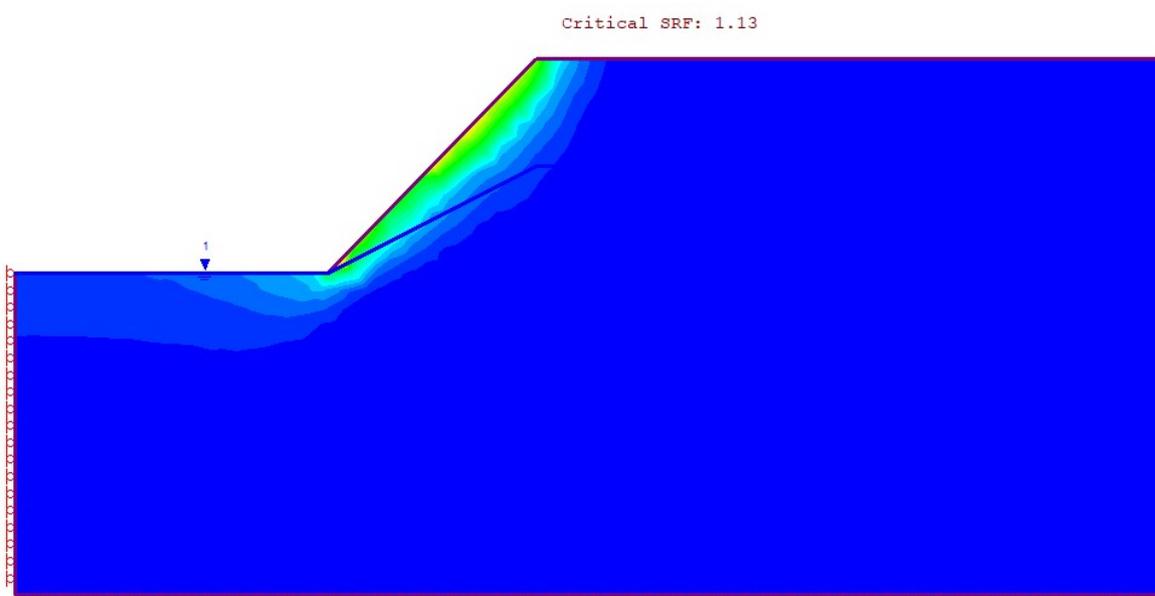


Figura 49: Esempio di output analisi

Inizialmente si è fatta variare l'inclinazione del pendio con un intervallo di 10° tra 10° e 50° in modo tale da identificare quali pendii con determinate inclinazioni potessero essere portati a collasso dall'incremento della falda. Queste prime analisi sono state eseguite mantenendo costante il valore di L , pari a 20 m. Per una prima scrematura sono stati analizzati pendii saturi e pendii senza falda in modo tale da verificare che la condizione peggiore (falda coincidente con piano campagna) comportasse il collasso e quindi facesse passare il fattore di sicurezza sotto l'unità.

Come si può notare dalla Figura 50, solo nella zona tra 20° e 50° il pendio presenta le caratteristiche richieste mentre se l'angolo α è minore di 20° il pendio risulta stabile anche nella condizione di terreno completamente saturo, al contrario se α è maggiore di 50° il pendio è instabile anche senza la minima presenza di acqua. Questo range individuato sarà più ristretto per ogni materiale, ciò consentirà di ridurre il numero di analisi.

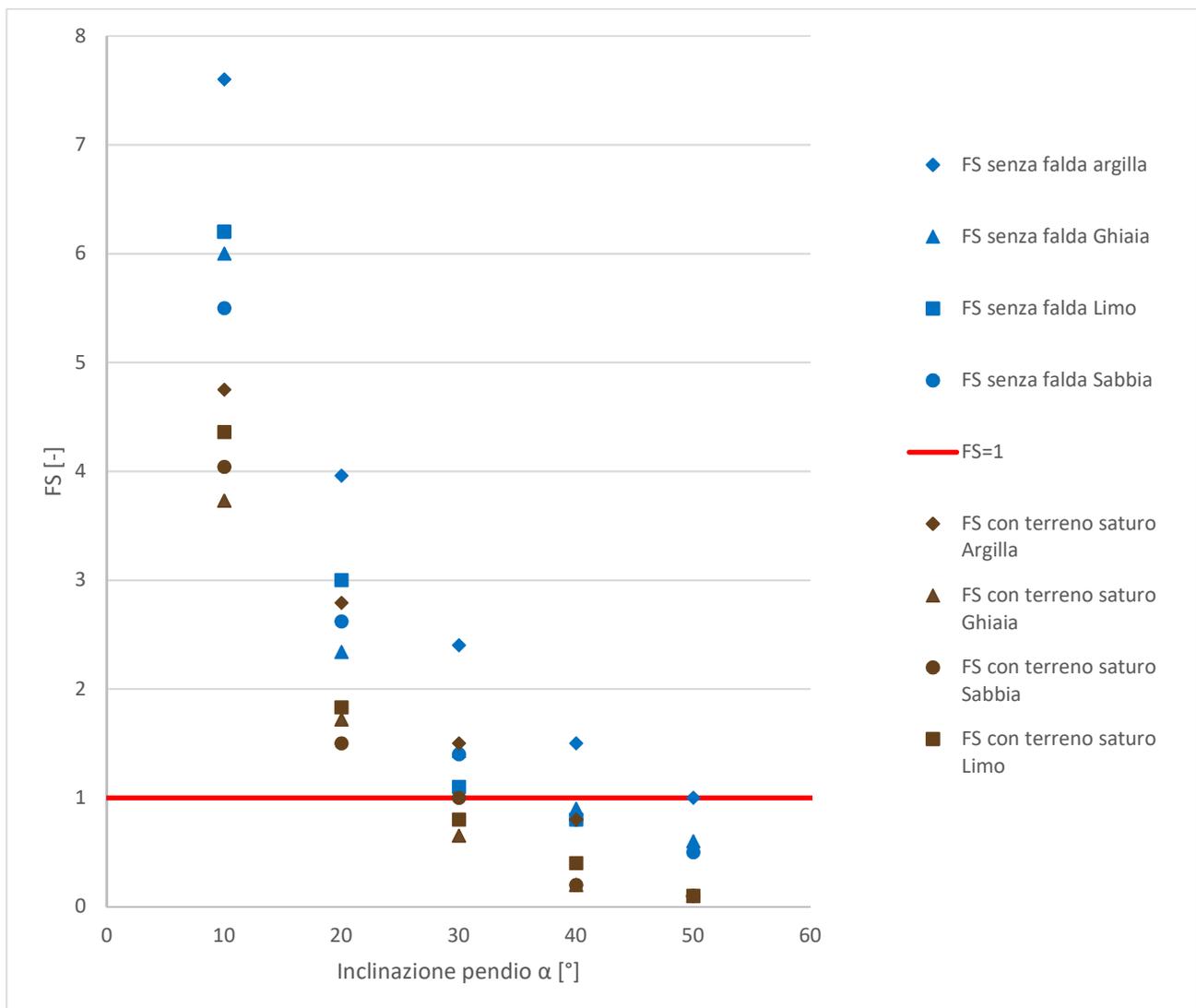


Figura 50: confronto FS – α con L costante pari a 20 m per le diverse tipologie di terreno elencate in Tabella 11

Così ristretto il range di analisi del parametro α successivamente si è approfondito lo studio nell'intervallo identificato andando a esaminare materiale per materiale la risposta.

GHIAIA

Inizialmente si è studiata l'influenza del parametro α (inclinazione del pendio) nel range tra 20° e 40° con condizioni di materiale e lunghezza L costanti. Si è così ottenuto il grafico in Figura 51.

Il limite superiore è stato scelto pari a 40° poiché durante le analisi si è notato che il pendio con tale inclinazione e senza la falda aveva un coefficiente minore di uno.

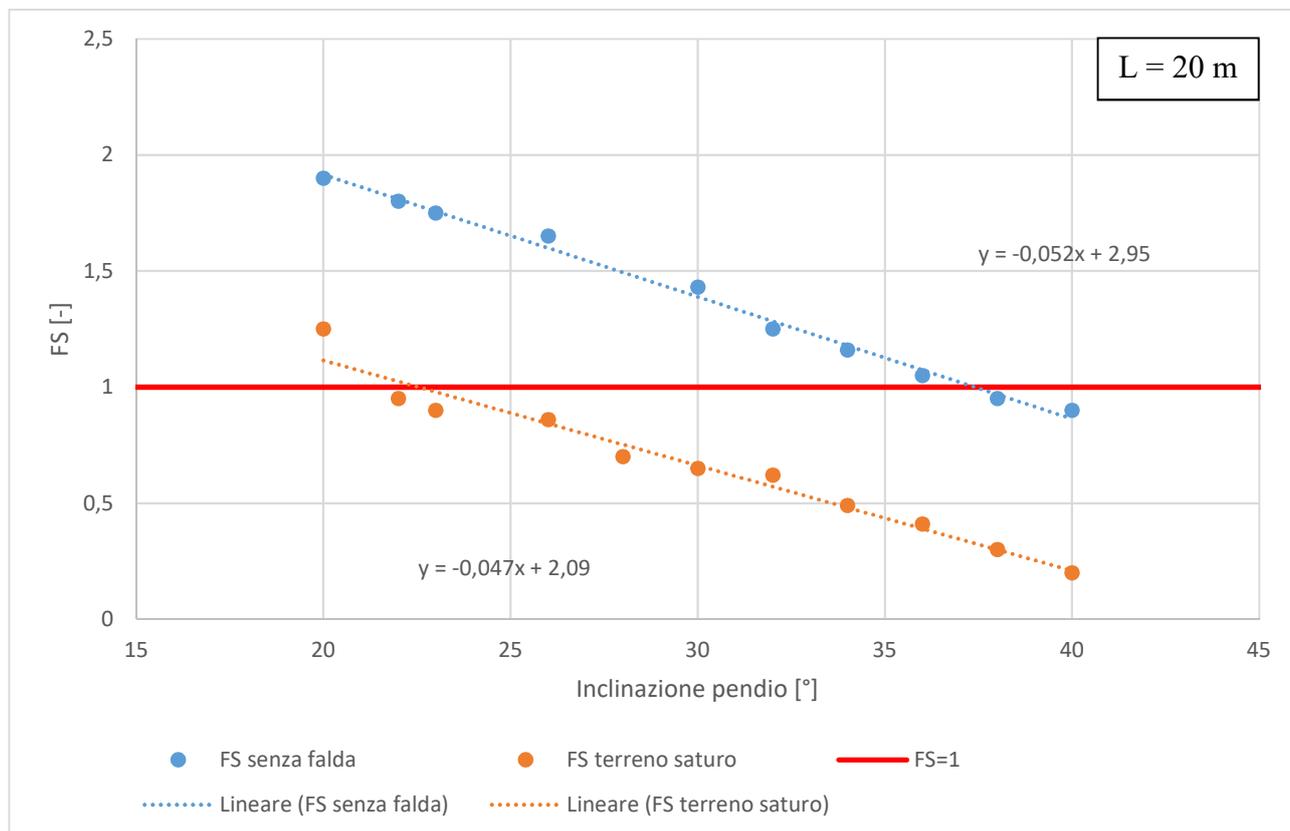


Figura 51: Influenza di α sul FS (Ghiaia)

Come si può notare i punti, che rappresentano gli output dei vari modelli, si allineano con una buona corrispondenza. Le due linee che interpolano le due condizioni, con e senza falda, sono quasi parallele ed hanno una pendenza pari a circa 3° .

Dai casi analizzati il range di α che individua pendii in ghiaia in cui la variazione di falda può causare l'instabilità è pari a:

$$\alpha = 23^\circ \div 37^\circ$$

Tale range però non tiene in conto che nella realtà le precipitazioni sono in grado di apportare solo un certo quantitativo di acqua e inoltre quest'ultimo non si convertirà interamente in un Δh della falda poiché solo parte di esso sarà assorbito dal terreno mentre un'altra parte diventerà acqua di ruscellamento. Quindi i pendii che richiederanno un alto quantitativo di acqua per instabilizzarsi, anche se teoricamente possibile, nella realtà tale fenomeno è altamente improbabile.

Successivamente è stata studiata l'influenza del parametro L (lunghezza orizzontale del pendio).

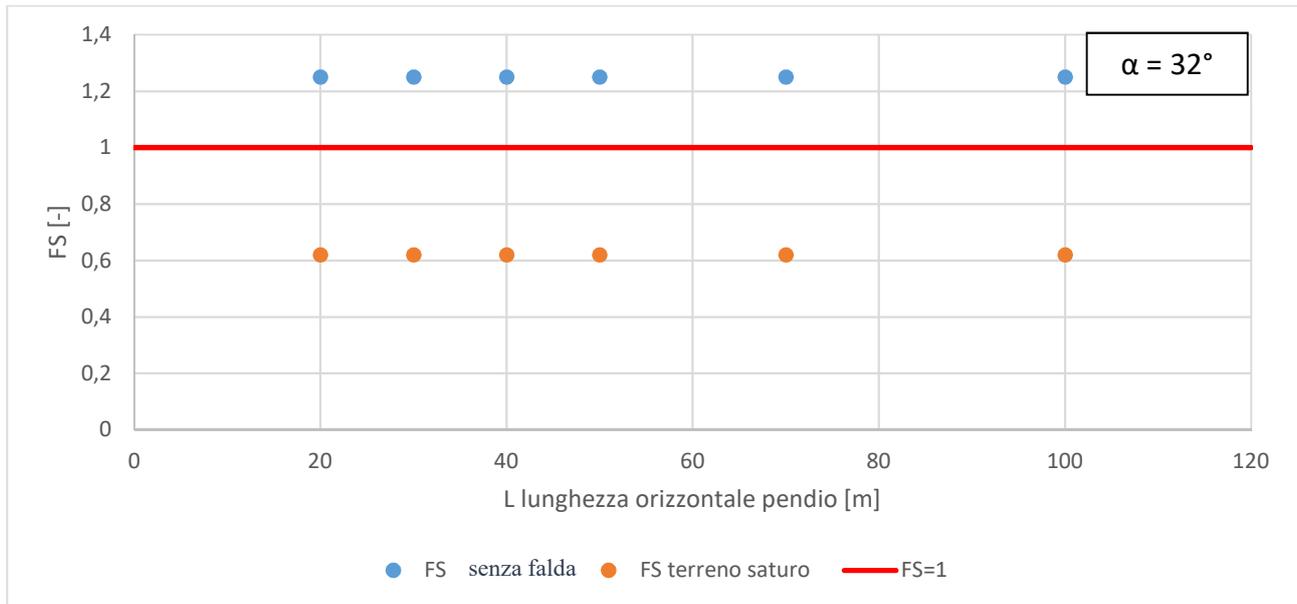


Figura 52: Influenza di L sul FS (Ghiaia)

Come si può notare dal grafico in Figura 52 il parametro analizzato non influenza il risultato, infatti la ghiaia è un materiale non coesivo.

Infine, intersecando i risultati della prima e della seconda analisi di influenza si può creare un grafico come quello in Figura 53, in cui l'area rossa rappresenta l'insieme delle combinazioni L- α tali per cui i pendii possano essere portati a collasso da un incremento della falda.

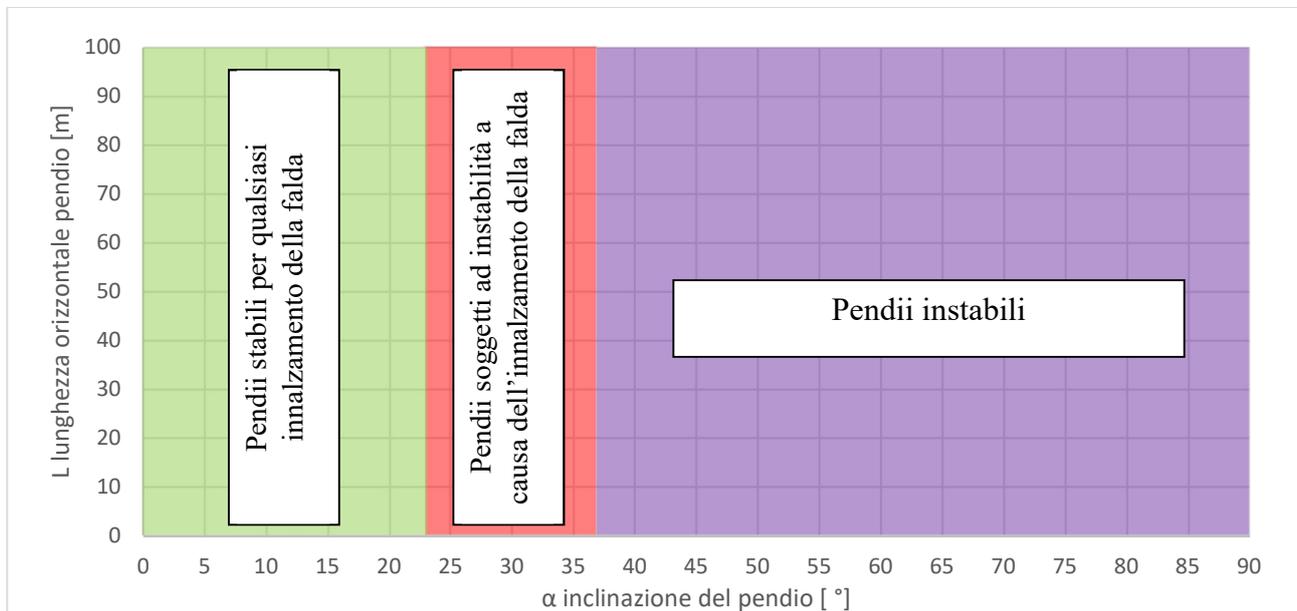


Figura 53: Ruolo della geometria sulla condizione di stabilità di un pendio in ghiaia

Tale area risulta formare un rettangolo con altezza indefinita poiché il parametro L non influenza l'analisi di un pendio con materiale non coesivo quale la ghiaia.

Infine, nel range così ottenuto si è studiata la variazione Δh della falda che porta al collasso. Per effettuare quest'analisi ci si è basati su un'ipotesi e cioè che il pendio già originariamente non abbia un grande margine di sicurezza.

Considerando come situazione iniziale una soggiacenza della falda h_0 costante rispetto a monte allora questa analisi sarà più locale in quanto i risultati dipenderanno dal valore ipotizzato di h_0 ma come si può notare dal grafico in Figura 54 i valori si allineano con una buona precisione. In Figura 54 è stato ipotizzato un valore di $h_0=4,2$ m. Tale valore risulterà essere quello per cui $\Delta h=0$ al limite destro.

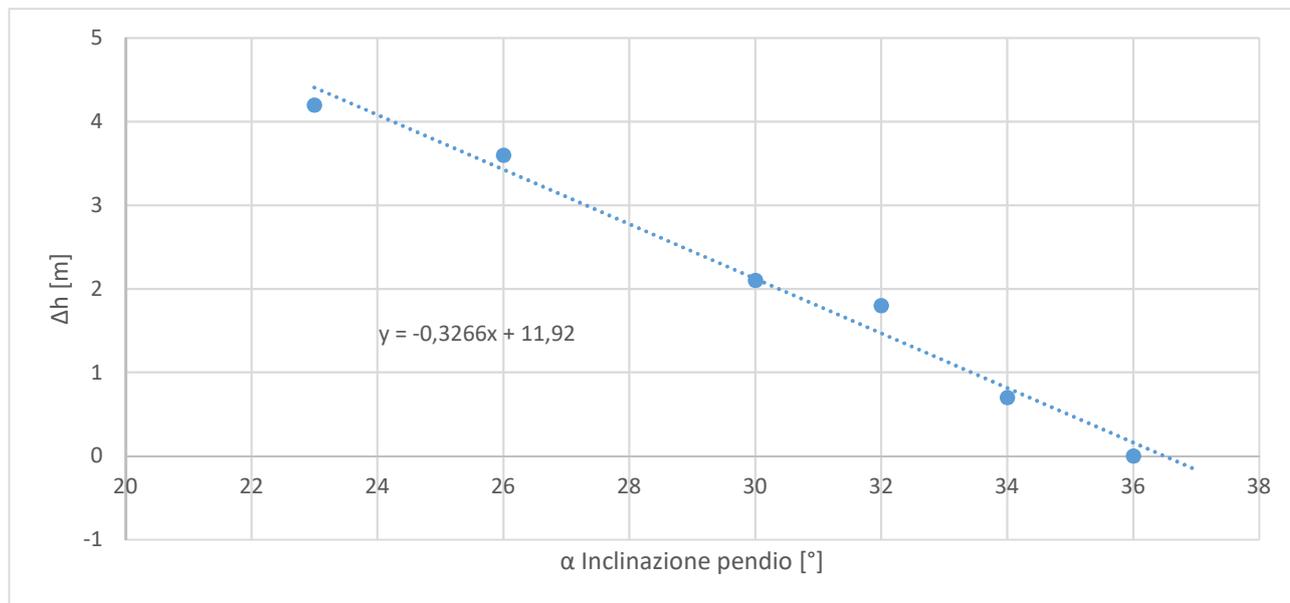


Figura 54: Δh al variare di α , considerando una posizione originaria della falda con soggiacenza rispetto a monte pari a 4,2m. Analisi effettuate con $L=20$ m.

Infine se si interpolano i risultati così ottenuti si può ottenere una legge per mettere in relazione i due fattori analizzati:

$$\Delta h (h_0=4,2\text{m}) = -0,33 \alpha + 11,92$$

Considerando una variazione dell'inclinazione tra 23° e 37° come definita precedentemente allora si otterrà un limite massimo di 4,2 m e un limite minimo di 0 m. Si può quindi notare come tale intervallo si possa generalizzare come $h_0 \div 0$ m, infatti 4,2 metri era proprio il valore ipotizzato inizialmente.

SABBIA

Inizialmente si è studiata l'influenza del parametro α (inclinazione del pendio) con condizioni di materiale e lunghezza L costanti. Si è così ottenuto il grafico in Figura 55.

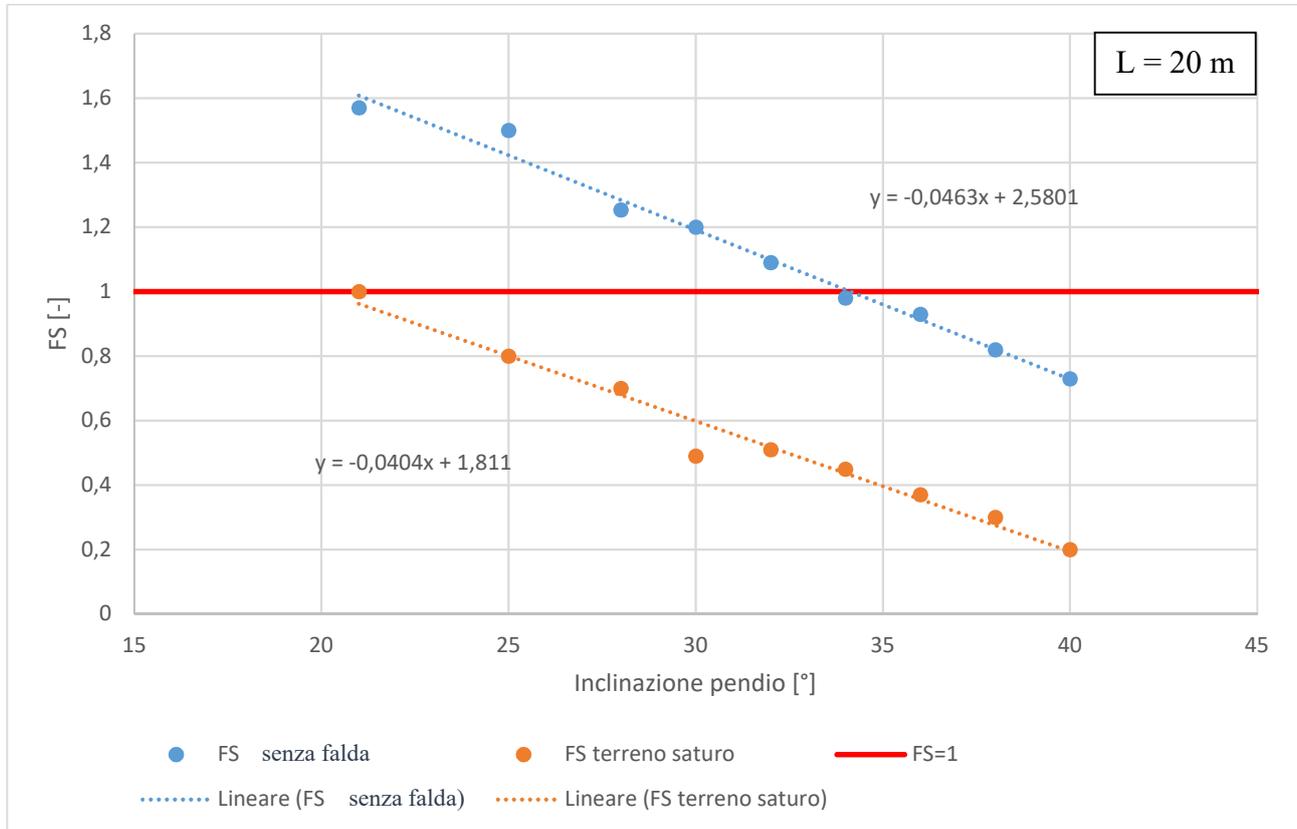


Figura 55: Influenza di α sul FS (Sabbia)

Come si può notare i punti, che rappresentano gli output dei vari modelli, si allineano con una buona corrispondenza. Le due linee che interpolano le due condizioni, con e senza falda, sono quasi parallele ed hanno una pendenza pari a circa $2,5^\circ$.

Dai casi analizzati il range di α che individua pendii in ghiaia in cui la variazione di falda può causare l'instabilità è pari a:

$$\alpha = 21^\circ \div 34^\circ$$

Tale intervallo però non tiene in conto che nella realtà le precipitazioni sono in grado di apportare solo un certo quantitativo di acqua e inoltre quest'ultimo non si convertirà interamente in un Δh della falda poiché solo parte di esso sarà assorbito dal terreno mentre un'altra parte diventerà acqua di ruscellamento. Quindi i pendii che richiederanno un alto quantitativo di acqua per instabilizzarsi, anche se teoricamente possibile, nella realtà tale fenomeno è altamente improbabile.

Successivamente è stata studiata l'influenza del parametro L (lunghezza orizzontale del pendio).

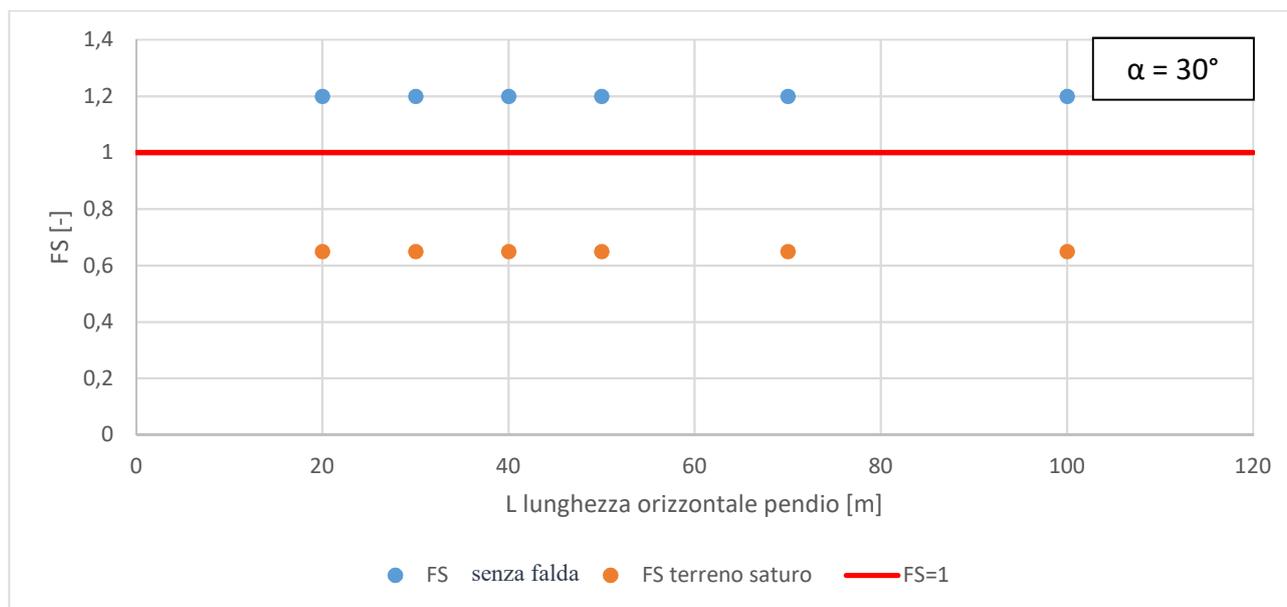


Figura 56: Influenza di L sul FS (Sabbia)

Come si può notare dal grafico in Figura 56, il parametro analizzato non influenza il risultato, infatti la sabbia è un materiale non coesivo.

Infine, intersecando i risultati della prima e della seconda analisi di influenza si può creare un grafico come quello in Figura 57, in cui l'area rossa rappresenta l'insieme delle combinazioni L- α tali per cui i pendii possano essere portati a collasso da un incremento della falda.

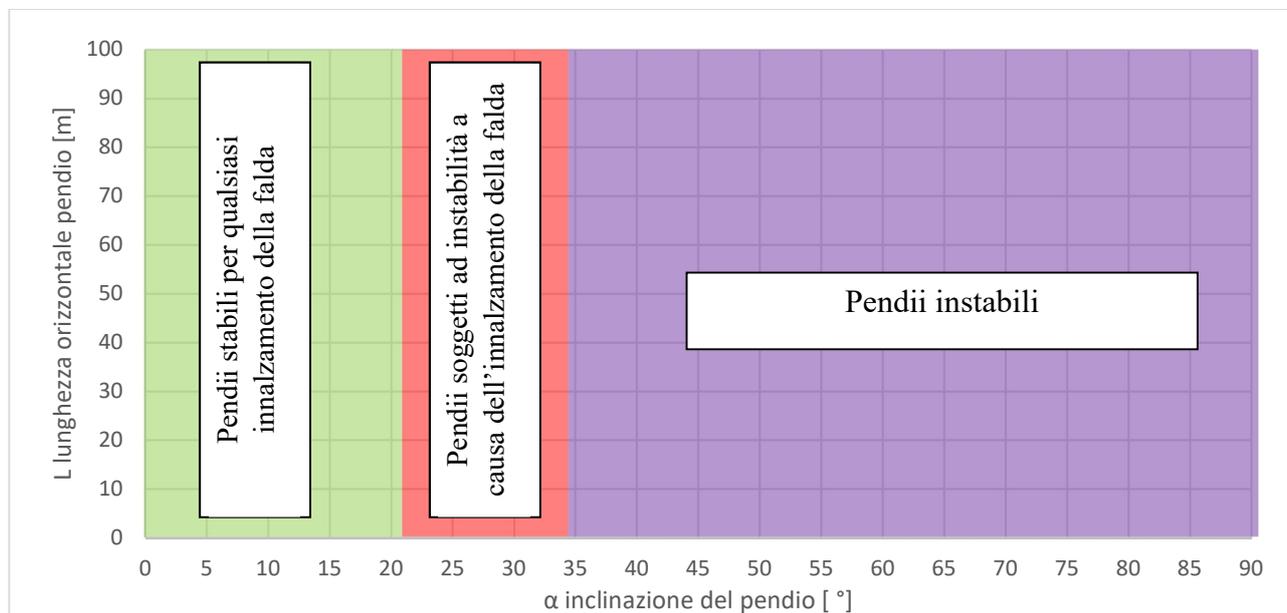


Figura 57: Ruolo della geometria sulla condizione di stabilità di un pendio in sabbia.

Tale area risulta formare un rettangolo con altezza indefinita poiché il parametro L non influenza l'analisi di un pendio con materiale non coesivo quale la sabbia.

Infine, nel range così ottenuto si è studiata la variazione Δh della falda che porta al collasso. Per effettuare questa analisi ci si è basati su un'ipotesi e cioè che il pendio già originariamente non abbia un grande margine di sicurezza.

Considerando come situazione iniziale una soggiacenza della falda H_0 costante rispetto a monte allora questa analisi sarà più locale in quanto i risultati dipenderanno dal valore ipotizzato di H_0 ma come si può notare dal grafico in Figura 58 i valori si allineano con una buona precisione e non si ha il ramo crescente del grafico visto in precedenza. In Figura 58 è stato ipotizzato un valore di $H_0=7,5$ m.

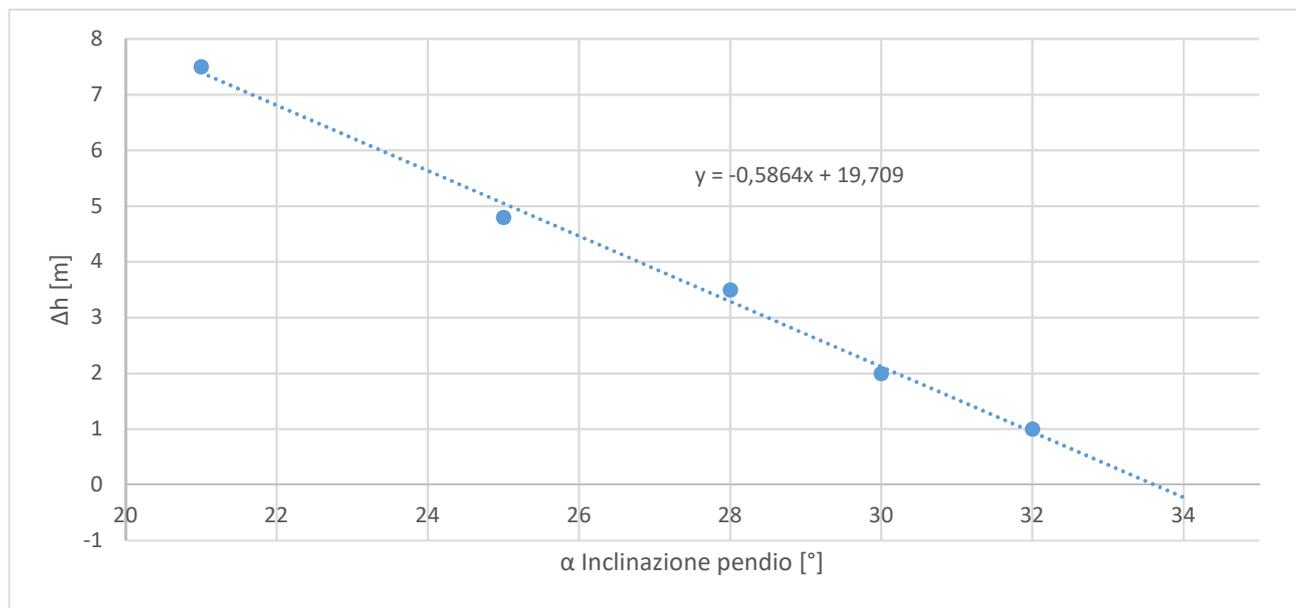


Figura 58: Δh al variare di α , considerando una posizione originaria della falda con soggiacenza rispetto a monte pari a 7,5m. Analisi effettuate con $L=20$ m.

Infine se si interpolando i risultati così ottenuti si può ottenere una legge per mettere in relazione i due fattori analizzati:

$$\Delta h (h_0=7,5\text{m}) = -0,59 \alpha + 19,71$$

Considerando una variazione dell'inclinazione tra 21° e 34° come definita precedentemente allora si otterrà un limite massimo di 7,5 m e un limite minimo di 0 m. Si può quindi notare come tale intervallo si possa generalizzare come $h_0 \div 0$ m, infatti 7,5 metri era proprio il valore ipotizzato inizialmente.

Inoltre confrontando i risultati ottenuti per la sabbia con quelli ottenuti per la ghiaia si può osservare come l'inclinazione della retta interpolante della sabbia (Figura 59) sia più accentuata (30°) rispetto a quella della ghiaia (Figura 54, 18°) e ciò è da ricondursi all'angolo di attrito dei due materiali, dato che entrambi hanno coesione nulla.

LIMO

Inizialmente si è studiata l'influenza del parametro α (inclinazione del pendio) con condizioni di materiale e lunghezza L costanti. Si è così ottenuto il grafico in Figura 59.

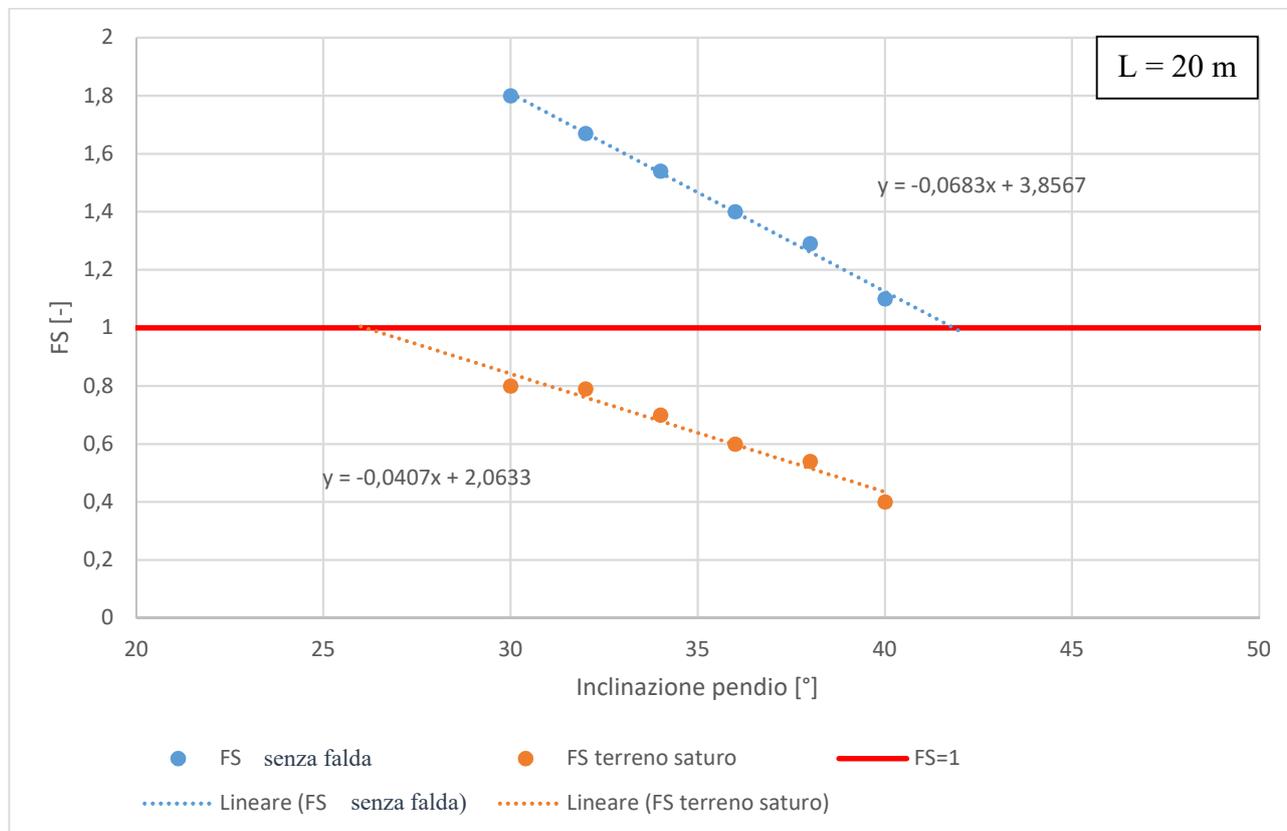


Figura 59: Influenza di α sul FS (Limo)

Come si può notare i punti, che rappresentano gli output dei vari modelli, si allineano con una buona corrispondenza. Le due linee che interpolano le due condizioni, con e senza falda, sono quasi parallele ed hanno una pendenza pari a circa 3° .

Dai casi analizzati il range di α che individua pendii in limo in cui la variazione di falda può causare l'instabilità è pari a:

$$\text{per } L = 20 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \alpha = 26^\circ \div 42^\circ$$

Come si potrà notare dalle analisi successive quest'ultimo range è variabile a seconda della lunghezza orizzontale L del pendio quindi non si può confrontare localmente tale intervallo con quello dei materiali non coesivi ma bisogna considerare anche l'influenza di L come verrà fatto successivamente.

Inoltre, tale intervallo però non tiene in conto che nella realtà le precipitazioni sono in grado di apportare solo un certo quantitativo di acqua e inoltre quest'ultimo non si convertirà interamente in un Δh della falda poiché solo parte di esso sarà assorbito dal terreno mentre un'altra parte diventerà acqua di ruscellamento. Quindi i pendii che richiederanno un alto quantitativo di acqua per instabilizzarsi, anche se teoricamente possibile, nella realtà tale fenomeno è altamente improbabile.

Successivamente è stata studiata l'influenza del parametro L (lunghezza orizzontale del pendio).

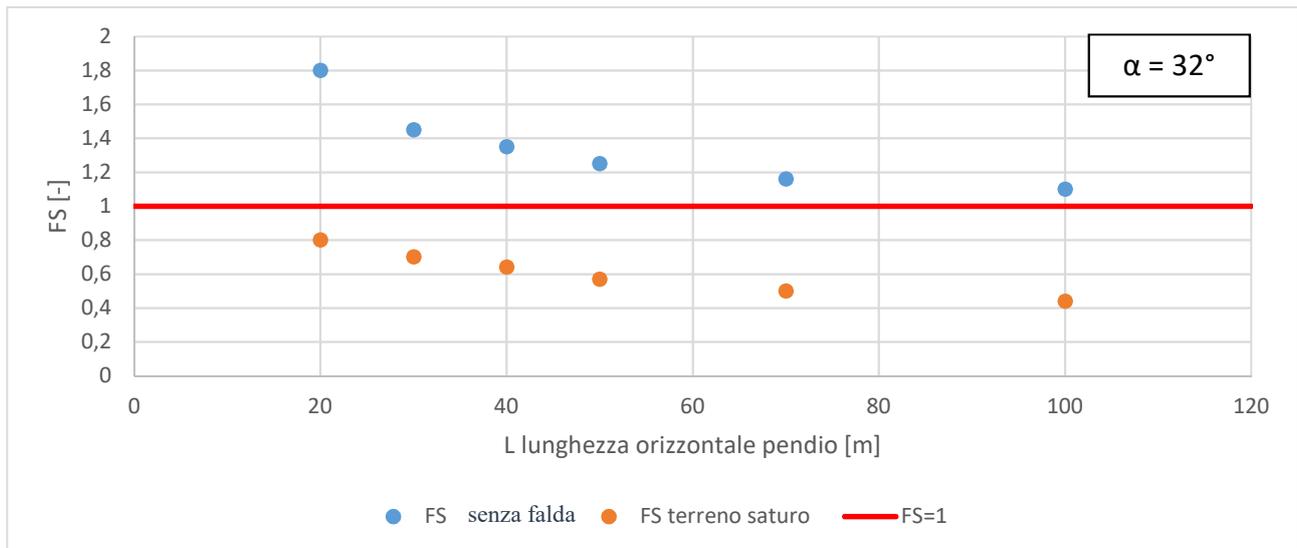


Figura 60: Influenza di L sul FS (Limo)

Come si può notare dal grafico in Figura 60, il parametro analizzato influenza il risultato, infatti il limo è un materiale coesivo quindi si può notare come all'aumentare della lunghezza L l'effetto della coesione diminuisca e i fattori di sicurezza tendano a diminuire.

Infine, intersecando i risultati della prima analisi e con quelli ottenuti ripetendola per L diversi (20, 25, 50, 100) si può creare un grafico come quello in Figura 61, in cui l'area rossa rappresenta l'insieme delle combinazioni L- α tali per cui i pendii possano essere portati a collasso da un incremento della falda.

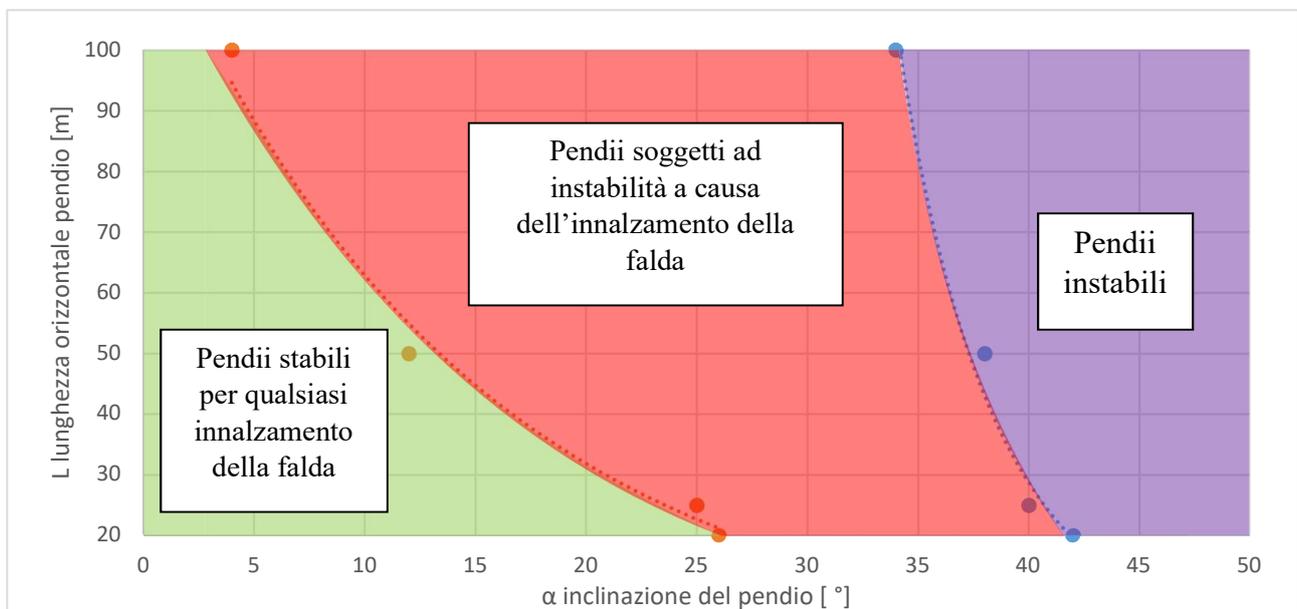


Figura 61: Ruolo della geometria sulla condizione di stabilità di un pendio in limo.

Tale area risulta variare con altezza poiché il parametro L influenza l'analisi di un pendio con materiale coesivo quale il limo.

Infine, data la variabilità del range così ottenuto si è studiata la variazione Δh della falda, per una lunghezza $L=20m$, che porta al collasso. Per effettuare questa analisi ci si è basati su un'ipotesi e cioè che il pendio già originariamente non abbia un grande margine di sicurezza.

Considerando come situazione iniziale una soggiacenza della falda h_0 costante rispetto a monte allora questa analisi sarà più locale in quanto i risultati dipenderanno dal valore ipotizzato di h_0 ma come si può notare dal grafico in Figura 62 i valori si allineano con una buona precisione e non si ha il ramo crescente del grafico visto in precedenza. In Figura 62 è stato ipotizzato un valore di $h_0=7,4$ m.

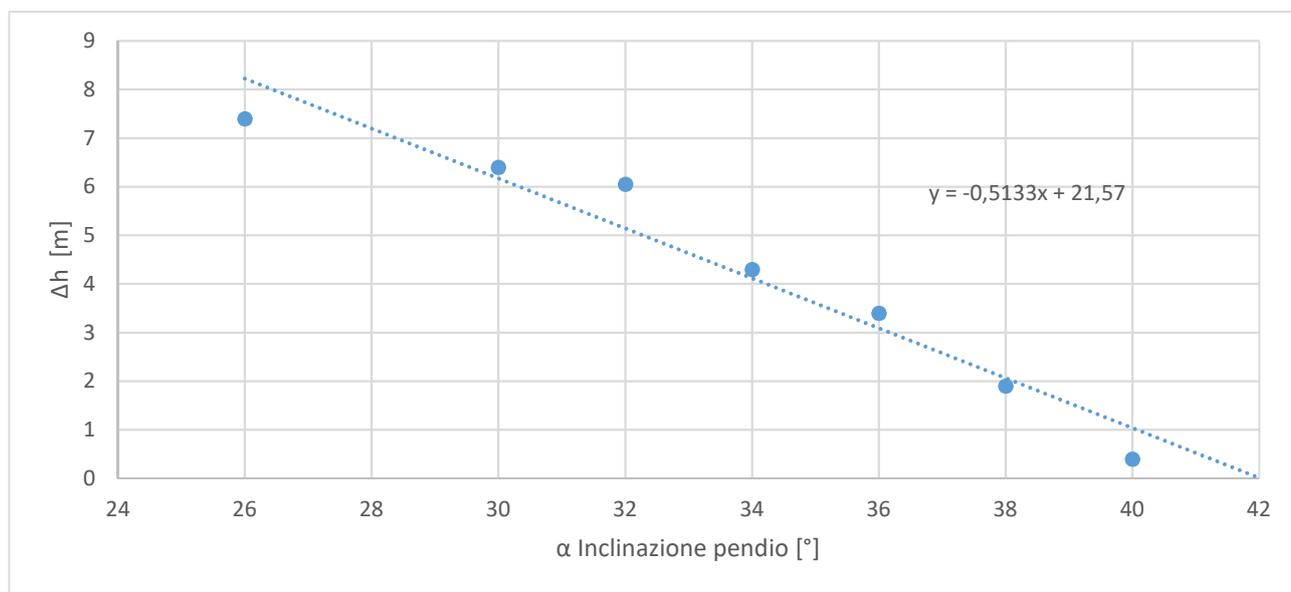


Figura 62: Δh al variare di α , considerando una posizione originaria della falda con soggiacenza rispetto a monte pari a 7,4m. Analisi effettuate con $L=20m$.

Infine se si interpolano i risultati così ottenuti si può ottenere una legge per mettere in relazione i due fattori analizzati:

$$\Delta h (h_0=7,4m) = - 0,51 \alpha + 21,57$$

Considerando una variazione dell'inclinazione tra 26° e 42° come definita precedentemente allora si otterrà un limite massimo di 7,4 m e un limite minimo di 0 m. Si può quindi notare come tale intervallo si possa generalizzare come $h_0 \div 0$ m, infatti 7,4 metri era proprio il valore ipotizzato inizialmente.

ARGILLA

Inizialmente si è studiata l'influenza del parametro α (inclinazione del pendio) con condizioni di materiale e lunghezza L costanti. Si è così ottenuto il grafico in Figura 63.

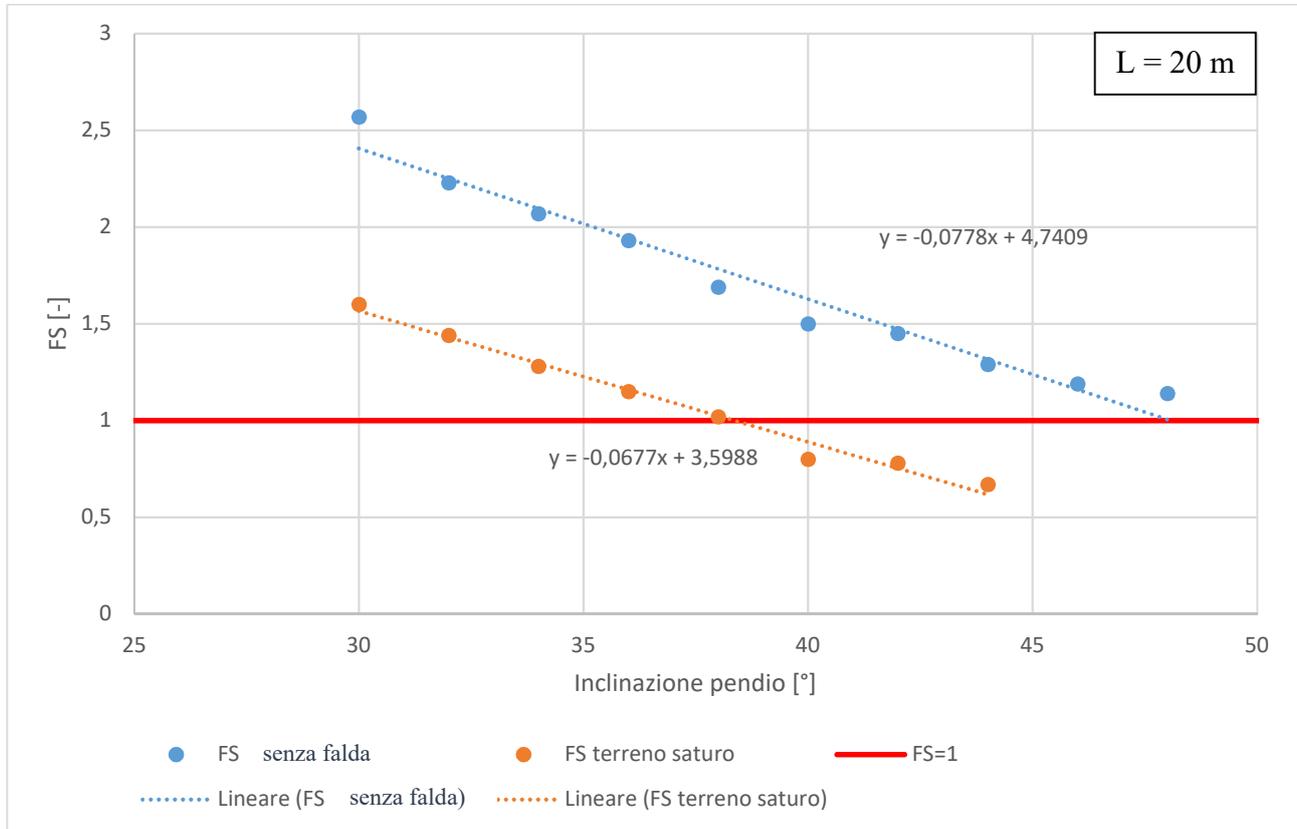


Figura 63: Influenza di α sul FS (Argilla)

Come si può notare i punti, che rappresentano gli output dei vari modelli, si allineano con una buona corrispondenza. Le due linee che interpolano le due condizioni, con e senza falda, sono quasi parallele ed hanno una pendenza pari a circa 4° .

Dai casi analizzati il range di α che individua pendii in ghiaia in cui la variazione di falda può causare l'instabilità è pari a:

$$\text{per } L = 20 \text{ m} \quad \rightarrow \quad \alpha = 38^{\circ} \div 48^{\circ}$$

Come si potrà notare dalle analisi successive quest'ultimo range è variabile a seconda della lunghezza orizzontale L del pendio quindi non si può confrontare localmente tale intervallo con quello dei materiali non coesivi ma bisogna considerare anche l'influenza di L come verrà fatto successivamente.

Inoltre, tale intervallo però non tiene in conto che nella realtà le precipitazioni sono in grado di apportare solo un certo quantitativo di acqua e inoltre quest'ultimo non si convertirà interamente in un Δh della falda poiché solo parte di esso sarà assorbito dal terreno mentre un'altra parte diventerà acqua di ruscellamento. Quindi i pendii che richiederanno un alto quantitativo di acqua per instabilizzarsi, anche se teoricamente possibile, nella realtà tale fenomeno è altamente improbabile.

Successivamente è stata studiata l'influenza del parametro L (lunghezza orizzontale del pendio).

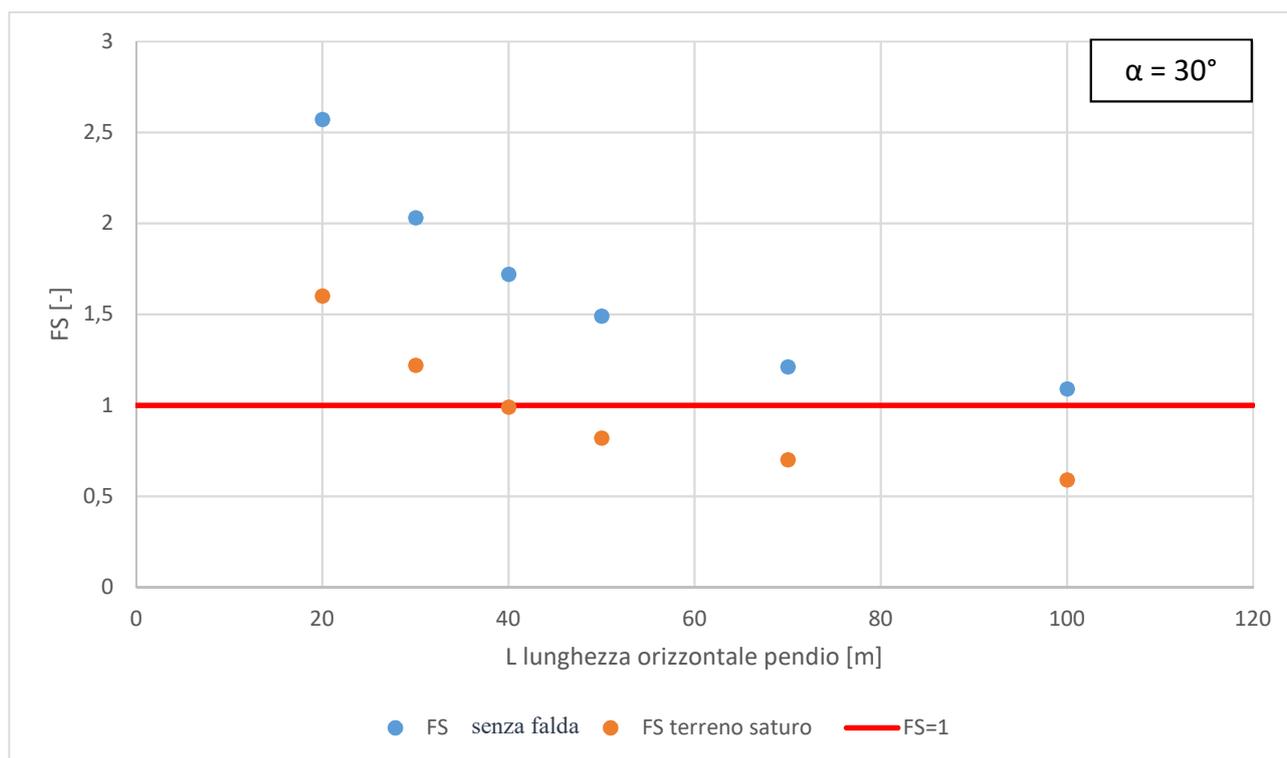


Figura 64: Influenza di L sul FS (Argilla)

Come si può notare dal grafico in Figura 64, il parametro analizzato influenza il risultato, infatti l'argilla è un materiale coesivo quindi si può notare come all'aumentare della lunghezza L l'effetto della coesione diminuisca e i fattori di sicurezza traslino verticalmente verso il basso di una quantità costante per tutti gli angoli analizzati.

Infine, intersecando i risultati della prima analisi e con quelli ottenuti ripetendola per L diversi (20, 25, 50, 100) si può creare un grafico come quello in Figura 65, in cui l'area rossa rappresenta l'insieme delle combinazioni L- α tali per cui i pendii possano essere portati a collasso da un incremento della falda.

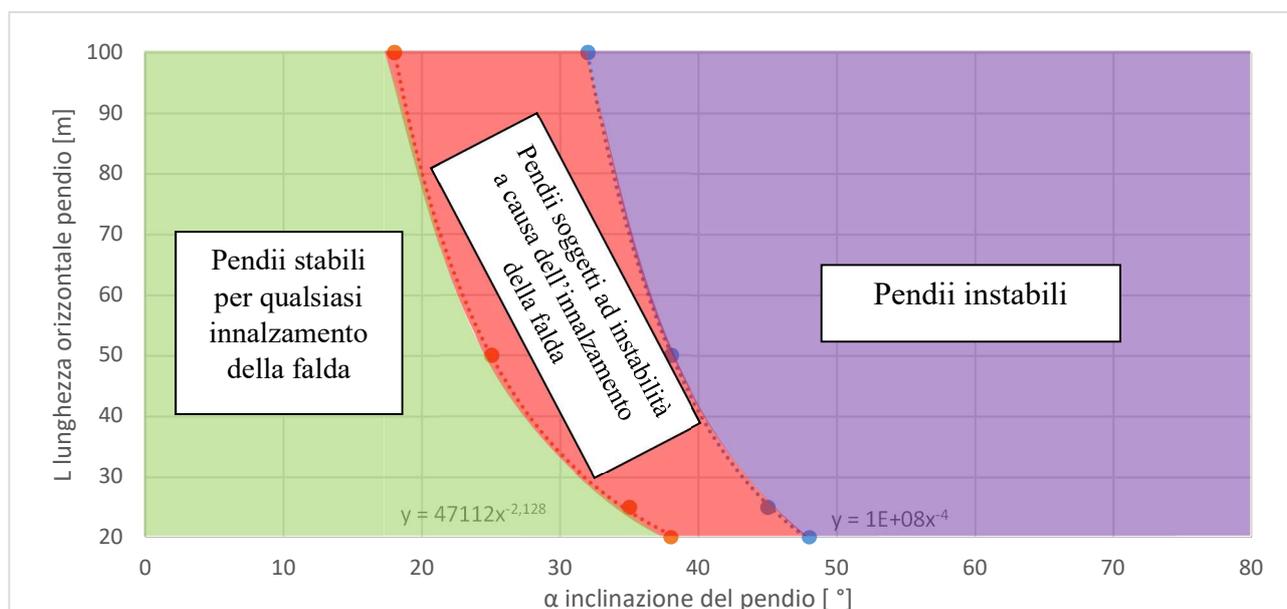


Figura 65: Ruolo della geometria sulla condizione di stabilità di un pendio in argilla.

Tale area risulta variare con altezza poiché il parametro L influenza l'analisi di un pendio con materiale coesivo quale l'argilla.

Infine, data la variabilità del range così ottenuto si è studiata la variazione Δh della falda, per una lunghezza $L=20\text{m}$, che porta al collasso.

Considerando come situazione iniziale una soggiacenza della falda h_0 costante rispetto a monte allora questa analisi sarà più locale in quanto i risultati dipenderanno dal valore ipotizzato di h_0 ma come si può notare dal grafico in Figura 66 i valori si allineano con una buona precisione e non si ha il ramo crescente del grafico visto in precedenza. In Figura 66 è stato ipotizzato un valore di $h_0=9,5$ m.

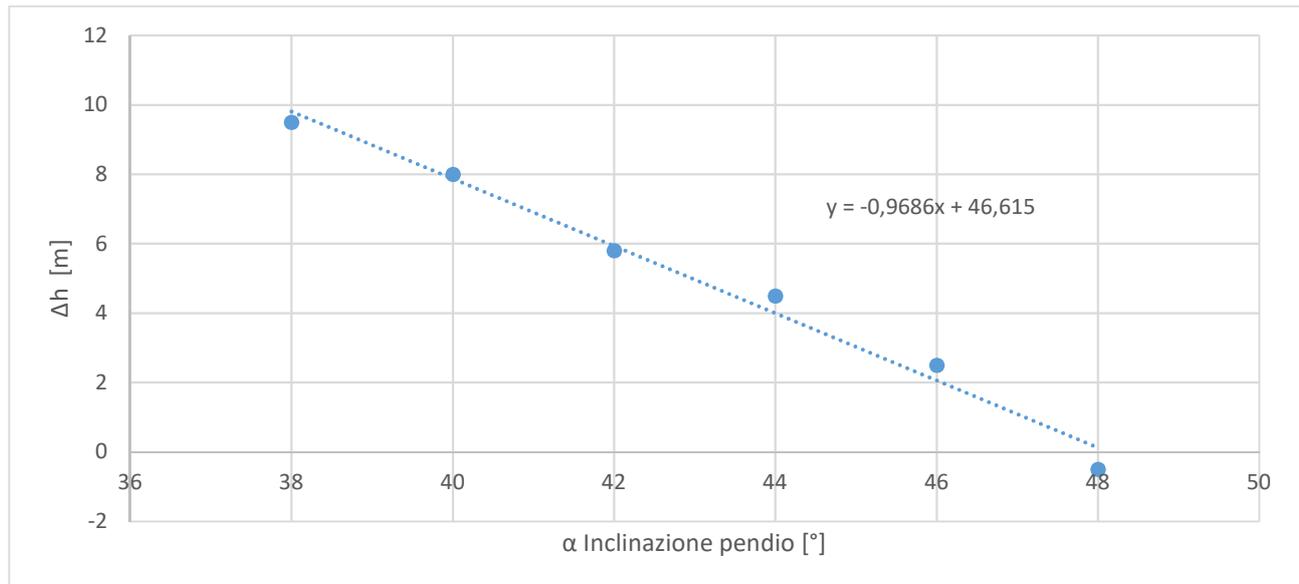


Figura 66: ΔH al variare di α , considerando una posizione originaria della falda con soggiacenza rispetto a monte pari a 10m. Analisi effettuate con $L=20\text{m}$.

Infine se si interpolando i risultati così ottenuti si può ottenere una legge per mettere in relazione i due fattori analizzati:

$$\Delta h (h_0=9,5\text{m}) = - 0,97 \alpha + 46,61$$

Considerando una variazione dell'inclinazione tra 38° e 48° come definita precedentemente allora si otterrà un limite massimo di 9,5 m e un limite minimo di 0 m. Si può quindi notare come tale intervallo si possa generalizzare come $h_0 \div 0$ m, infatti 9,5 metri era proprio il valore ipotizzato inizialmente.

5.2.2 Legge di infiltrazione e Risposta della falda alle precipitazioni– Soglie di allerta

Per la legge di infiltrazione si è scelto di utilizzare il metodo del Curve Number e utilizzando le tabelle in allegato (Figura 87-88) è stato definito il CN:

Tabella 12: Valori del CN adottati nelle analisi

Tipo idrologico di suolo	Terreno	CN
[-]	[-]	[-]
A	Ghiaia	30
B	Sabbia	53
C	Limo	71
D	Argilla	78

Il Curve Number oltre a dipendere dalla tipologia di terreno dipende anche dall'uso del suolo quindi per le analisi si è reso necessario ipotizzare l'uso del suolo per poter fissare il valore del Curve Number, infatti si è ipotizzato che i pendii analizzati siano caratterizzati da prati in superficie.

Il parametro è compreso (teoricamente) fra 0 e 100, dove CN=0 quando tutta la precipitazione si infiltra, e CN=100 quando tutta la precipitazione si trasforma in deflusso superficiale.

Successivamente si è calcolato S che è il volume specifico di saturazione e dipende dalla natura del terreno e dall'uso del suolo, globalmente rappresentati dal parametro CN.

$$S = S_0 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

S₀ invece è un fattore di scala (che riflette le unità di misura adottate e che per valori di S, F e P misurati in mm, è pari a 254 mm - ovvero 10 pollici).

Con i valori di CN e S₀ indicati si ottiene:

Tabella 13: Valori di S adottati nelle analisi

Terreno	S
[-]	[-]
Ghiaia	593
Sabbia	225
Limo	104
Argilla	72

Infine, è bene ricordare che la legge afflussi-deflussi si può esprimere come:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Dove:

- P_e rappresenta il volume specifico di deflusso superficiale
- P è la precipitazione cumulata lorda
- I_a è l'assorbimento iniziale, solitamente assunto pari a I_a=0.2S

In questo modo ipotizzando che l'acqua che arriva alla falda si trasformi immediatamente in storage, cioè l'acqua immagazzinata dalla falda, e che le altre componenti (evapotraspirazione, deflusso alla base, ecc.) in questo breve periodo di tempo siano nulle, si può calcolare il valore della ricarica, cioè dell'acqua che arriva alla falda:

$$R = P - P_e$$

Questa ipotesi coincide con quella del metodo Water-Table Fluctuation, che quindi può essere applicato per calcolare la variazione della falda Δh corrispondente a quel valore di ricarica R:

$$\Delta h = \frac{R}{S_y}$$

I valori dello specific yield dipendono dalla tipologia di terreno (vedasi la Tabella 14 per i valori adottati nel presente studio, tratti da Tabella 6).

Tabella 14: Valori dello specific yield utilizzati nelle analisi

Terreno	S_y
[-]	[-]
Ghiai	0,23
Sabbia	0,26
Limo	0,08
Argilla	0,02

Così fissato il valore di Δh si possono ricavare le combinazioni (i; d) di eventi piovosi che portano a quella determinata variazione di falda per ogni tipologia di materiale, cioè l'insieme delle combinazioni intensità-durata delle precipitazioni che danno tale apporto di acqua al terreno.

Come nel paragrafo delle analisi geomeccaniche dei pendii anche in questa sezione le analisi sono state suddivise in base al tipo del materiale.

In particolare, la procedura seguita per ottenere le condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda è stata quella inizialmente di fissare dei Δh (variazioni della falda), noti i quali, attraverso il metodo WTF, è possibile ricavare le ricariche ad essi associati, cioè le quantità di acqua che devono arrivare alla falda affinché si verifichino quelle determinate variazioni in soggiacenza.

$$R = \Delta h * S_y$$

Infine partendo dalle ricariche sono state costruite delle curve con condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costanti. Quest'ultimo passaggio è stato effettuato tramite il metodo del Curve Number, che consente di correlare la pioggia "lorda", cioè quella misurata dai pluviometri, con il quantitativo di acqua che effettivamente si infila nel terreno ed arriva alla falda.

$$R = h - h_N \quad \rightarrow \quad h = R + h_N$$

Ricordando che "R" è l'acqua che ricarica la falda, "h" è l'altezza lorda della pioggia e "h_N" è il deflusso superficiale, quindi "h-h_N" rappresenta l'altezza dell'acqua infiltrata.

Quindi sostituendo la formula del Curve Number:

$$h = R + h_N = R + \frac{(h - I_A)^2}{h - I_A + S}$$

Infine nota la “h”, altezza della pioggia lorda, è possibile ricostruire le combinazioni di intensità e durata che portano tale quantitativo di acqua, utilizzando la seguente formula:

$$i \cdot d = h$$

GHIAIA

Come si può osservare dal grafico in Figura 67, sono state create delle curve con condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh , che caratterizza tutta la curva. Quindi su questo grafico possono essere inserite delle precipitazioni, in base ad intensità e durata, e in base a dove si trova tale punto si può determinare quale sia la variazione della falda corrispondente.

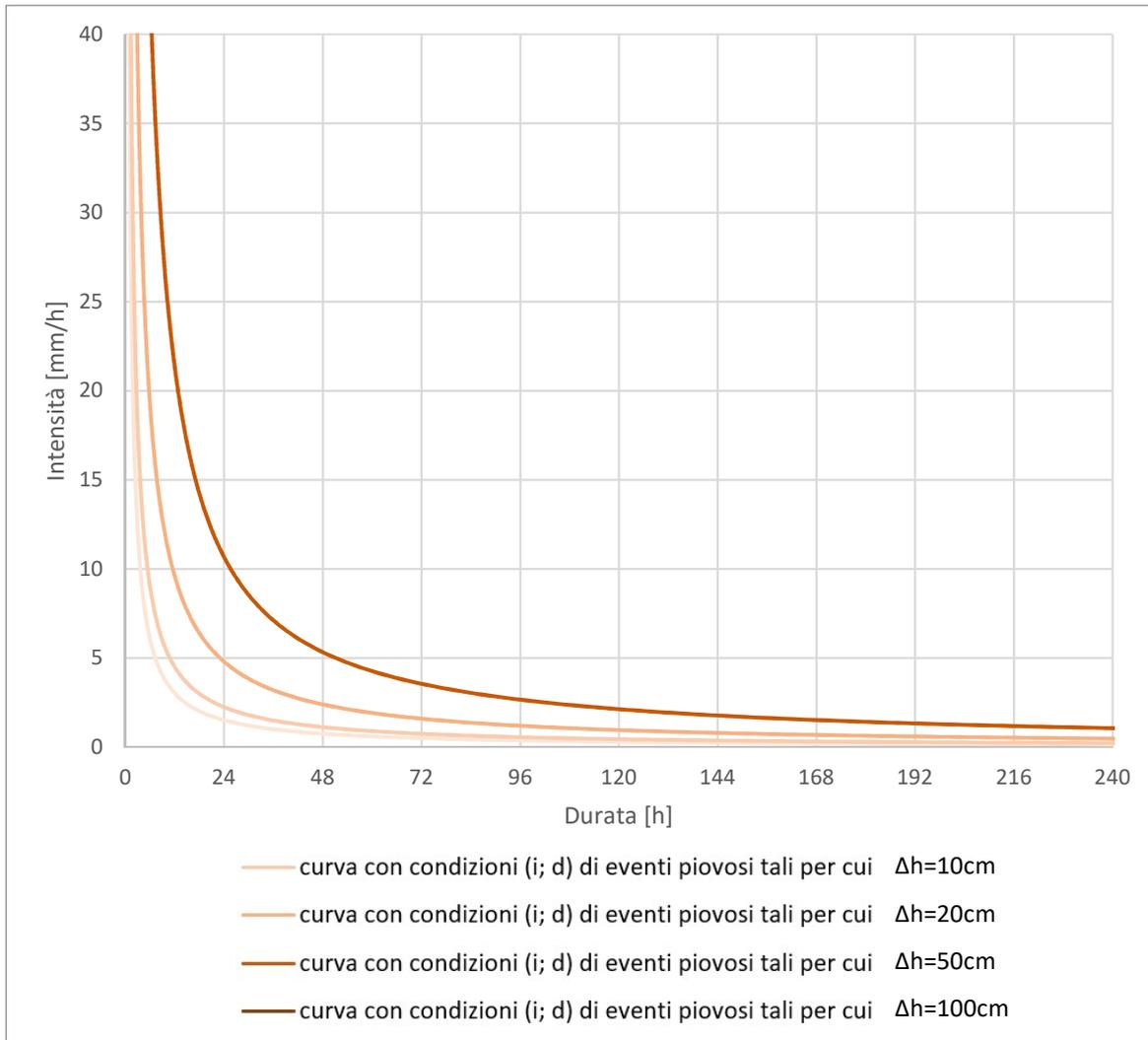


Figura 67: Condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh per pendii in ghiaia ($\Delta h = 10; 20; 50; 100$ cm)

Un altro modo di leggere questo grafico può essere quello che dato un determinato punto, associato ad una precipitazione, se esso si trova al di sopra di una determinata curva (Δh_i) allora tutti i pendii che sono soggetti ad instabilità se la variazione della falda è maggiore a Δh_i saranno a rischio collasso.

Queste curve dipendono dalle proprietà del terreno in termini di legge di infiltrazione, infatti sono state ricavate combinando il metodo del Curve Number e quello WTF.

SABBIA

Come si può osservare dal grafico in Figura 68, sono state create delle curve con condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh , che caratterizza tutta la curva. Quindi su questo grafico possono essere inserite delle precipitazioni, in base ad intensità e durata, e in base a dove si tra tale punto si può determinare quale sia la variazione della falda corrispondente.

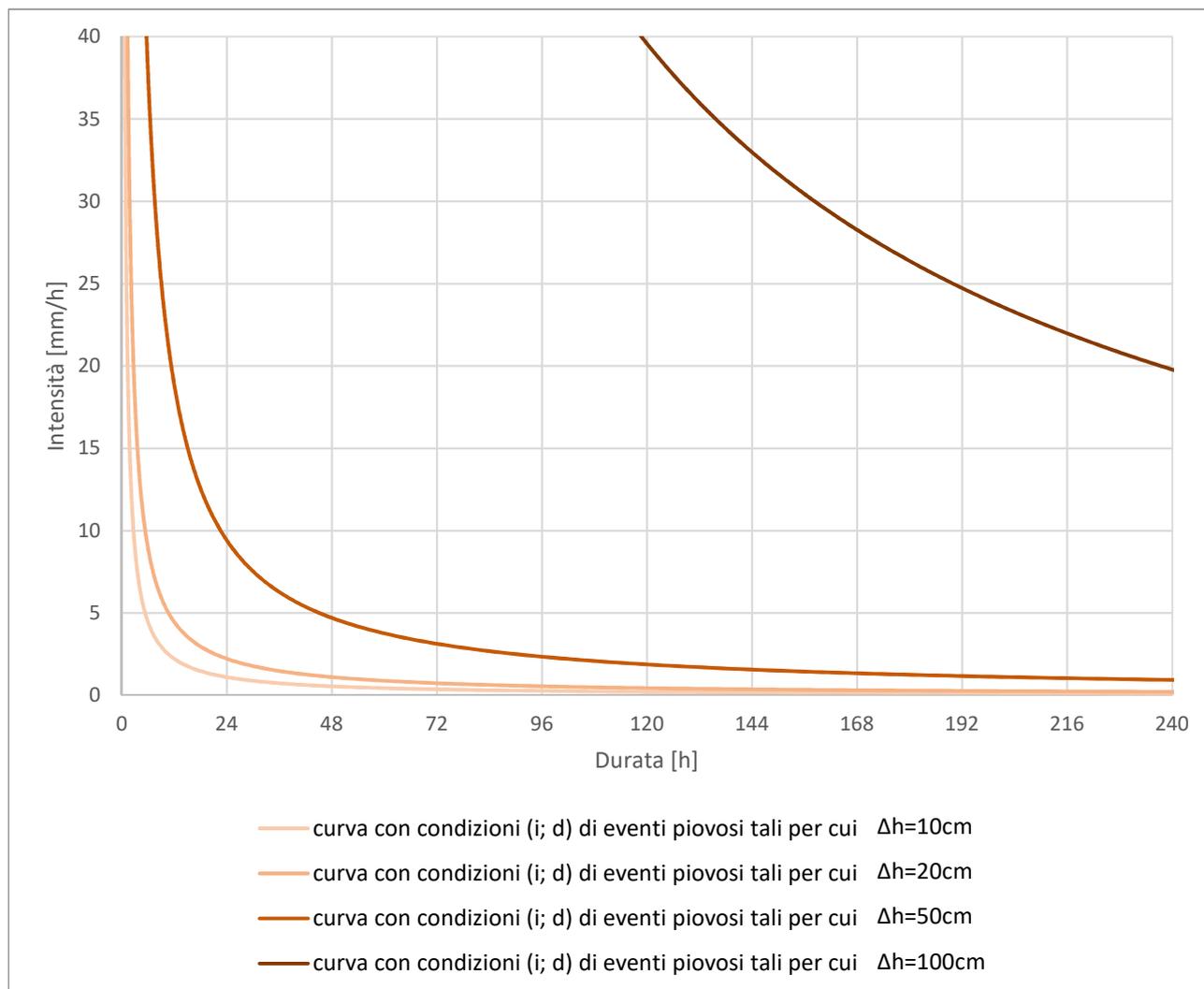


Figura 68: Condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh per pendii in sabbia ($\Delta h=10;20;50;100$ cm)

Un altro modo di leggere questo grafico può essere quello che dato un determinato punto, associato ad una precipitazione, se esso si trova al di sopra di una determinata curva (Δh_i) allora tutti i pendii che sono soggetti ad instabilità se la variazione della falda è maggiore a Δh_i saranno a rischio collasso. Queste curve dipendono dalle proprietà del terreno in termini di legge di infiltrazione, infatti sono state ricavate combinando il metodo del Curve Number e quello WTF.

Come si può notare rispetto al grafico in Figura 67 (Ghiaia) le curve della sabbia, a parità di Δh sono più alte e quindi i pendii in sabbia risultano secondo questa considerazione più sicuri relativamente all'infiltrazione. Ciò accade poiché nel metodo WTF lo specific yield della sabbia risulta essere maggiore rispetto a quello della ghiaia quindi a parità di Δh della falda la quantità di acqua che deve arrivare alla falda (ricarica) nei pendii in sabbia è maggiore rispetto a quelli in ghiaia.

LIMO

Come si può osservare dal grafico in Figura 69, sono state create delle curve con condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh , che caratterizza tutta la curva. Quindi su questo grafico possono essere inserite delle precipitazioni, in base ad intensità e durata, e in base a dove si tra tale punto si può determinare quale sia la variazione della falda corrispondente.

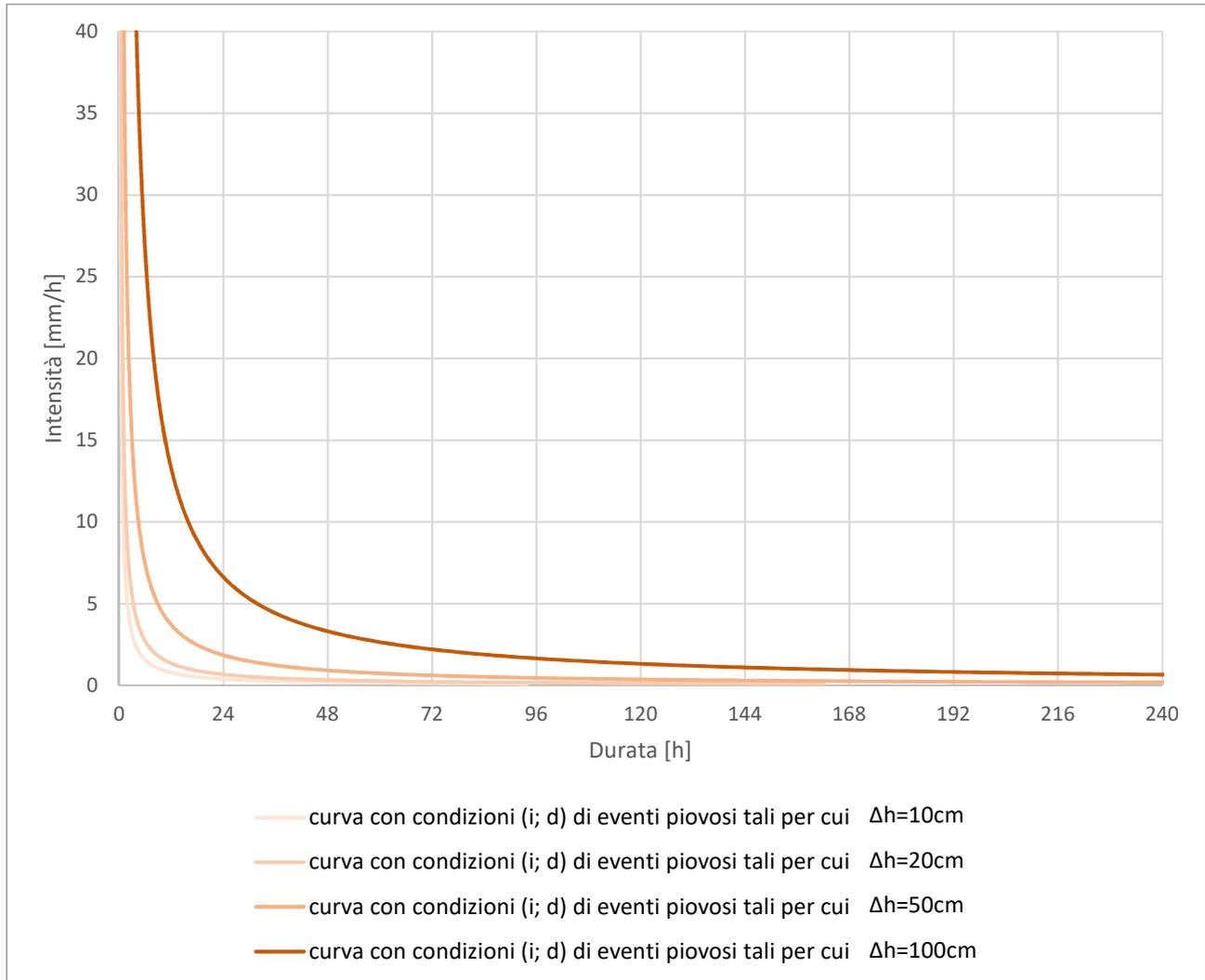


Figura 69: Condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh per pendii in limo ($\Delta h=10;20;50;100\text{ cm}$)

Un altro modo di leggere questo grafico può essere quello che dato un determinato punto, associato ad una precipitazione, se esso si trova al di sopra di una determinata curva (Δh_i) allora tutti i pendii che sono soggetti ad instabilità se la variazione della falda è maggiore a Δh_i saranno a rischio collasso. Queste curve dipendono dalle proprietà del terreno in termini di legge di infiltrazione, infatti sono state ricavate combinando il metodo del Curve Number e quello WTF.

Come si può notare rispetto ai grafici in Figura 67 (Ghiaia) e Figura 68 (Sabbia) le curve del limo, a parità di Δh sono più basse e quindi i pendii in limo risultano secondo questa considerazione meno sicuri relativamente all'infiltrazione. Ciò accade poiché nel metodo WTF lo specific yield del limo risulta essere minore rispetto a quello della ghiaia e della sabbia quindi a parità di Δh della falda la quantità di acqua che deve arrivare alla falda (ricarica) nei pendii in limo è minore rispetto a quelli in ghiaia e sabbia.

ARGILLA

Come si può osservare dal grafico in Figura 70, sono state create delle curve con condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh , che caratterizza tutta la curva. Quindi su questo grafico possono essere inserite delle precipitazioni, in base ad intensità e durata, e in base a dove si tra tale punto si può determinare quale sia la variazione della falda corrispondente.

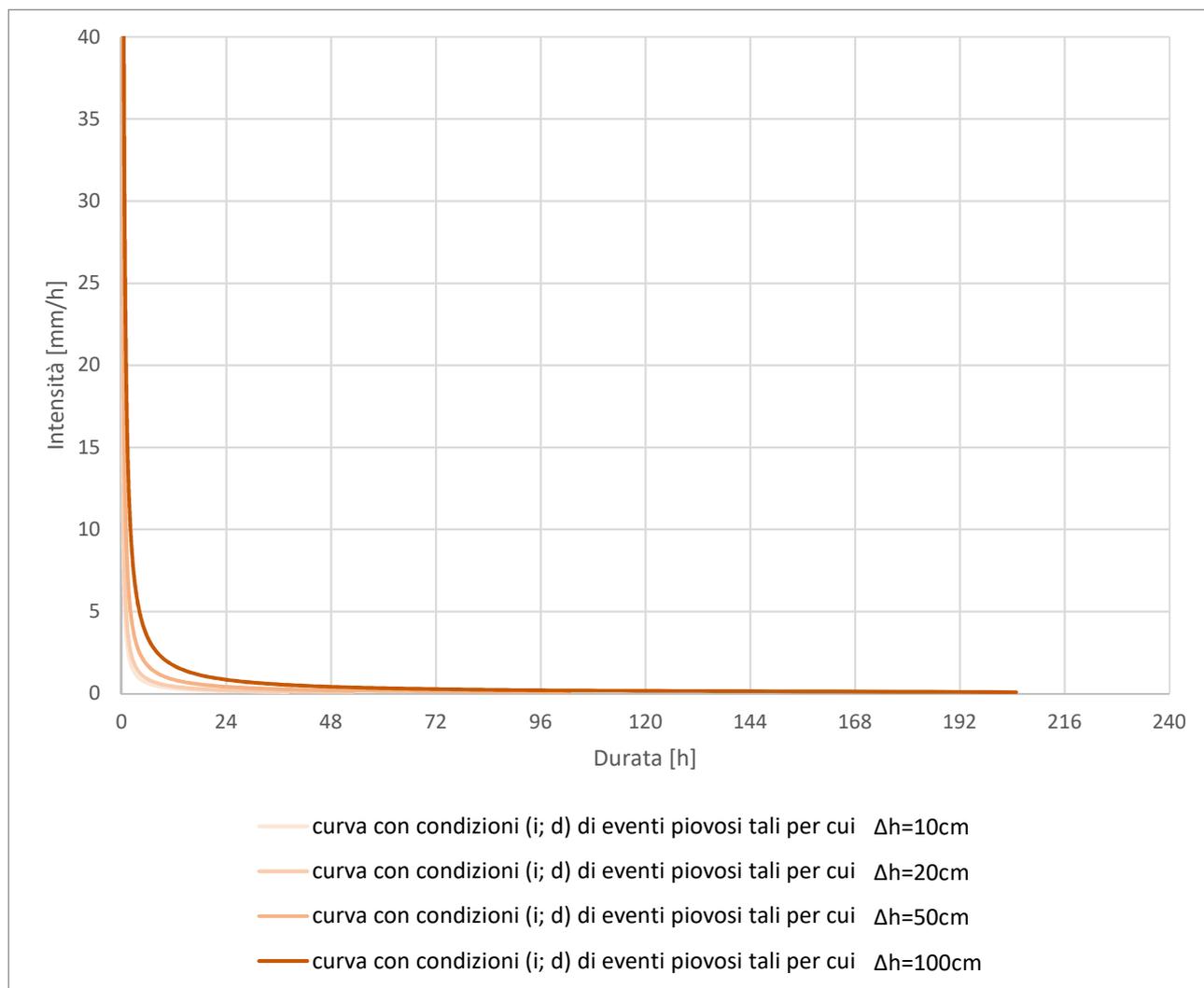


Figura 70: Condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh per pendii in argilla ($\Delta h=10;20;50;100\text{ cm}$)

Un altro modo di leggere questo grafico può essere quello che dato un determinato punto, associato ad una precipitazione, se esso si trova al di sopra di una determinata curva (Δh_i) allora tutti i pendii che sono soggetti ad instabilità se la variazione della falda è maggiore a Δh_i saranno a rischio collasso.

Queste curve dipendono dalle proprietà del terreno in termini di legge di infiltrazione, infatti sono state ricavate combinando il metodo del Curve Number e quello WTF.

Come si può notare rispetto ai grafici precedenti le curve dell'argilla, a parità di Δh sono più basse e quindi i pendii in argilla risultano secondo questa considerazione meno sicuri relativamente all'infiltrazione. Ciò accade poiché nel metodo WTF lo specific yield dell'argilla risulta essere il più basso tra i materiali analizzati e quindi nei pendii in argilla a parità di Δh della falda la quantità di acqua che deve arrivare alla falda (ricarica) è minore rispetto a quelli in ghiaia, sabbia e limo.

5.2.3 Effetto dei cambiamenti climatici valutato sulle curve con condizioni ($i;d$) tale per cui si ha Δh_i

Per valutare l'effetto dei cambiamenti climatici sono stati ricercati in letteratura dei parametri che indicassero l'andamento delle precipitazioni nei prossimi anni.

Ricordando che lo studio di SCIA per l'Italia identifica "un elemento forse significativo, che si può cogliere dalla serie del Centro Italia, è rappresentato dalla sequenza di anomalie positive degli indici R95p e SDII negli ultimi anni, che vanno nella direzione di una concentrazione delle precipitazioni in un numero minore di eventi di maggiore intensità" (SCIA, 2017), questo potrebbe essere un primo segnale di un trend che in futuro si espanderà sempre di più.

Sono stati ricercati parametri che rappresentassero la concentrazione e parametri che indicassero l'aumento delle precipitazioni negli eventi estremi. Le notevoli incertezze e l'elevato numero di variabili fanno sì che in letteratura non siano molti i parametri studiati e ancora meno siano quelli riguardanti eventi estremi e rari, di cui si hanno meno dati. Inoltre, al fine di rendere le previsioni affidabili solitamente si tendono a creare parametri, come R95P o SDII, per gli eventi estremi che hanno una scala temporale ampia come l'anno. Quindi ai fini delle analisi che verranno effettuate questi parametri sono inutilizzabili in quanto danno un'idea dell'andamento ma non forniscono dati qualitativi su andamento della durata e dell'intensità delle precipitazioni estreme.

Gli indicatori della prima tipologia di cambiamento individuati non si sono riusciti ad utilizzare in queste analisi, infatti l'indice SDII (vedi paragrafo 2.5.2) utilizzata per indicare la concentrazione delle piogge essendo una somma di più eventi non è compatibile con il presente studio, in quanto si analizzeranno singoli eventi (estremi) ed il loro andamento.

Invece per rappresentare l'incremento delle precipitazioni estreme si è individuato come parametro la precipitazione massima giornaliera sul territorio italiano. Infatti, anche se risulta essere un parametro abbastanza ampio a livello geografico, i dati e le previsioni ad esso associato sono compatibili ed adeguate allo studio che si sta effettuando. In Tabella 15 sono riportati i dati di tale parametro.

Tabella 15: Previsioni sulla precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano (SCIA, 2017)

Periodo di riferimento	Cumulata	Variazione rispetto al 1971-2000	Intensità	Durata
[-]	[mm]	[%]	[mm/h]	[h]
Precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano nel 1971-2000	70	-	2,92	24
Precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090	77	+ 10%	3,21	24
Precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090 nel nord-est	85	+ 21,40%	3,54	24

Studiando solo quest'ultimo parametro si perde la componente riguardante la concentrazione delle precipitazioni ma gli studi sugli eventi estremi trovati in letteratura non approfondivano tale parametro quanto piuttosto si concentrano sull'analisi della cumulata annuale degli eventi estremi (R95P) o sulla precipitazione massima giornaliera.

GHIAIA

Nel grafico in Figura 71 sono state aggiunte alle curve con condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh , descritte nel paragrafo 5.2.2, le precipitazioni massime giornaliere medie sul territorio italiano nei periodi temporali 1971-2000 e quelle previste per il 2061-2090. Queste ultime tengono in conto dei cambiamenti climatici e assumono un aumento del 10% (SCIA, 2014) in tutta Italia e un aumento massimo del 21,4% per il nord-est (SCIA, 2014) della cumulata massima giornaliera.

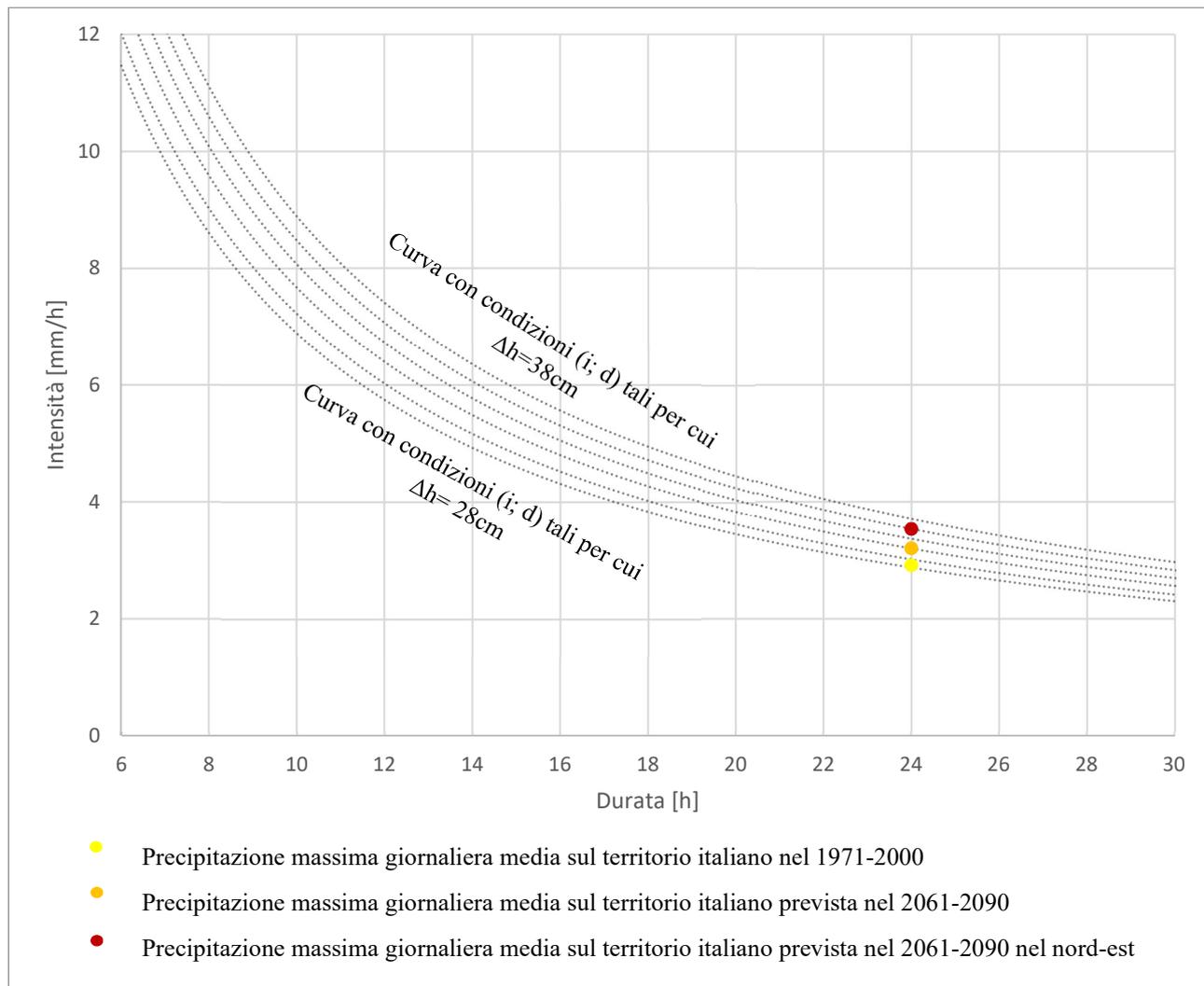


Figura 71: Curve con condizioni (i; d) che comportano lo stesso Δh nei pendii in ghiaia. Δh tra 28 e 38 cm ogni 2 cm con confronto cambiamenti climatici sulle precipitazioni massime giornaliere medie italiane

Come si può notare nella Figura 71 le previsioni di SCIA sulle precipitazioni per il territorio nazionale si rifletteranno in un innalzamento della curva negli anni. Secondo i calcoli la curva (i; d) si innalzerà da un valore di $\Delta h = 29$ cm fino a un valore massimo di $\Delta h = 36$ cm.

Sfruttando i calcoli eseguiti con modello FEM su un pendio indefinito e omogeneo ci si può ricondurre al parametro che influenzava la stabilità del pendio così creato, cioè l'inclinazione.

Infatti ricordando che per un pendio in ghiaia si era ottenuto:

Ip. condizione originaria: $h_0=4,2m$

$\Delta h (h_0=4,2m) = - 0,33 \alpha + 11,92$

Utilizzando tale formula (Ip. condizione originaria: $h_0=4,2\text{m}$) per ottenere l'inclinazione del pendio soggetto ad instabilità in conseguenza ad un determinato incremento della falda si ricava che per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano nel 1971-2000:

$$\Delta h = 29 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \alpha = 35,2^\circ$$

Per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090:

$$\Delta h = 32 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \alpha = 35,1^\circ$$

Infine per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090 nel nord-est:

$$\Delta h = 36 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \alpha = 35,0^\circ$$

Quindi l'effetto dei cambiamenti climatici, considerato in questo caso come un aumento della precipitazione massima giornaliera, ha come conseguenza una diminuzione dell'inclinazione dei pendii soggetti a instabilità. Quindi se si considerano i dati di precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano del 1971-2000 i pendii in ghiaia soggetti a instabilità a causa di una variazione di altezza della falda proprio in conseguenza a quella precipitazione massima giornaliera hanno un'inclinazione minima di $35,2^\circ$ mentre se si applicano le previsioni dei cambiamenti climatici tale limite inferiore si abbassa di $0,2^\circ$.

SABBIA

Nel grafico in Figura 72 sono state aggiunte alle curve con condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh , descritte nel paragrafo 5.2.2, le precipitazioni massime giornaliere medie sul territorio italiano nei periodi temporali 1971-2000 e quelle previste per il 2061-2090. Queste ultime tengono in conto dei cambiamenti climatici e assumono un aumento del 10% (SCIA, 2014) in tutta Italia e un aumento massimo del 21,4% per il nord-est (SCIA, 2014) della cumulata massima giornaliera.

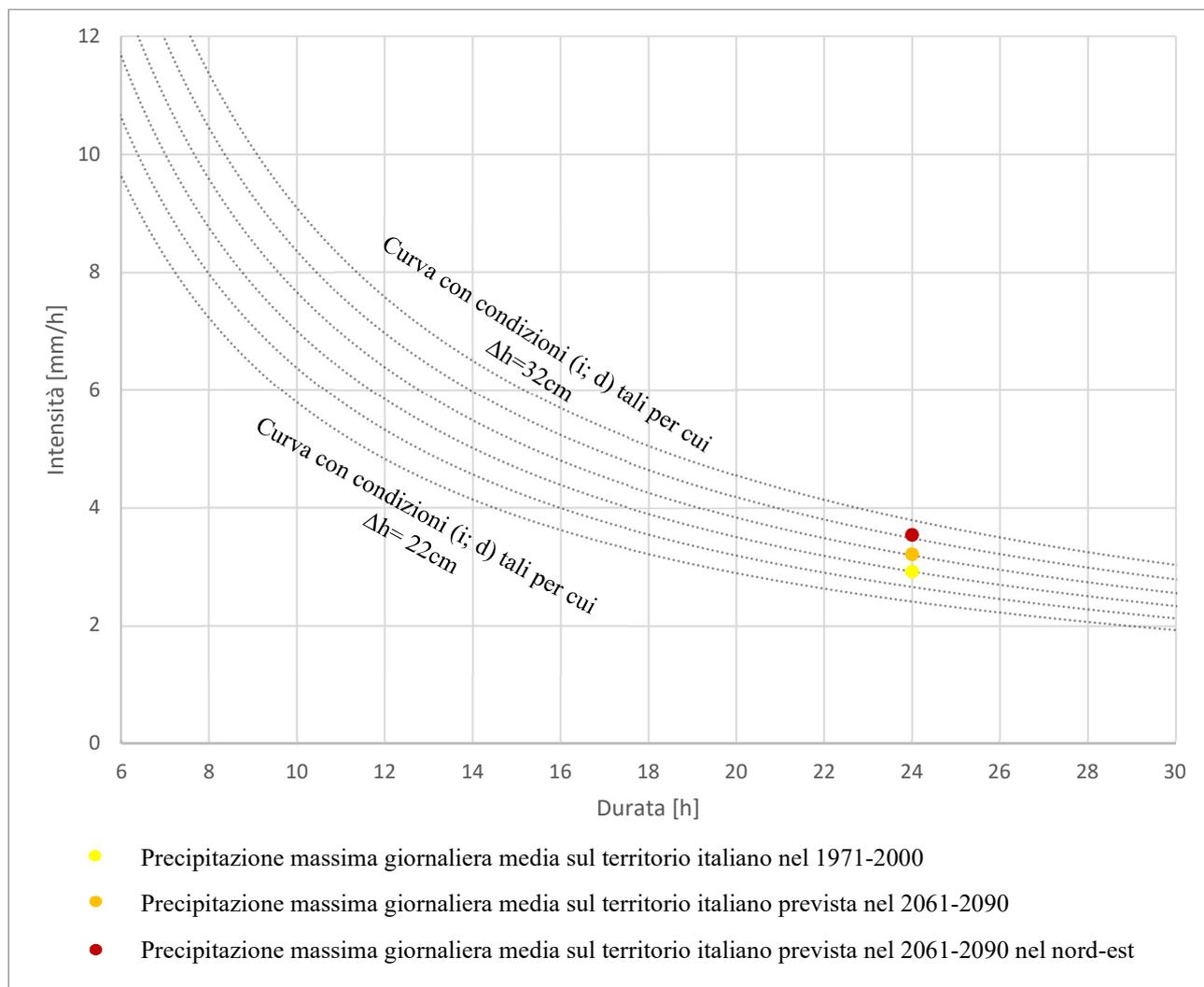


Figura 72: Curve con condizioni (i; d) che comportano lo stesso Δh nei pendii in sabbia. Δh tra 22 e 32 cm ogni 2 cm con confronto cambiamenti climatici sulle precipitazioni massime giornaliere medie italiane

Come si può notare nella Figura 72 le previsioni di SCIA sulle precipitazioni per il territorio nazionale si rifletteranno in un innalzamento della curva negli anni. Secondo i calcoli la curva (i; d) si innalzerà da un valore di $\Delta h = 26$ cm fino a un valore massimo di $\Delta h = 31$ cm.

Sfruttando i calcoli eseguiti con modello FEM su un pendio indefinito e omogeneo ci si può ricondurre al parametro che influenzava la stabilità del pendio così creato, cioè l'inclinazione.

Infatti ricordando che per un pendio in sabbia si era ottenuto:

$$I_p \text{ condizione originaria: } h_0=7,5\text{m}$$

$$\Delta h (h_0=6,5\text{m})= - 0,59 \alpha + 19,71$$

Utilizzando tale formula (Ip. condizione originaria: $h_0=7,5\text{m}$) per ottenere l'inclinazione del pendio soggetto ad instabilità in conseguenza ad un determinato incremento della falda si ricava che per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano nel 1971-2000:

$$\Delta h = 26 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \alpha = 32,97^\circ$$

Per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090:

$$\Delta h = 28 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \alpha = 32,93^\circ$$

Infine per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090 nel nord-est:

$$\Delta h = 31 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \alpha = 31,87^\circ$$

Quindi l'effetto dei cambiamenti climatici, considerato in questo caso come un aumento della precipitazione massima giornaliera, ha come conseguenza una diminuzione dell'inclinazione dei pendii soggetti a instabilità. Quindi se si considerano i dati di precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano del 1971-2000 i pendii in sabbia soggetti a instabilità a causa di una variazione di altezza della falda proprio in conseguenza a quella precipitazione massima giornaliera hanno un'inclinazione minima di $31,97^\circ$ mentre se si applicano le previsioni dei cambiamenti climatici tale limite inferiore si abbassa di $0,1^\circ$.

LIMO

Nel grafico in Figura 73 sono state aggiunte alle curve con condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh , descritte nel paragrafo 5.2.2, le precipitazioni massime giornaliere medie sul territorio italiano nei periodi temporali 1971-2000 e quelle previste per il 2061-2090. Queste ultime tengono in conto dei cambiamenti climatici e assumono un aumento del 10% (SCIA, 2014) in tutta Italia e un aumento massimo del 21,4% per il nord-est (SCIA, 2014) della cumulata massima giornaliera.

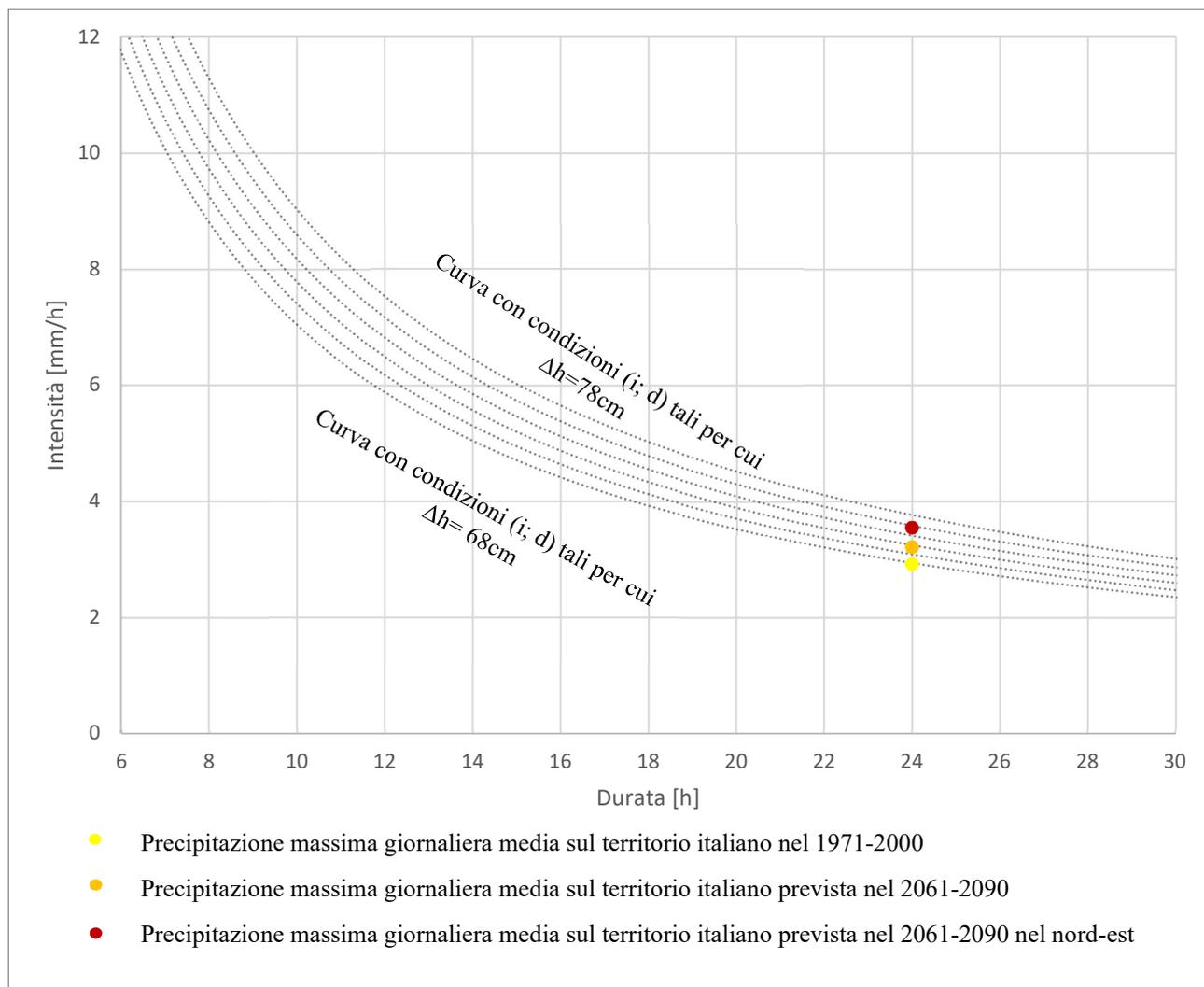


Figura 73: Curve con condizioni (i; d) che comportano lo stesso Δh nei pendii in limo. Δh tra 68 e 78 cm ogni 2 cm con confronto cambiamenti climatici sulle precipitazioni massime giornaliere medie italiane

Come si può notare nella Figura 73 le previsioni di SCIA sulle precipitazioni per il territorio nazionale si rifletteranno in un innalzamento della curva negli anni. Secondo i calcoli la curva (i; d) si innalzerà da un valore di $\Delta h = 68$ cm fino a un valore massimo di $\Delta h = 76$ cm.

Sfruttando i calcoli eseguiti con modello FEM su un pendio indefinito e omogeneo ci si può ricondurre al parametro che influenzava la stabilità del pendio così creato, cioè l'inclinazione.

Infatti ricordando che per un pendio in limo si era ottenuto:

$$I_p. \text{ condizione originaria: } h_0=4,2\text{m}$$

$$\Delta h (h_0=7,4\text{m}) = -0,51 \alpha + 21,57$$

Utilizzando la tale formula (Ip. condizione originaria: $h_0=7,4$ m) per ottenere l'inclinazione del pendio soggetto ad instabilità in conseguenza ad un determinato incremento della falda si ricava che per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano nel 1971-2000:

$$\Delta h = 68 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \alpha = 41,0^\circ$$

Per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090:

$$\Delta h = 72 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \alpha = 40,9^\circ$$

Infine per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090 nel nord-est:

$$\Delta h = 76 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \alpha = 40,8^\circ$$

Quindi l'effetto dei cambiamenti climatici, considerato in questo caso come un aumento della precipitazione massima giornaliera, ha come conseguenza una diminuzione dell'inclinazione dei pendii soggetti a instabilità. Quindi se si considerano i dati di precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano del 1971-2000 i pendii in limo soggetti a instabilità a causa di una variazione di altezza della falda proprio in conseguenza a quella precipitazione massima giornaliera hanno un'inclinazione minima di $41,0^\circ$ mentre se si applicano le previsioni dei cambiamenti climatici tale limite inferiore si abbassa di $0,2^\circ$.

ARGILLA

Nel grafico in Figura 74 sono state aggiunte alle curve con condizioni (i; d) di eventi piovosi che portano ad una determinata variazione di falda costante Δh , descritte nel paragrafo 5.2.2, le precipitazioni massime giornaliere medie sul territorio italiano nei periodi temporali 1971-2000 e quelle previste per il 2061-2090. Queste ultime tengono in conto dei cambiamenti climatici e assumono un aumento del 10% (SCIA, 2014) in tutta Italia e un aumento massimo del 21,4% per il nord-est (SCIA, 2014) della cumulata massima giornaliera.

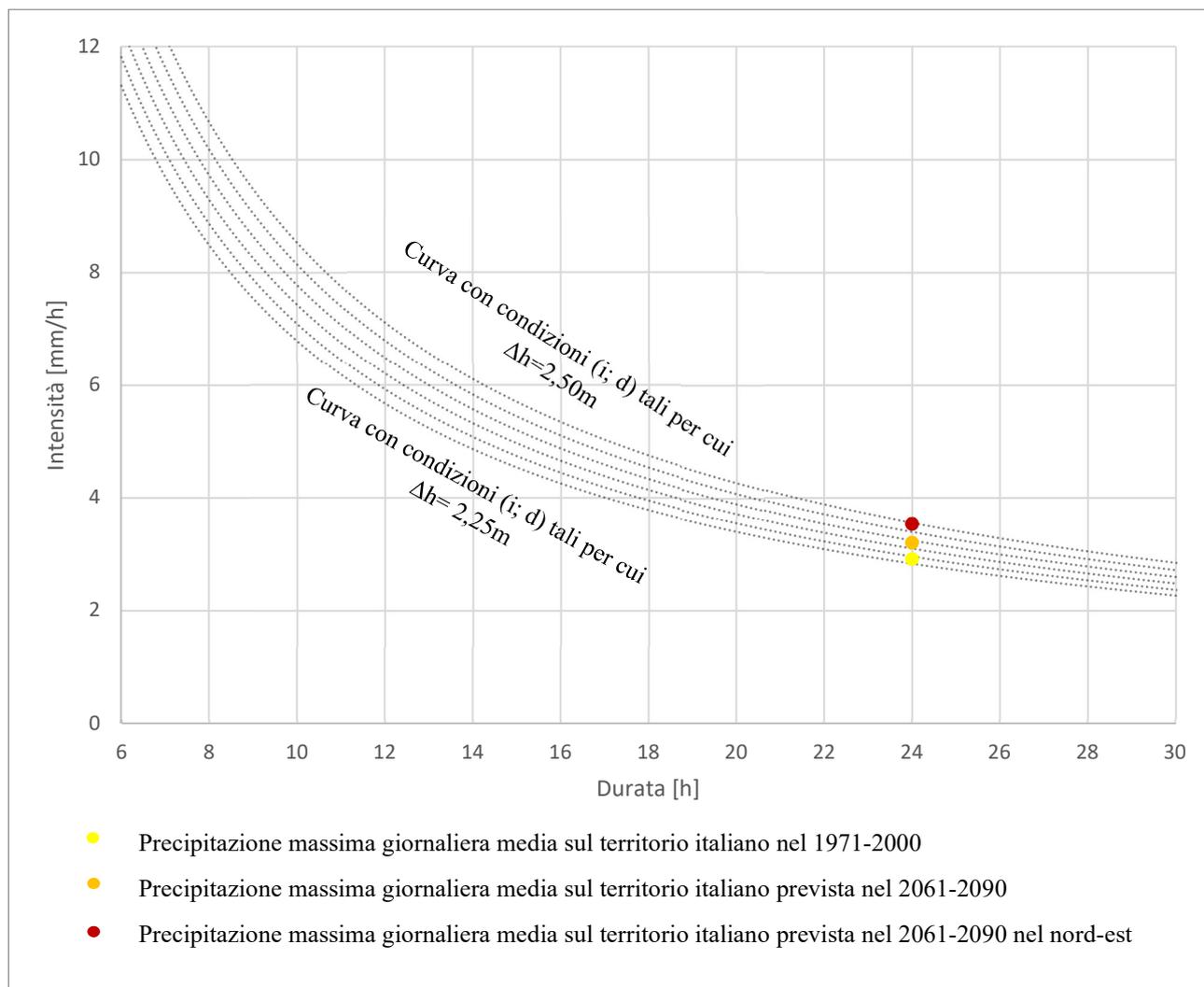


Figura 74: Curve con condizioni (i; d) che comportano lo stesso Δh nei pendii in argilla. Δh tra 2,25 e 2,50 m ogni 5 cm con confronto cambiamenti climatici sulle precipitazioni massime giornaliere medie italiane

Come si può notare nella Figura 74 le previsioni di SCIA sulle precipitazioni per il territorio nazionale si rifletteranno in un innalzamento della curva negli anni. Secondo i calcoli la curva (i; d) si innalzerà da un valore di $\Delta h = 2,30\text{ m}$ fino a un valore massimo di $\Delta h = 2,50\text{ m}$.

Sfruttando i calcoli eseguiti con modello FEM su un pendio indefinito e omogeneo ci si può ricondurre al parametro che influenzava la stabilità del pendio così creato, cioè l'inclinazione.

Infatti ricordando che per un pendio in argilla si era ottenuto:

$$I_p \text{ condizione originaria: } h_0=9,5\text{m}$$

$$\Delta h (h_0=9,5\text{m}) = -0,97 \alpha + 46,61$$

Utilizzando tale formula (Ip. condizione originaria: $h_0=9,5\text{m}$) per ottenere l'inclinazione del pendio soggetto ad instabilità in conseguenza ad un determinato incremento della falda si ricava che per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano nel 1971-2000:

$$\Delta h = 2,30 \text{ m} \rightarrow \alpha = 45,7^\circ$$

Per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090:

$$\Delta h = 2,40 \text{ m} \rightarrow \alpha = 45,6^\circ$$

Infine per la precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090 nel nord-est:

$$\Delta h = 2,50 \text{ m} \rightarrow \alpha = 45,5^\circ$$

Quindi l'effetto dei cambiamenti climatici, considerato in questo caso come un aumento della precipitazione massima giornaliera, ha come conseguenza una diminuzione dell'inclinazione dei pendii soggetti a instabilità. Quindi se si considerano i dati di precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano del 1971-2000 i pendii in argilla soggetti a instabilità a causa di una variazione di altezza della falda proprio in conseguenza a quella precipitazione massima giornaliera hanno un'inclinazione minima di $45,7^\circ$ mentre se si applicano le previsioni dei cambiamenti climatici tale limite inferiore si abbassa di $0,2^\circ$.

5.3 ANALISI CASI STUDIO

In questo capitolo saranno utilizzati dei casi studio come banco di prova per le analisi e le previsioni sopra descritte. I casi studio analizzati saranno quelli descritti nel paragrafo 4, in particolare Cissone e Monchiero. Invece Somano non sarà sottoposto a studio in quanto presenta degli errori per lunghi periodi di tempo, circa un anno, e successive operazioni di ripristino che alterano i risultati e non consentono un adeguata conoscenza.

5.3.1 Cissone

Sulla base delle serie storiche dei dati raccolti da piezometro e inclinometro si è cercato di individuare i principali eventi di instabilità avvenuti in questo caso studio.

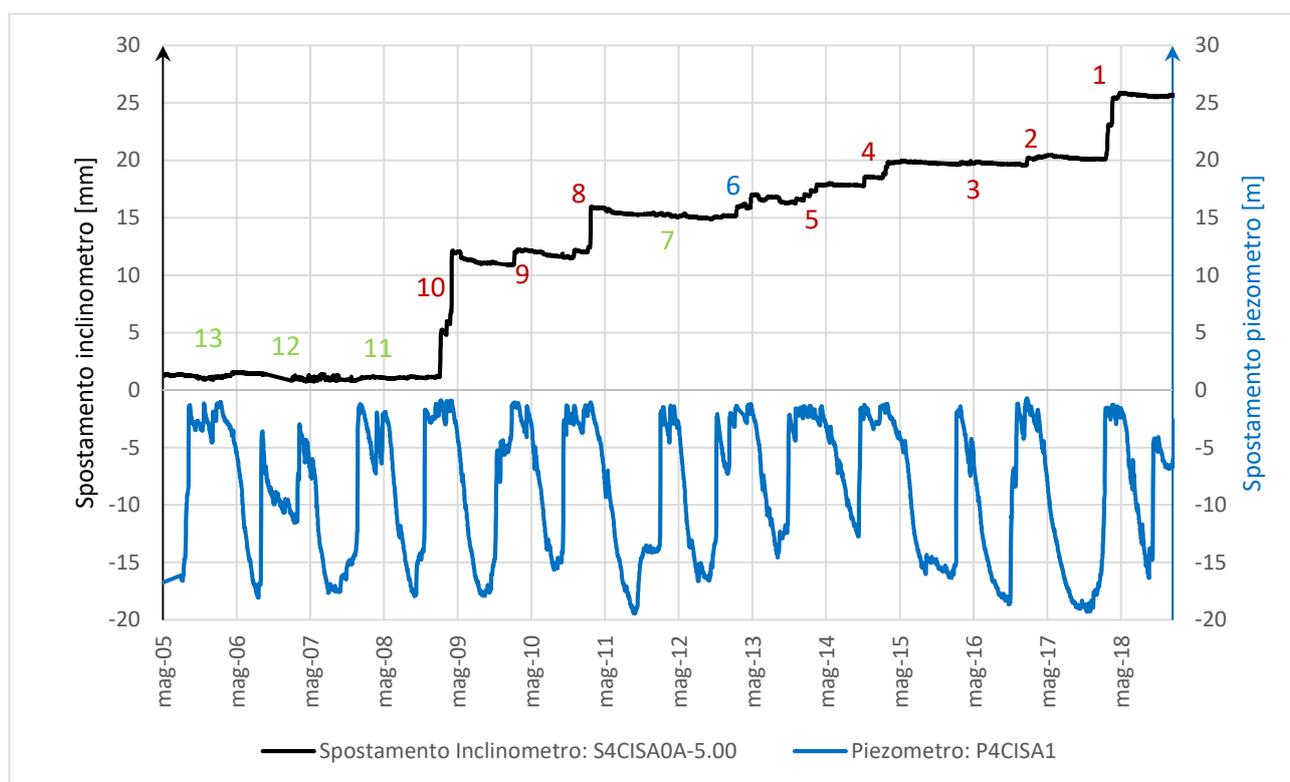


Figura 75: Dati misurati da piezometro e inclinometro nella frana di Cissone

Come si può notare dalla Figura 75, il fenomeno risulta essere notevolmente influenzato dalla stagionalità. Infatti, si può osservare come la falda ciclicamente in primavera, tipicamente nei mesi di marzo e aprile, raggiunga la minima soggiacenza. Tale stagionalità si può registrare, anche se con minore entità, sulle misure dell'inclinometro, infatti il movimento viene annotato solitamente in corrispondenza del picco della falda. Lo spostamento registrato dall'inclinometro però non si ripete periodicamente ogni anno, infatti alcuni anni non presentano particolari movimenti (es. 2006; 2007; 2008; 2012). Ciò è dovuto al fatto che per avere instabilità non è sufficiente che la falda raggiunga il massimo stagionale ma deve anche superare un certo livello, tale profondità limite è stata stimata pari a -1,2 m. Se la falda supera tale valore di soggiacenza è molto probabile che avvenga un fenomeno di instabilità ed in particolare che si attivi una frana di tipo planare con profondità della superficie di scivolamento pari a circa 8 m. Infatti, dai dati stratigrafici si può notare come fino a quest'ultima

profondità vi sia presenza di limo argilloso e argilla limosa, quindi si può ipotizzare che questo strato possa scorrere su quello sottostante costituito prevalentemente da marne siltose grigie.

Nel grafico in Figura 75 sono stati individuati e numerati i principali fenomeni sviluppatisi negli ultimi 15 anni. In particolare, i numeri in verde rappresentano gli eventi non considerati perché non rilevanti, in blu i fenomeni non considerati in quanto la falda nel periodo primaverile presenta una ricaduta che falserebbe il paragone con gli altri eventi ed infine in rosso gli eventi analizzati e che presentano in corrispondenza del picco primaverile della falda un movimento rilevante.

Per gli eventi analizzati sono stati ricavati i parametri di intensità e durata delle piogge che hanno portato all'innalzamento della falda dal minimo estivo fino al movimento rilevato dall'inclinometro.

In Figura 76 è stato riportato come esempio l'evento analizzato del 2014.

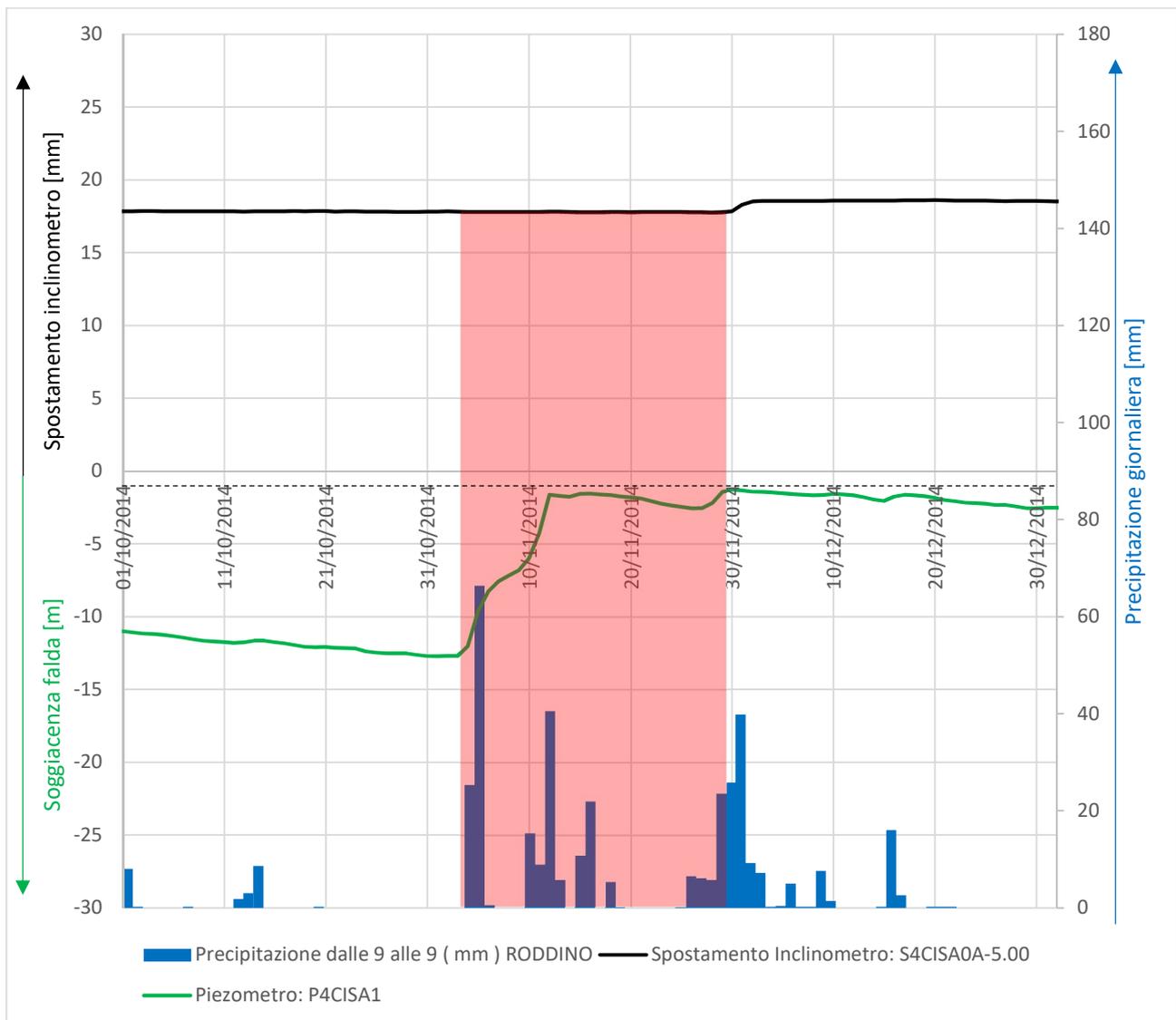


Figura 76: Misure piezometriche, inclinometriche, pluviometriche e nivometriche che descrivono lo spostamento del 2014 (Cissone)

Bisogna però rimarcare che così facendo si è ipotizzato che l'unico parametro che influenza la stagionalità della falda è la precipitazione mentre potrebbero esservi altri fenomeni, come la variazione di temperatura e lo scioglimento della neve, che giocano un ruolo fondamentale. Quindi questa ipotesi risulta essere molto forte e se ne dovrà sempre tenere in considerazione.

In Figura 77 sono riportati tali eventi piovosi in termini di intensità (media) e durata.

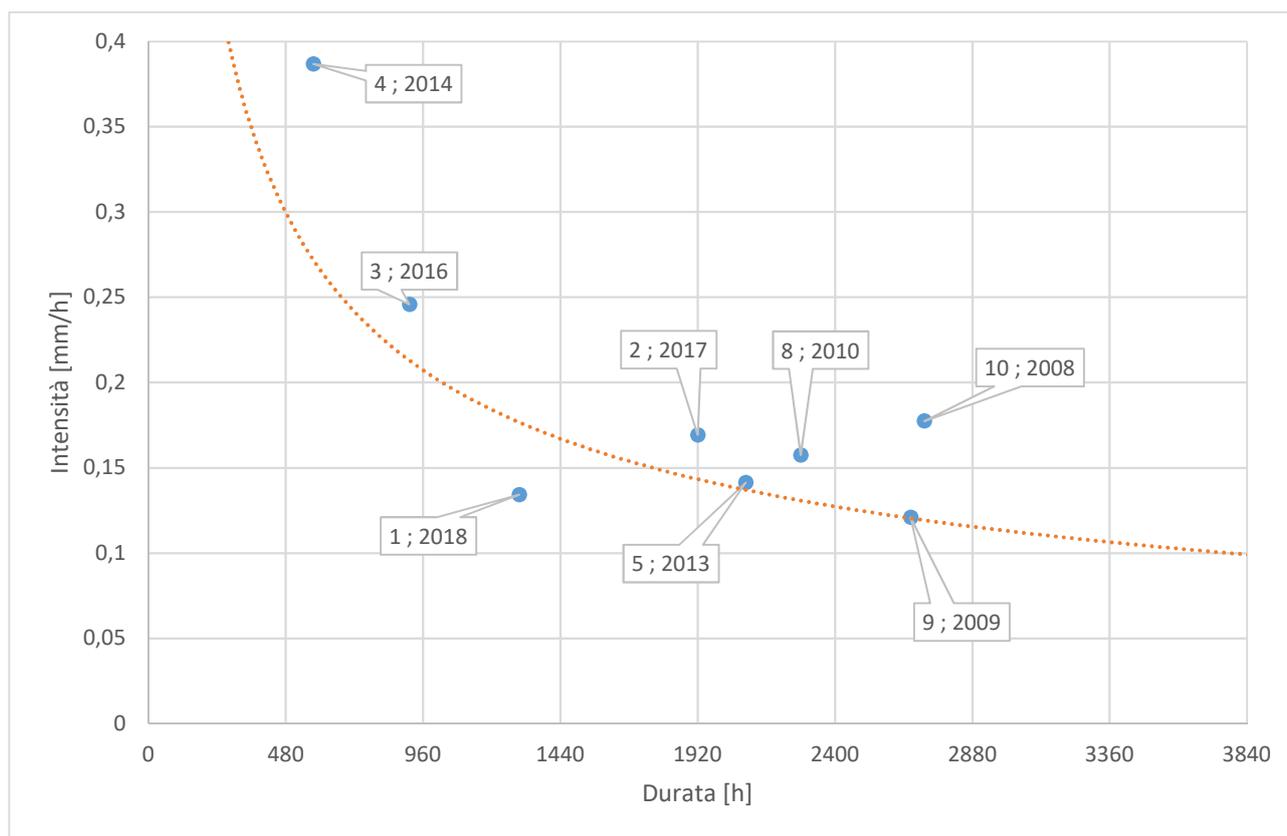


Figura 77: Eventi di instabilità osservati nel caso studio di Cissone con soglia di allerta interpolata statisticamente

Si può osservare una certa tendenza di questi fenomeni a spostarsi verso l'altro e sinistra, come ipotizzato nel paragrafo 2.6.3, anche se tale tendenza non risulta essere così ben delineata. Nella Figura 78 e Figura 79 sono stati considerati separatamente i due parametri, intensità e durata.

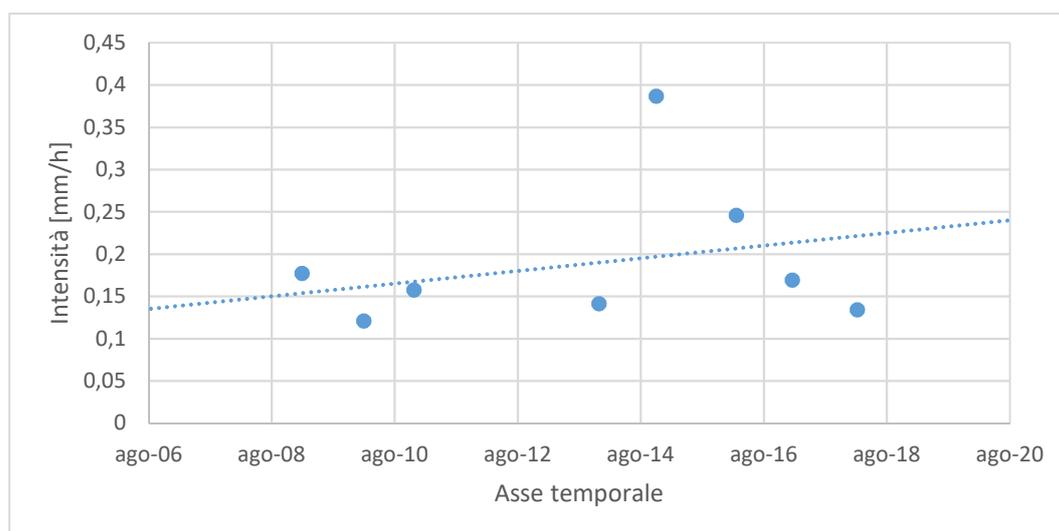


Figura 78: Eventi piovosi che hanno causato instabilità nel caso studio di Cissone, analizzati in termini di intensità media.

Il primo presenta una retta interpolante che sembra indicare un aumento con il passare del tempo, ma tale incremento negli anni non ha avuto un trend crescente ben delineato quindi non si può affermare con certezza tale crescita, infatti il valore di intensità del 2018 risulta essere molto simile a quello del 2009.

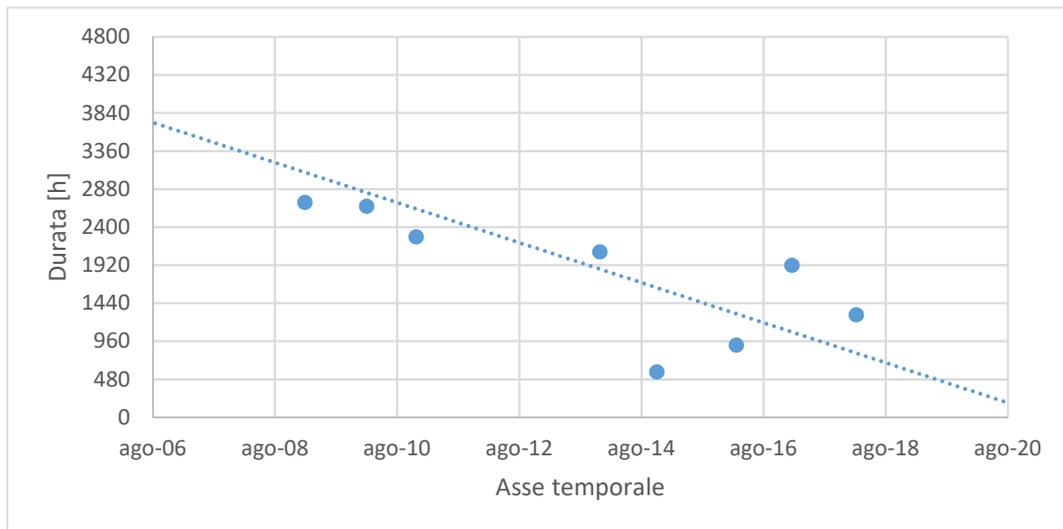


Figura 79: Eventi piovosi che hanno causato instabilità nel caso studio di Cissone, analizzati in termini di durata.

Il secondo parametro invece mostra un trend più preciso. Infatti, osservando il grafico in Figura 79 sembra chiara la concentrazione degli eventi che negli anni hanno portato ad instabilizzare la frana oggetto del caso studio.

5.3.2 Monchiero

Per il caso studio di Monchiero si è deciso di applicare l'approccio seguito nelle analisi del modello semplificato nel paragrafo 5.2.

Studiando la scheda SIFraP e osservando le serie temporali di piezometro, inclinometro e pluviometro, si è notato come vi fossero stati negli ultimi dieci anni principalmente quattro eventi di instabilità, come già riportato nel paragrafo 4.3. Questi fenomeni si sono sviluppati tutti verso la fine dell'inverno o in primavera. Considerato un andamento della falda stagionale, in primavera solitamente raggiunge una soggiacenza di -1,8 m, si è cercato di studiare gli eventi piovosi o nevosi che hanno causato nel breve periodo un'instabilità. Infatti, il metodo utilizzato nelle analisi del modello semplificato è applicabile solo a eventi repentini.

Per identificare il fenomeno meteorologico scatenante si è innanzitutto identificata la finestra temporale in cui ricercare tale evento. Il punto di partenza di tale intervallo è stato supposto coincidente con il primo innalzamento della falda mentre il punto finale è stato considerato combaciare con il punto di primo movimento misurato dall'inclinometro. Nei seguenti grafici (Figure 80, 81, 82 e 83) il rettangolo in rosso evidenzia la finestra temporale analizzata.

Mediante nei quattro eventi analizzati quando la falda ha superato la profondità di circa -0,5 m è avvenuto il primo spostamento rilevato dall'inclinometro.

È bene ricordare che per la conversione tra neve e pioggia si è adottato il rapporto:

“1 cm di neve = 1 mm di precipitazione acquosa” (Pasqualini, 2017)

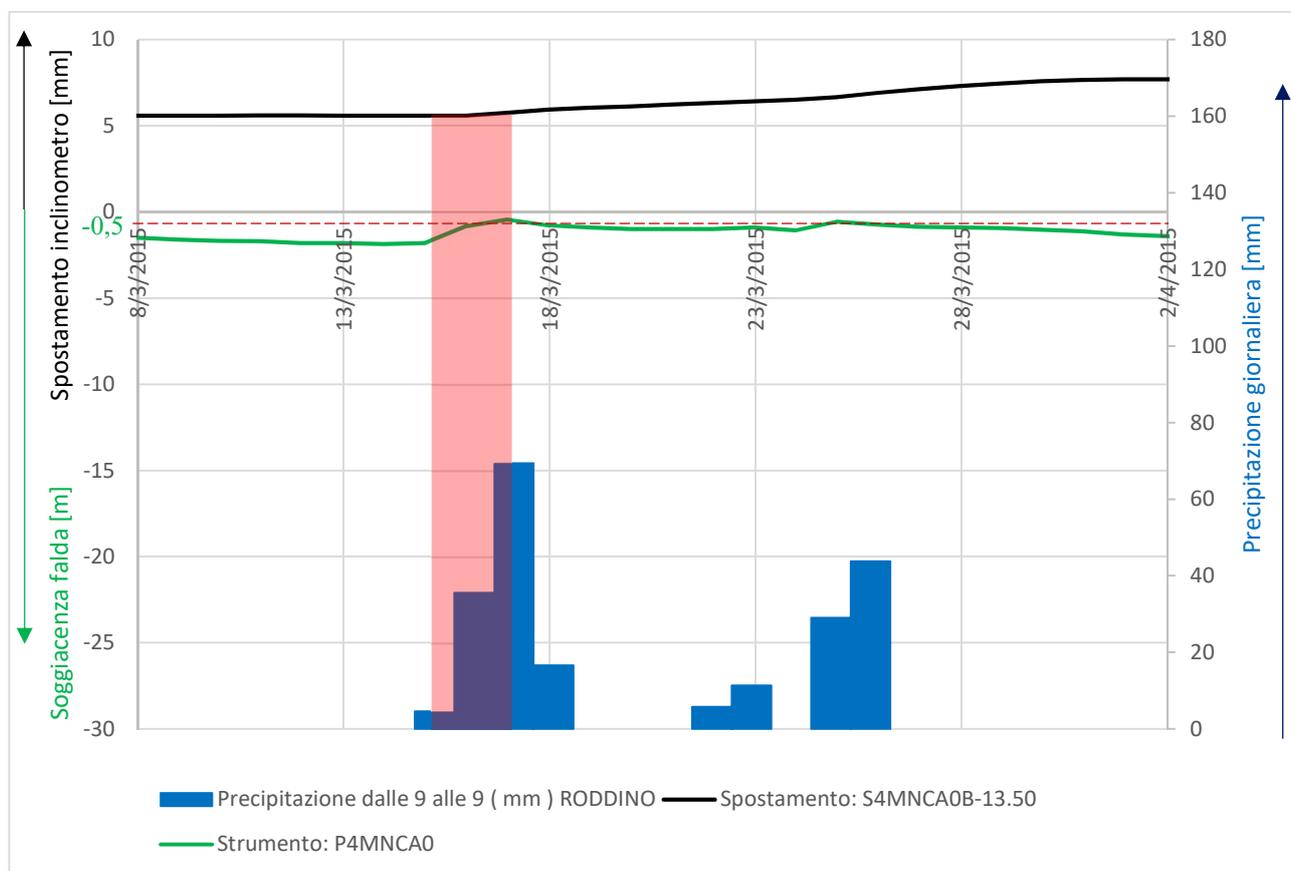


Figura 80: Misure piezometriche, inclinometriche, pluviometriche e nivometriche che descrivono lo spostamento di marzo 2011 (Monchiero)

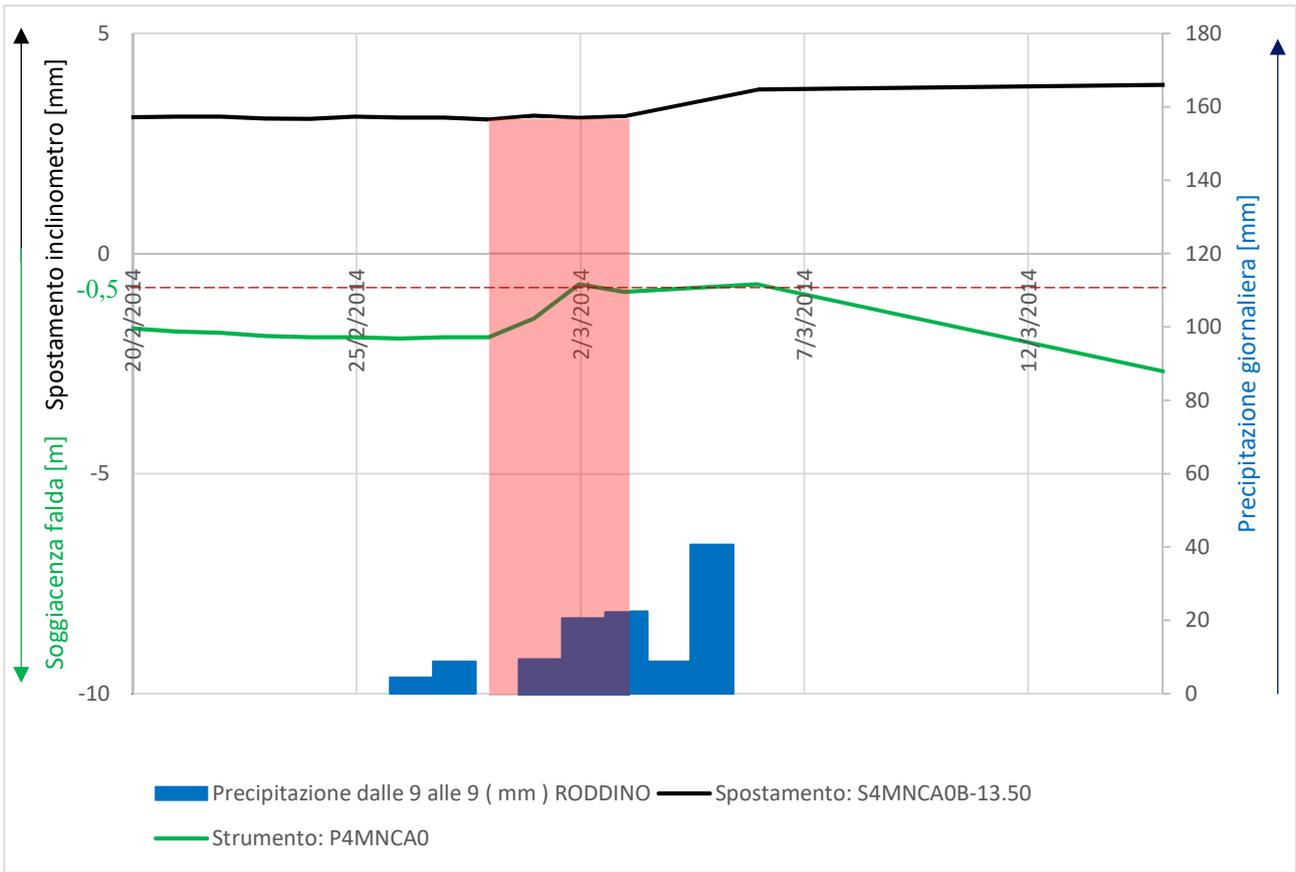


Figura 81: Misure piezometriche, inclinometriche, pluviometriche e nivometriche che descrivono lo spostamento di marzo 2014 (Monchiero)

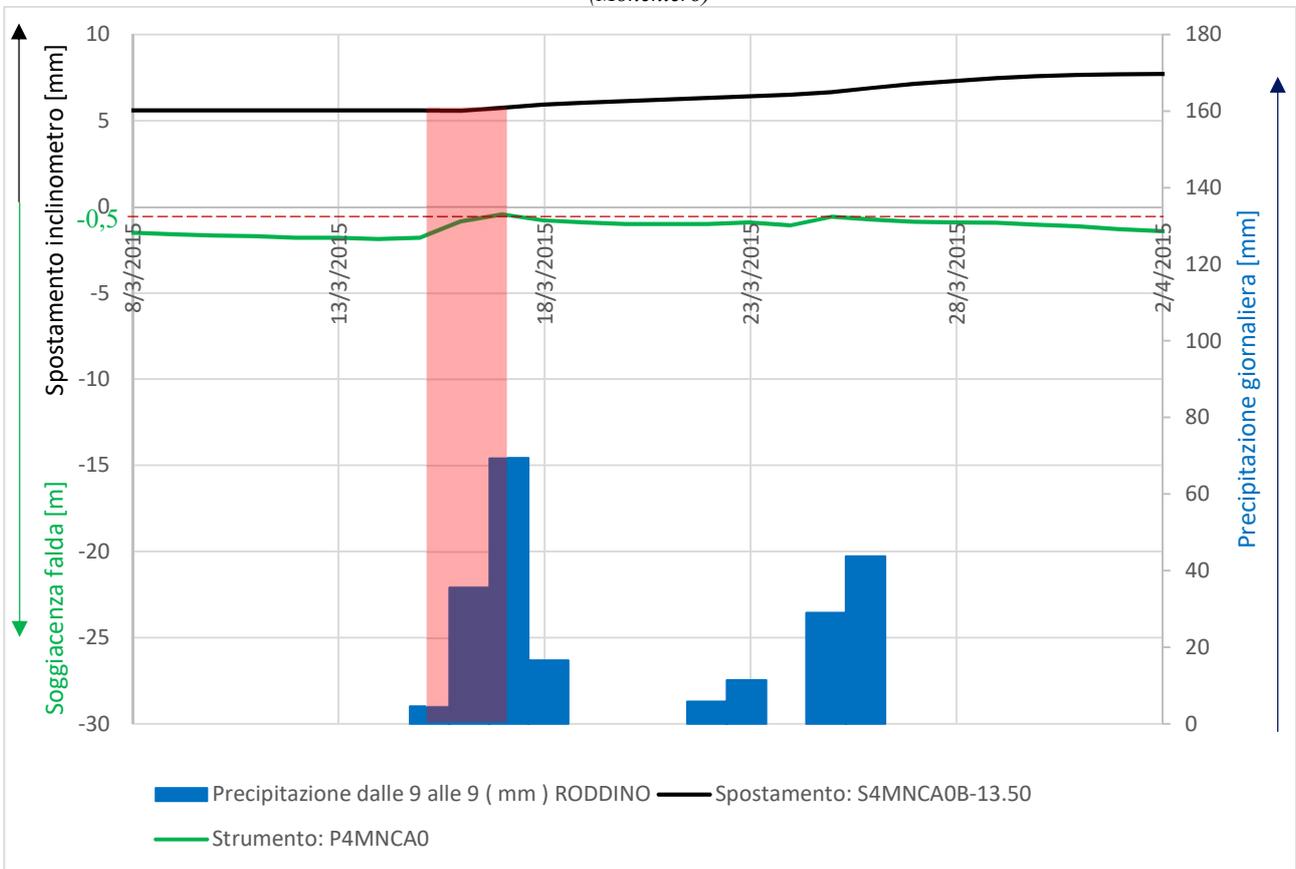


Figura 82: Misure piezometriche, inclinometriche, pluviometriche e nivometriche che descrivono lo spostamento di marzo 2015 (Monchiero)

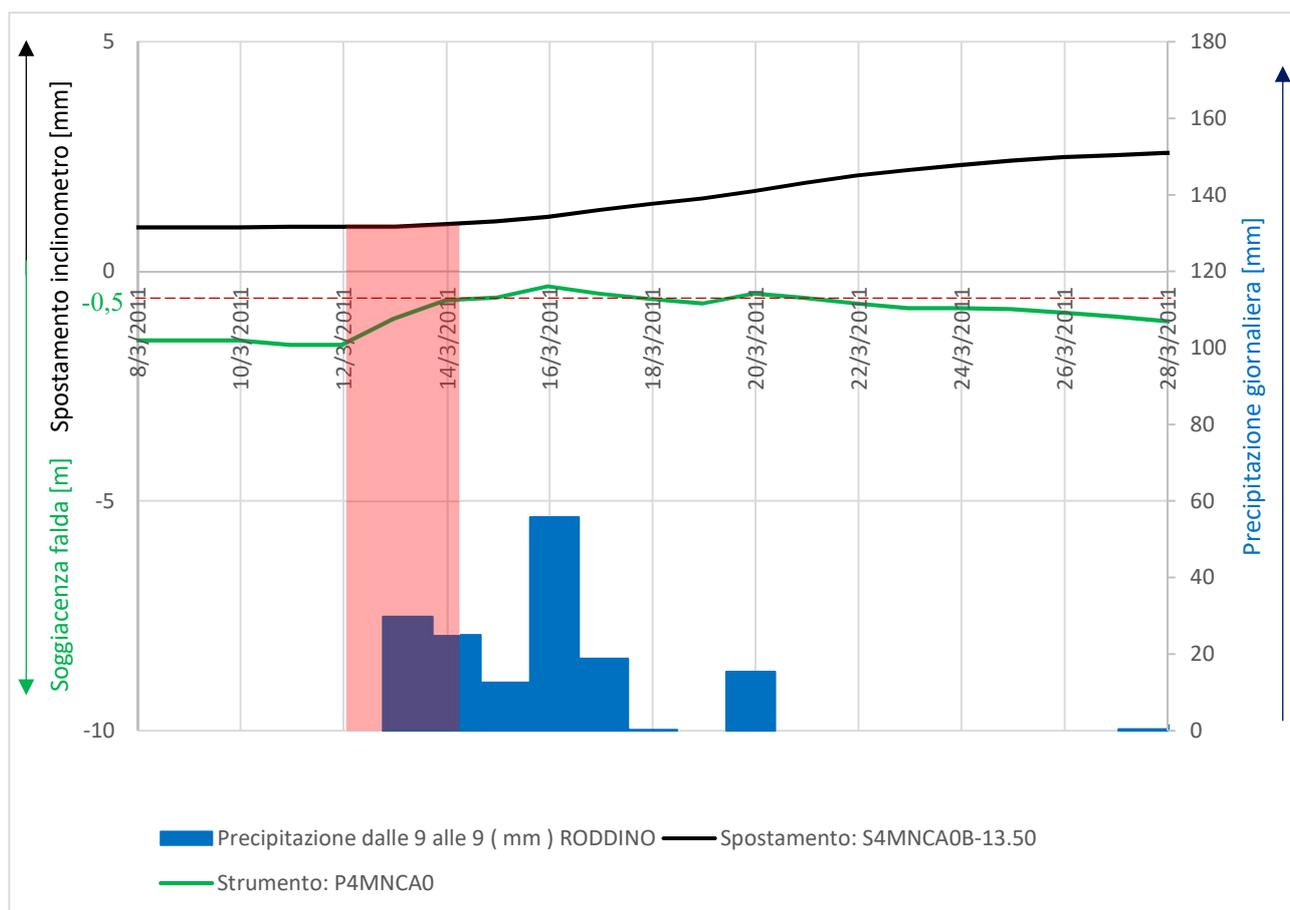


Figura 83: Misure piezometriche, inclinometriche, pluviometriche e nivometriche che descrivono lo spostamento di maggio 2013 (Monchiero)

I risultati delle analisi degli eventi meteorologici sono riassunti nella Tabella 16.

Tabella 16: Eventi meteorologici che hanno scatenato un movimento (Monchiero)

Evento	Durata [h]	Intensità media [mm/h]
maggio-2013	24	3,05
marzo-2014	72	0,89
marzo-2015	72	1,66
marzo-2011	96	1,42

Questi dati storici possono essere utilizzati per effettuare una back analysis del modello.

I dati di input del modello sono riportati in Tabella 17.

Tabella 17: Dati di input modello semplificato (Monchiero)

Δh falda	1,3	[m]
CN	78	[-]
Sy	0,035	[-]

Il primo parametro (Δh) è stato calcolato sulla media degli eventi analizzati in precedenza, infatti si è verificato che in primavera la soggiacenza media è circa pari a -1,8 m e la soglia media della falda (superata la quale si ha instabilità) è circa uguale a -0,5 m. Il secondo è stato scelto in base alla stratigrafia ed all'uso del suolo: in base ai dati forniti dall'ARPA Piemonte il terreno è caratterizzato da un primo strato di argilla profondo circa 13,5 m e successivamente un bedrock di marna compatta, inoltre su tale suolo sussiste una tipica coltivazione di vigneti. Infine, l'ultimo parametro è stato tarato in modo tale che meglio rappresentasse i valori degli eventi del passato, in particolare la procedura seguita è stata quella di farlo variare e per ogni valore considerare la corrispondente soglia e valutare tra tutte le curve così ottenute quale fosse quella che meglio rappresentasse i valori degli eventi del passato. Si è in ogni caso verificato che tale valore rientrasse nei limiti suggeriti dalla Tabella 8 (argilla $0,00 < S_y < 0,05$).

Utilizzando questi dati è stato possibile calcolare la soglia di allerta verde rappresentata in Figura 84.

Soglia di allerta ottenuta: $I = 62,3 \cdot D^{-1}$

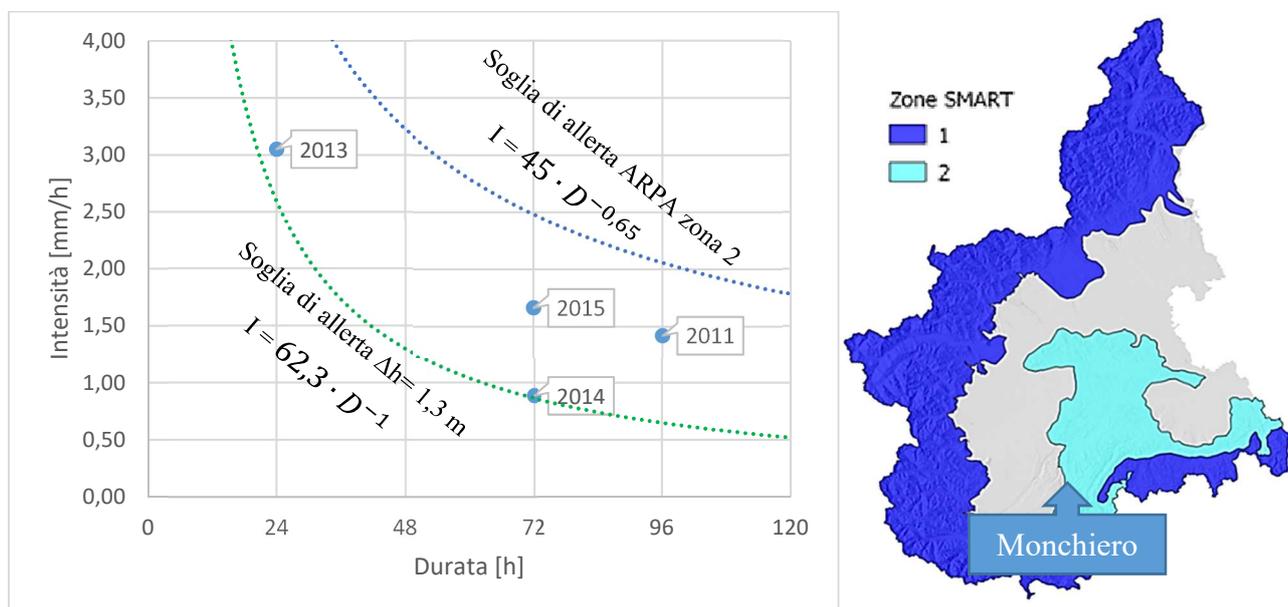


Figura 84: Soglia di allerta per il caso studio di Monchiero

Per confrontare la soglia d'allerta, creata come descritto precedentemente, è stata inserita anche quella sviluppata da ARPA nel modello SMART (Shallow landslides Movements Announced through Rainfall Thresholds).

Zona 1 : $I = 25 \cdot D^{-0,45}$

Zona 2 : $I = 45 \cdot D^{-0,65}$

Il comune di Monchiero si trova al limite tra la zona 2 e quella non analizzata quindi è stata utilizzata la seconda equazione, consapevoli però che il sito potesse non essere pienamente caratterizzato da tale equazione. Infatti, come si può notare tale curva risulta essere a favore di sicurezza e gli eventi di instabilità rimangono al di sotto.

Successivamente nell'intervallo di tempo tra il 2010 e il 2019 si è studiato il valore della precipitazione massima giornaliera tra marzo e giugno, in quanto tale periodo risulta essere quello in cui si sono verificate le instabilità.

Tabella 18: Precipitazioni massime giornaliere tra marzo e giugno nel periodo 2010-2019

massima precipitazione giornaliera tra il 1/03/2010 e 1/6/2010	33,4	[mm]
massima precipitazione giornaliera tra il 1/03/2011 e 1/6/2011	55,8	[mm]
massima precipitazione giornaliera tra il 1/03/2012 e 1/6/2012	44,8	[mm]
massima precipitazione giornaliera tra il 1/03/2013 e 1/6/2013	73,2	[mm]
massima precipitazione giornaliera tra il 1/03/2014 e 1/6/2014	40,6	[mm]
massima precipitazione giornaliera tra il 1/03/2015 e 1/6/2015	69,4	[mm]
massima precipitazione giornaliera tra il 1/03/2016 e 1/6/2016	37,4	[mm]
massima precipitazione giornaliera tra il 1/03/2017 e 1/6/2017	29,2	[mm]
massima precipitazione giornaliera tra il 1/03/2018 e 1/6/2018	38,4	[mm]
media tra le precipitazioni massime giornaliere tra marzo e giugno	49,0	[mm]

Si è osservato che la precipitazione massima giornaliera tra marzo e giugno solitamente coincide anche con la massima annua quindi per effettuare una stima dei cambiamenti climatici è stata applicata la variazione prevista da SCIA sulla precipitazione massima giornaliera media sul territorio italiano prevista nel 2061-2090 per lo scenario RCP8.5, l'ente nazionale prevede un incremento per tale parametro pari al 10%.

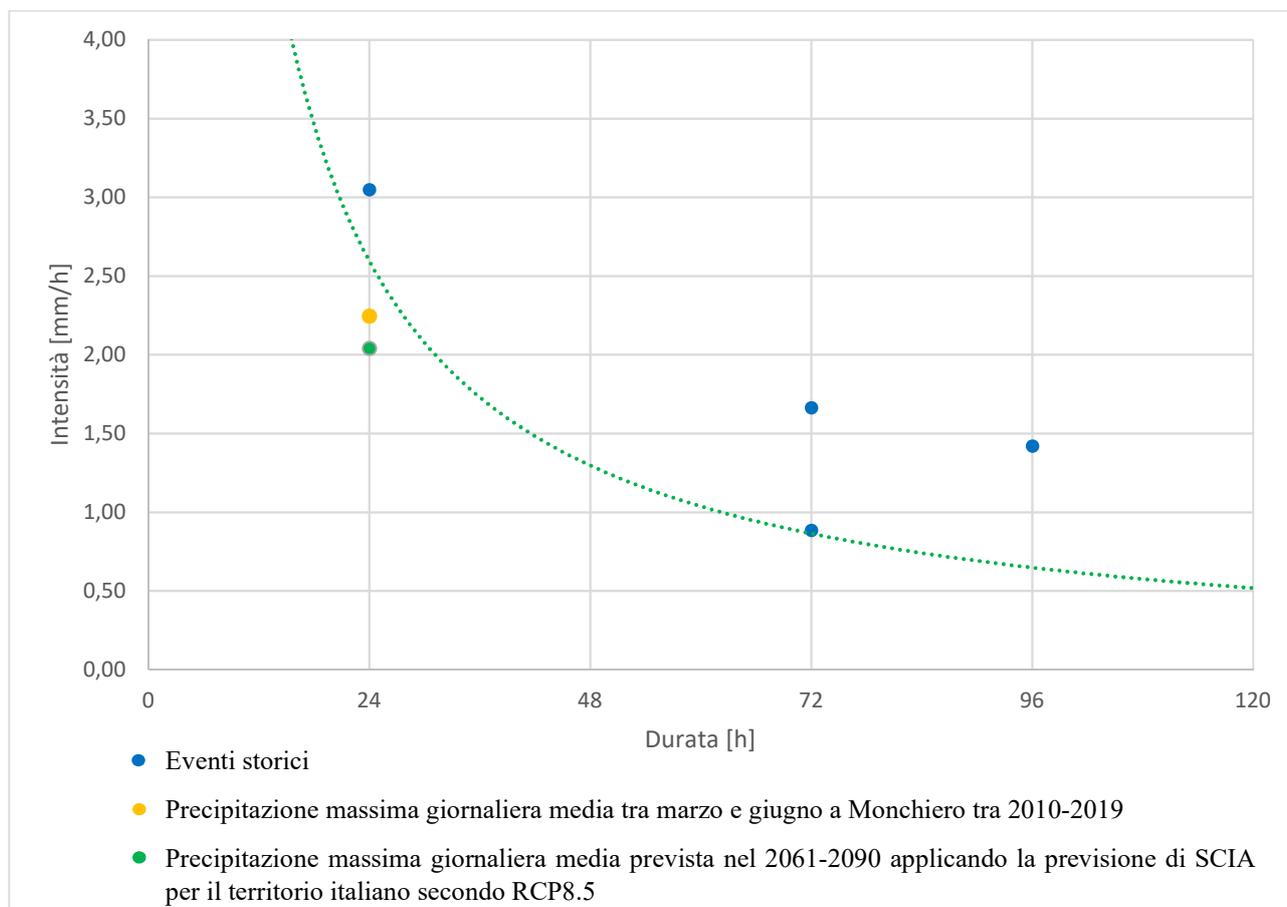


Figura 85: Analisi soglia di allerta con valutazione

Come si può notare dalla Figura 85 applicando la previsione di SCIA ci si avvicina alla soglia aumentando così le probabilità di instabilità a causa di un evento estremo in primavera. Se si avesse

un incremento del 27% dell'intensità della precipitazione massima giornaliera il punto raggiungerebbe la soglia rendendo così molto probabile un evento ogni anno e non quattro eventi di instabilità in dieci anni come si è verificato nel periodo analizzato.

5.4 SINTESI

In questo capitolo sono state effettuate le analisi tramite modello FEM per individuare gli effetti dei cambiamenti climatici sull'instabilità di versante.

La procedura seguita è stata quella di scegliere quattro tipologie di materiale caratteristiche (ghiaia, sabbia, limo, argilla) e successivamente ricavare per ognuna di esse una relazione di equilibrio limite tra parametri geometrici e variazione della falda. Bisogna però premettere che prima di definire tale legge per ogni materiale è stato definito un campo di esistenza, rispetto ai parametri geometrici, dei pendii soggetti ad instabilità da variazione di falda. Quindi sono state definite le combinazioni di α -L tali per cui un innalzamento della falda può portare il suddetto pendio in condizioni limiti e si è potuto notare, come lecito aspettarsi, che i pendii in ghiaia e sabbia avevano un campo di esistenza definito solamente dall'angolo di inclinazione, dato che non presentano coesione, mentre per i pendii in argilla e limo si è ottenuto un campo di esistenza definito da due curve esponenziali in cui l'intervallo di esistenza di α si amplia all'aumentare di L. Sono quindi state analizzate le leggi di equilibrio limite tra parametri geometrici e variazione della falda che definiscono per ogni combinazione di α -L quale è il Δh che fa diminuire il fattore di sicurezza del pendio fino ad un valore pari ad 1. Successivamente è stata definita la legge di risposta della falda alle precipitazioni e con essa è stato possibile creare delle curve che definissero l'insieme delle combinazioni $i; d$ delle precipitazioni tali per cui si ha un determinato Δh . Su queste curve è stato possibile studiare l'effetto dei cambiamenti climatici in termini di variazione della precipitazione massima giornaliera prevista da SCIA per gli anni a venire. I risultati ottenuti sono riassunti in Tabella 19.

Tabella 19: tabella riassuntiva delle variazioni del limite minimo dell'angolo di inclinazione dei pendii soggetti ad instabilità a causa della precipitazione massima giornaliera

Materiale del pendio	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla
Variazione del limite minimo dell'angolo di inclinazione dei pendii soggetti ad instabilità a causa della precipitazione massima giornaliera	- 0,2°	- 0,1°	- 0,2°	- 0,2°

Osservando i risultati così ottenuti, si può notare come gli impatti siano alquanto esigui ma bisogna sempre ricordare che l'effetto dei cambiamenti climatici analizzato, cioè l'aumento delle precipitazioni massime giornaliere, non sarà l'unico.

Successivamente sono stati analizzati i casi studio di Cissone e Monchiero.

Per il primo è stato effettuato in esame più generale, infatti per ogni evento di instabilità si sono ricavate l'intensità media e la durata della pioggia che dal minimo della falda estivo hanno portato al primo movimento primaverile letto dall'inclinometro. Una volta effettuato ciò per tutti i movimenti misurati dall'inclinometro, le combinazioni ($i; d$) sono state riportate su un grafico. A partire dai punti così ottenuti è stato possibile creare una soglia di allerta.

Invece per il caso studio di Monchiero si è cercato di applicare il metodo sviluppato in questa ricerca. Infatti, sono stati individuati dalle misure inclinometriche i principali movimenti registrati e per questi si è cercato l'evento meteorologico scatenante in primavera, in questo modo l'intervallo di analisi risulta limitato e la risposta della falda si è verificata essere repentina, così sono state rispettate le ipotesi che stanno alla base del metodo. Successivamente tali eventi meteorologici sono stati tradotti in termini di intensità e durata e riportati su un grafico, sul quale è stata creata una soglia di allerta.

Tale soglia di allerta è stata calcolata tramite stima dei parametri del metodo del Curve Number e di quello Water-Table Fluctuation in base alla geologia, morfologia e uso del suolo. Quindi la soglia di allerta così creata non è solo basata statisticamente sugli eventi del passato ma risulta avere anche una radice fisica alla base. Infine, analizzando i dati storici si è ottenuta la precipitazione giornaliera massima tra gli anni 2010 e 2018 e ad essa sono state applicate le percentuali di aumento dell'intensità previste da SCIA per valutare gli effetti dei cambiamenti climatici. Infine, si è osservato che se si avesse un incremento del 27% dell'intensità della precipitazione massima giornaliera si raggiungerebbe la soglia rendendo così molto probabile un evento ogni anno e non quattro eventi di instabilità in dieci anni come si è verificato nel periodo analizzato.

6 CONCLUSIONI

Lo studio proposto in questa tesi è stato finalizzato alla definizione dell'influenza dei cambiamenti climatici sull'instabilità di versante e aveva come obiettivo quello di quantificare tale fenomeno.

A tal fine, è stata condotta innanzitutto un'analisi generale e semplificata atta a dare una visione d'insieme. Data la complessità del fenomeno e le molte variabili in gioco, in questa prima parte infatti sono stati creati modelli geomeccanici semplici, cioè quelli caratterizzati da un pendio indefinito (deformazione piana), con inclinazione del pendio costante, con terreno omogeneo ed isotropo. Oltre a tali ipotesi bisogna tenere in considerazione che per definire la legge di infiltrazione sono stati combinati i metodi del Curve Number e quello Water-Table Fluctuation che forniscono un'ampia banca dati a supporto ma anche delle limitazioni. Infatti, utilizzando questi approcci si va a considerare che l'apporto di acqua alla falda sia dato solamente dalla precipitazione. Inoltre, ciò rende possibile studiare solo i casi in cui la risposta della falda sia veloce e in un arco temporale limitato (eventi repentini) poiché in tale intervallo, come ipotizzato dal metodo WTF, le perdite sono trascurabili e si può considerare che sia la precipitazione la principale causa dell'innalzamento della falda. Queste ipotesi sono accettabili nel presente studio in quanto si è analizzato il caso di precipitazioni estreme, con durate limitate.

Tenendo conto di questa dovuta premessa sulle limitazioni che contestualizzano i risultati ottenuti e inoltre essendo partiti dall'ipotesi sulla condizione originaria del pendio (soggiacenza costante e pari ad H_0) non sarebbe propriamente corretto confrontare e commentare i risultati ottenuti in termini assoluti ma risulta più congruo osservarli in maniera relativa. Quindi partendo dai risultati ottenuti si può osservare come i cambiamenti climatici, in termini di variazione della precipitazione giornaliera massima, avrebbero nel 2061- 2090 un impatto pari a circa $0,2^\circ$ sul limite minimo dell'angolo di inclinazione dei pendii soggetti ad instabilità dovuta alla suddetta precipitazione. In particolare, si può osservare dalla tabella riassuntiva (Tabella 19) che solo la sabbia risulta avere un valore diverso da quello indicato precedentemente. Dai risultati relativi, i pendii in sabbia sono quelli che dovrebbero rispondere meglio ai cambiamenti climatici, infatti la variazione del limite minimo dell'angolo di inclinazione dei pendii soggetti ad instabilità a causa della precipitazione massima giornaliera è la più bassa e risulta pari a $0,1^\circ$. Ciò è dovuto al fattore S_y (specific yield), infatti la sabbia risulta essere il materiale con il valore più alto. In generale, partendo dai risultati ottenuti, si può notare come gli impatti siano alquanto esigui ma bisogna sempre ricordare che l'effetto dei cambiamenti climatici

analizzato, cioè l'aumento delle precipitazioni massime giornaliere, non sarà l'unico. Al contrario, come previsto da SCIA, vi sarà anche una concentrazione delle precipitazioni che aggraverà la situazione. Oltre a quest'ultimo fenomeno bisogna anche considerare che la progressiva desertificazione, le ondate di calore e altri eventi estremi ad essi connessi potrebbero influenzare in maniera negativa le caratteristiche geomeccaniche diminuendo la resistenza dei materiali costituenti i pendii. Però non va trascurato che vi potrebbero anche essere effetti benefici, come per esempio l'abbassamento medio della falda dovuto all'aumento della temperatura media globale ed alle ondate di calore più frequenti.

In questo senso si potrebbe utilizzare una legge di infiltrazione più complessa, rispetto a quella seguita in questo studio, per riuscire a tenere in considerazione un numero di parametri più elevato. Ciò implicherebbe uno sforzo maggiore nella determinazione delle numerose variabili ma i risultati riuscirebbero a tenere conto di un insieme di effetti dei cambiamenti climatici più ampio, come per esempio la variazione della temperatura.

Infine, i casi studio sono stati utilizzati come banco di prova per le analisi e previsioni sopra descritte. Nel caso di Cissone si è effettuata una ricerca più generale che ha portato ad osservare come gli eventi meteorologici che hanno innescato un movimento negli ultimi 14 anni si stiano concentrando (durate minori) come previsto per il nord Italia dalle maggiori agenzie che hanno studiato i cambiamenti climatici. Invece per il caso studio di Monchiero si è applicato il metodo semplificato sviluppato in questa ricerca dato che quest'ultimo presentava eventi meteorologici estremi in primavera che scatenavano movimenti registrati dall'inclinometro. Questa analisi ha condotto alla creazione di una soglia di allerta non solo basata statisticamente sugli eventi storici ma anche con una radice fisica alla base. Studiandola si è osservato che se si avesse un incremento del 27% dell'intensità della precipitazione massima giornaliera si raggiungerebbe la soglia rendendo così molto probabile un evento ogni anno e non quattro eventi di instabilità in dieci anni come si è verificato nel periodo analizzato. È bene ricordare che secondo le previsioni di SCIA già nel 2061-2090 si prevede di raggiungere il 10%, quindi si può capire come la situazione possa peggiorare.

In conclusione, per riuscire a comprendere meglio gli effetti dei cambiamenti climatici sull'instabilità dei pendii sarebbe opportuno abbinare al metodo sviluppato in questa ricerca, per l'analisi di eventi estremi di breve durata, anche uno studio sugli effetti più a lungo termine, quindi con intervalli di analisi più ampi, che permetterebbe di considerare anche parametri come la temperatura e le ondate di calore in modo tale da coniugare in un unico modello gli effetti dell'evoluzione del clima nei prossimi decenni.

7 BIBLIOGRAFIA

- Alvioli M., Mellino M., Guzzetti F., Rossi M., Palazzi E., Jost von Hardenberg, Brunetti M.T., Peruccacci S.; 2018; Implications of climate and change on landslide hazard in central Italy; *Science of The Total Environment* 630, 1528-1543.
- ARPA; 1998; Eventi alluvionali in Piemonte - 1994, 1996
- ARPA; 2018; Scheda SIFraP 004-20211-03 Comune di Somano - Località: C.na Pedrotti
- ARPA; 2018; Scheda SIFraP 004-36348-01 Comune di Monchiero - Località: Rio Rolando (versante sinistro)
- ARPA; 2018; Scheda SIFraP 004-60097-00 Comune di Cissone - Località: Pianezza
- Ceola S.; 2014; Modeling catchment scale infiltration; *Advanced Hydrology & Water Resources Management*
- Cook J.; 2010; Una Guida Scientifica allo Scetticismo del Riscaldamento Globale
- Crozier M.J.; 2010; Deciphering the effect of the climate change on landslide activity; *Geomorphology* 124(3-4), 260-267 (2010).
- EEA; 2012; Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012
- European Environment Agency; 2013; Adattamento al cambiamento climatico in Europa;
- European Environment Agency; 2017; Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe;
- European Environment Agency; 2017; Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016;
- European Environment Agency; 2019; Heavy precipitation;
- Freeze R. A., Cherry J. A.; 1979; *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604 pp
- Gariano S.L., Rianna G., Petrucci O., Guzzetti F.; 2017; Assessing future changes in the occurrence of rainfall-induced landslides at a regional scale; *Science of the Total Environment*
- Gariano S.L., Guzzetti F.; 2016; Landslides in a changing climate; *Earth-Sci. Rev.* 162 (2016)
- Giordano F., Sebbio C., Antolini G., Botarelli L., Flapp F., Bonati V., Onorato L., Loglisci N., Priod G., Pelosini R., Metroni A., Morra di Cella U.; 2018; Criteri per la definizione di indicatori prioritari di impatto dei cambiamenti climatici: verso un ser a livello nazionale;
- Healy R.W., Cook P.G.; 2002; Using groundwater levels to estimate recharge; *Hydrogeology Journal* (2002) 10: 91.
- IPCC; 2012; *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*
- IPCC; 2014; *AR5 Synthesis Report - Climate Change 2014*
- IPCC; 2018; *Global warming of 1.5°C*;
- ISPRA; 2015; *Il clima futuro in Italia: analisi delle proiezioni dei modelli regionali*;

ISPRA; 2018; Gli indicatori del clima in Italia nel 2017

Laio F.; 2018; Appunti del corso di Idrologia

Lerner D. N., Issar A. S., Simmers I.; 1990; Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge.

Lim, Jae k., Engel B. A., Muthukrishnan S., Harbor J.; 2006; Effects of initial abstraction and urbanization on estimated runoff using cn technology; J. Am. Water Resour. Assoc. 2006, 42, 629–643.

Mercalli L., Cat Berro D.; 2016; Cambiamenti climatici e impatti sui territori montani; Scienze del Territorio, vol. 4, 2016.

Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare; 2014; Elementi per una strategia nazionale di adattamento ai cambiamenti climatici;

Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare; 2014; Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia;

Musolino G.; 2015; Stima della portata al colmo con diverse metodologie di calcolo ed applicazione al bacino idrologico del Calopinace, p 13

OcCC/ProClim; 2007; Climate Change and Switzerland 2050. Expected Impacts on Environment, Society and Economy. Bern.

Pasqualini L.; 2017; Meteo, centimetri Vs millimetri: ecco come calcolare gli accumuli di neve

Pirulli M.; 2019; Appunti del corso di Stabilità dei Pendii

Scanlon B. R., Healy R. W., Cook P. G.; 2002; Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge; Hydrogeology Journal (2002) 10: 18.

SCIA; 2015; Gli indicatori del clima in Italia nel 2015

SCIA; 2017; Gli indicatori del clima in Italia nel 2017

Stoffel M., Huggel C.; 2012; Effects of climate change on mass movements in mountain environment; Prog. Phys. Geogr. Earth Environ. 36, 421–439.

Stoffel M., Tiranti D., Huggel C.; 2014; Climate change impacts on mass movements- case studies from the european Alps; Science of The Total Environment Volume 493, 2014, Pages 1255-1266

Tang A. M., Hughes P. N., Dijkstra T. A., Askarinejad A., Brencić M., Cui Y. J., Diez J. J., Firgi T., Gajewska B., Gentile F., Grossi G., Jommi C., Kehagia F., Koda E., ter Maat H. W., Lenart S., Lourenco S., Oliveira M., Osinski P., Springman S. M., Stirling R., Toll D. G., Van Beek V.; 2017; Atmosphere–vegetation–soil interactions in a climate change context; impact of changing conditions on engineered transport infrastructure slopes in Europe

USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service), 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. Technical Release 55, U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, Washington, D.C

USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service), 1985. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, Washington, D.C.

8 *SITOGRAFIA*

<http://www.arpa.piemonte.it>

<https://www.water.usgs.gov>

<https://www.wikipedia.org>

<http://www.treccani.it>

9 ALLEGATI

Tabella 20: Portfolio di potenziali indicatori di impatto dei cambiamenti climatici per ciascun settore analizzato, fonte "CRITERI PER LA DEFINIZIONE DI INDICATORI PRIORITARI DI IMPATTO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI: VERSO UN SET A LIVELLO NAZIONALE", Francesca Giordano, Claudia Sebbio, Gabriele Antolini, Lucio Botarelli, Federica Flapp, Veronica Bonati, Luca Onorato, Nicola Loglisci, Graziella Priod, Renata Pelosini, Andrea Motroni, Umberto Morra di Cella.

SETTORE	IMPATTO	INDICATORE
ECOSISTEMI MARINI	Alterazione delle comunità ecologiche e delle reti trofiche marine (popolamenti planctonici)	Stima della biomassa planctonica attraverso la fluorescenza indotta (Clorofilla a)
	Alterazione delle comunità ecologiche e delle reti trofiche marine (popolamenti planctonici)/Modifica della fisiologia degli organismi marini	Nanoplancton calcareo: abbondanza e spessore del coccolite*
	Alterazione delle comunità ecologiche (fitoplancton) e delle reti trofiche marine	Composizione e spettro dimensionale della componente autotrofa planctonica*
	Alterazione delle comunità ecologiche e delle reti trofiche marine	Areale, copertura e composizione della componente autotrofa bentonica (macroalghe e fanerogame) *
	Tropicalizzazione dei mari	Presenza di specie termofile aliene (es. pesci, ctenofori, molluschi, meduse)
	Alterazione delle comunità ecologiche e delle reti trofiche marine	
	Meridionalizzazione dei mari	Areali delle specie termofile indigene e delle specie a indole boreale (es. pesci, molluschi, meduse)
ECOSISTEMI DI ACQUE INTERNE E DI TRANSIZIONE	Modifica del ciclo vitale (fenologia)	Curva di volo di insetti che svolgono parte del ciclo vitale in acqua
	Modifica della composizione e delle dinamiche delle comunità ecologiche acquatiche	Rapporto tra entità microterme ed entità termofile all'interno di gruppi tassonomici di invertebrati delle acque dolci
	Modifica della composizione delle comunità ecologiche acquatiche	Successioni fitoplanctoniche in ambiente lacustre
	Aumento di specie aliene/invasive/problematiche	Presenza, abbondanza e diffusione di specie vegetali aliene in ecosistemi delle acque interne*
	Modifica della distribuzione geografica delle specie	Presenza, abbondanza e diffusione di specie vegetali acquatiche microterme*
	Alterazioni delle caratteristiche ecologiche dei laghi alpini, perdita di biodiversità	Profilo sulla colonna d'acqua di O ₂ , T°C, Cond, pH, trasparenza. Durata del periodo libero dai ghiacci
	Modifica della composizione delle comunità ecologiche acquatiche	
	Riduzione/perdita di habitat e di biodiversità	
SALUTE	Alterazione dei cicli biogeochimici e dello stato termico dei laghi	Paleolimnologia/analisi sedimenti lacustri storici e attuali
	Alterazioni del ciclo idrologico, riduzione/perdita di habitat e di biodiversità	Estensione, idroperiodo, connettanza degli ecosistemi di acque temporanee e composizione, struttura e dinamica dei loro popolamenti (animali e vegetali) *
	Effetti dei cambiamenti climatici sui singoli Elementi di Qualità Biologica (EQB) (valutazione delle specie)	Valutazione degli Elementi di Qualità Biologica (EQB) dei corpi idrici, in riferimento alle specie
	Incremento della morbilità in relazione alle ondate di calore	Ricoveri/accessi alle strutture sanitarie per patologie attribuibili a ondate di calore
	Incremento della mortalità in relazione alle ondate di calore	Costi dei ricoveri per patologie attribuibili a ondate di calore
	Aumento dell'incidenza di allergopatie polliniche in relazione alle variazioni di quantità e distribuzione temporale dei pollini allergenici	Mortalità per esposizione a ondate di calore
	Incremento della prevalenza delle allergopatie polliniche	Mortalità per cause specifiche in relazione alle ondate di calore
	Aumento dell'incidenza di malattie infettive da vettore	Primo accesso alle strutture sanitarie per esposizione a pollini (incidenza di nuovi casi/diagnosi/per anno)
Aumento dell'impatto di frane/alluvioni sulla salute	Variazione della quantità e della distribuzione temporale dei pollini allergenici	
	Accesso alle strutture sanitarie (ricoveri/accessi al P.S./ambulatori) per riacutizzazione sintomatologia asmatico-allergica	
	Numero di segnalazioni di malattie trasmesse da vettori animali (solo casi endemici)	
	Numero di specie vettori	
	Numero di generazioni del vettore	
	Numero di morti/feriti a seguito di eventi franosi e alluvionali	

STUDIO DELL'INFLUENZA DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO SUI FENOMENI DI INSTABILITÀ DEI VERSANTI MEDIANTE SOGLIE PLUVIOMETRICHE

SETTORE	IMPATTO	INDICATORE
SALUTE	Aumento dell'impatto delle mareggiate sulla salute	Numero di morti/feriti a seguito di mareggiate
FORESTE E PRODUTTIVITÀ FORESTALE	Perdita biodiversità/variazione composizione specifica	Composizione specifica arborea delle foreste
	Aumento del rischio di incendio	Entità degli incendi boschivi – incendi boschivi [potenziale di innesco e sviluppo incendi boschivi]
	Impatto sulla produttività forestale	Produttività netta degli ecosistemi forestali (NEP)
		Incremento corrente di volume dei soprassuoli forestali
AGRICOLTURA E PRODUZIONE ALIMENTARE	Variazione del calendario fenologico	Variazione data fioritura frumento
	Variazione della stagione utile di crescita	Giorni di crescita effettivi
	Variazione delle condizioni per la raccolta	Giorni utili con campi praticabili
	Variazione delle condizioni per la semina	Giorni utili per la semina
	Riduzione acqua nel suolo	Frazione di acqua disponibile
	Aumento della richiesta idrica	Richiesta di acqua irrigua
	Variazione della stagione irrigua	Data di apertura della stagione irrigua
		Durata della stagione irrigua
	Aumento del rischio di siccità agricola	Deficit traspirativo
		Numero di giorni con stress idrico
	Incremento della pressione parassitaria	Numero di generazioni delle popolazioni di insetti
	Variazione della produttività agricola	Radiazione globale effettiva
Produttività agricola del frumento		
PESCA MARITTIMA	Diminuzione locale delle specie ad affinità fredda/Cambiamento di areale di distribuzione di specie target della pesca	Composizione delle catture della pesca commerciale/Aumento relativo delle specie ad affinità calda
ACQUACOLTURA	Modifica della qualità ambientale nei siti di produzione	Delocalizzazione degli impianti in risposta ai cambiamenti ambientali
		Mortalità di specie allevate in relazione ad anomalie climatiche
	Diminuzione della produttività impianti acquacoltura	Indici di crescita specie allevate
		Produzione annuale (per alcune tipologie produttive)
	Aumento delle contaminazioni e rischio per la salute pubblica	Classe e numero dei corpi idrici conformi per la vita dei molluschi
		Giorni di sospensione della raccolta di molluschi nelle aree di produzione
	Peggioramento dello stato di salute delle specie allevate	Eventi di malattie specie allevate per cambiamenti climatici
Danni strutturali agli impianti	Domande di sostegno per eventi calamitosi climatici estremi	
ENERGIA	Modifica dei consumi energetici	Punta oraria di fabbisogno energia elettrica nei mesi estivi
		Consumi elettrici nei mesi estivi e nei mesi invernali
		Consumo di energia per raffrescamento e raffreddamento
	Variabilità/diminuzione della produzione energetica	Produzione di energia idroelettrica
	Variabilità della produzione energetica	Energia idroelettrica da impianti a serbatoio
	Variabilità della fornitura energetica	Interruzioni/indisponibilità di fornitura elettrica dovuta a cause meteorologiche
	Variabilità della trasmissione e della distribuzione energetica	Perdita di trasmissione e di distribuzione di energia elettrica
Decremento della potenzialità idroelettrica	Potenziale <i>inflow</i> nei bacini idroelettrici	
ZONE COSTIERE	Variazione del livello del mare	Innalzamento del livello del mare
	Variazione del livello del mare/ingressione marina	Erosione costiera
	Variazione del clima ondoso/frequenza mareggiate	Frequenza di condizioni di mare agitato
		Aumento delle superfici inondate nelle città costiere

SETTORE	IMPATTO	INDICATORE
ZONE COSTIERE	Variazione del clima ondosso/frequenza mareggiate	Danni a beni pubblici e privati dovuti a eventi estremi/mareggiate
TURISMO	Modifica dei flussi turistici/spostamento a livello stagionale, con un aumento dell'afflusso di turisti dei mesi caldi estivi verso i mesi primaverili e autunnali/spostamento della scelta delle destinazioni turistiche verso maggiori latitudini e altitudini	Flussi turistici stagionali sul totale
	Modifica dei flussi turistici	Durata della stagione sciistica (data apertura/chiusura impianti)
		Numero di skipass venduti (e introiti €)
		Numero di contratti di lavoratori stagionali (e costi €)
	Modifica della richiesta idrica per produzione di neve programmata	Consumo idrico per produzione di neve programmata
Modifica dei consumi energetici per produzione di neve programmata	Consumo di energia per produzione di neve programmata	
PATRIMONIO CULTURALE	Perdita di materiale e processi di corrosione	Recessione superficiale per materiali lapidei e metalli
	Annerimento	Mappatura delle concentrazioni di particolato atmosferico
	Decoesione dei materiali lapidei	Termoclastismo (stima delle tensioni interne dei materiali lapidei)
	Biodegrado	Accumulo di biomassa e stima della ricchezza di specie licheniche
TRASPORTI E INFRASTRUTTURE	Aumento dei danni alle infrastrutture e dei disservizi a causa di un evento meteorologico estremo/mareggiate o di una conseguenza (frane/alluvioni)	Chiusura di una infrastruttura al traffico
		Danni alle infrastrutture urbane
		Danni alle infrastrutture costiere
INDUSTRIE E INFRASTRUTTURE PERICOLOSE	Incremento degli incidenti e dei danni alle industrie ed infrastrutture (gasdotti, oleodotti, ecc) dovuti ad eventi meteorologici estremi e/o ai loro effetti (es. frane, inondazioni, fulminazioni, ecc)	Numero annuo di eventi NaTech occorsi sul territorio nazionale originato dagli effetti di un evento meteorologico estremo in uno stabilimento industriale o in una infrastruttura con coinvolgimento di sostanze pericolose
	Incremento danni a componenti ambientali e salute umana a seguito di incidenti dovuti ad eventi meteorologici estremi	Magnitudo (entità) dei danni a componenti ambientali e salute umana a seguito di incidenti dovuti ad eventi meteorologici estremi in uno stabilimento industriale o in una infrastruttura con coinvolgimento di sostanze pericolose

PRECIPITAZIONE CUMULATA	TREND (%/10 anni)
ANNUALE	
Italia	(-0.5 ± 1.0)
Nord	(-0.1 ± 1.3)
Centro	(-1.7 ± 1.2)
Sud e Isole	
STAGIONALE (Italia)	
Inverno	(-1.3 ± 2.3)
Primavera	(+0.3 ± 1.5)
Estate	(-3.0 ± 2.3)

Figura 86: Trend stimati (e relative deviazioni standard) delle precipitazioni cumulate dal 1961 al 2017. Tra parentesi i trend statisticamente non significativi al livello del 5%. Fonte: "Rapporto clima 2017", ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

Tipo idrologico di suolo	Descrizione
A	Scarsa potenzialità di deflusso. Comprende sabbie profonde con scarsissimo limo e argilla; anche ghiaie profonde, molto permeabili.
B	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa. Comprende la maggior parte dei suoli sabbiosi meno profondi che nel gruppo A, ma il gruppo nel suo insieme mantiene alte capacità di infiltrazione anche a saturazione.
C	Potenzialità di deflusso moderatamente alta. Comprende suoli sottili e suoli contenenti considerevoli quantità di argilla e colloidali, anche se meno che nel gruppo D. Il gruppo ha scarsa capacità di infiltrazione a saturazione.
D	Potenzialità di deflusso molto alta. Comprende la maggior parte delle argille con alta capacità di rigonfiamento, ma anche suoli sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza delle superfici.

Figura 87: CN, definizione delle tipologie idrologiche di suolo

Tipo di copertura			Classe del suolo			
Uso del suolo	Trattamento o pratica	Condizione idrologica	A	B	C	D
Maggesi	a solchi dritti	-	77	86	91	94
Colture a solchi	a solchi dritti	cattiva	72	81	88	91
	a solchi dritti	buona	67	78	85	89
	a reggipoggio	cattiva	70	79	84	88
	a reggipoggio	buona	65	75	82	86
	a re. e terrazze	cattiva	66	74	80	82
	a re. e terrazze	buona	62	71	78	81
Grani piccoli	a solchi dritti	cattiva	65	76	84	88
	a solchi dritti	buona	63	75	83	87
	a reggipoggio	cattiva	63	74	82	85
	a reggipoggio	buona	61	73	81	84
	a re. e terrazze	cattiva	61	72	79	82
	a re. e terrazze	buona	59	70	78	81
Legumi seminati folti o prati in rotazione	a solchi dritti	cattiva	66	77	85	89
	a solchi dritti	buona	58	72	81	85
	a reggipoggio	cattiva	64	75	83	85
	a reggipoggio	buona	55	69	78	83
	a re. e terrazze	cattiva	63	73	80	83
	a re. e terrazze	buona	51	67	76	80
Pascoli		cattiva	68	79	86	89
		discreta	49	69	79	84
		buona	39	61	74	80
	a reggipoggio	cattiva	47	67	81	88
	a reggipoggio	discreta	25	59	75	83
	a reggipoggio	buona	6	35	70	79
Prati		buona	30	58	71	78
Boschi		cattiva	45	66	77	83
		discreta	36	60	73	79
		buona	25	55	70	77
Aziende agricole		-	59	74	82	86
Strade sterrate		-	72	82	87	89
Str. pavimentate		-	74	84	90	92

Figura 88: Valori del parametro CN per diverse combinazioni di suolo e di copertura

RINGRAZIAMENTI

Innanzitutto, vorrei ringraziare il prof. Marco Barla, relatore di questa tesi di laurea, e l'ing. Alessandra Insana, correlatore, per l'aiuto fornitomi in tutti questi mesi e la grande conoscenza che mi hanno donato, oltre che per la disponibilità e precisione dimostratemi durante tutto il periodo di stesura.

Voglio ringraziare la mia famiglia e i miei genitori in particolare per avermi sempre supportato, aiutato, spronato e incoraggiato. All'inizio di questo percorso penso che abbiate creduto più voi in me di quanto io abbia fatto. Vorrei anche sottolineare come mio fratello mi abbia aiutato non solo moralmente in questi anni ma anche con gli studi. La presenza costante dei miei nonni, Corrado, Annamaria e Sandro, e di mia prozia, Margherita, è sempre stata indispensabile. Vorrei ricordare anche mia nonna Caterina che da cinque anni da lassù mi aiuta ed ho sempre creduto che gli eventi fortunati avvenuti in questi anni fossero una sua opera. Un grazie anche ai miei zii ed a mia cugina, avete anche voi sempre creduto in me. Per concludere questa sezione vorrei anche ringraziare mia cugina Camilla per tutti i consigli di questi cinque anni di Politecnico.

Ora vorrei passare ai miei amici. Innanzitutto, quelli del liceo, Luca, Gianti, Ghiba, Frecs, Pier, Mariots. Grazie di aver condiviso con me così tanto, di esserci protetti e rallegrati a vicenda.

Grazie anche a te Emily che fin da quando ci siamo conosciuti mi sproni a mettermi in gioco, sei la mia compagna di avventure.

Grazie ai miei più vecchi amici, quelli di Pianfei, è da una vita che ci conosciamo Jacopo, Samuele e Stefano, e siamo sempre qua.

Per ultimi ma non meno importanti, un ringraziamento anche a Cristiano, Carlo e Daniel.

Un ringraziamento anche a te Mari.

Nonostante tu mi abbia lasciato forse nel momento in cui io avevo più bisogno di te, niente può cancellare quello che hai fatto, l'aiuto e il supporto che mi hai dato in questi ultimi due anni di università. La nostra storia era riiniziata proprio nei primi mesi della magistrale e si è conclusa poco prima della fine, quindi questo percorso l'ho fatto con te, insieme e questa vittoria è anche tua.

Vorrei poi ringraziare tutti i colleghi con cui ho avuto il piacere di collaborare durante il mio percorso di studi. Ciascuno di voi mi trasmesso un insegnamento. In particolare, grazie ad Alessandro, Fabio e Paolo, fedeli alleate che l'università mi ha regalato.