

**POLITECNICO DI MILANO**  
SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E  
TERRITORIALE



LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

---

DINAMICA DEI SISTEMI PASCOLIVI MONTANI MULTI  
SPECIE IN RISPOSTA AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

IL GRAN PARADISO

---

Sonia MORGESE

RELATORE:

Prof. Daniele BOCCHIOLA

CORRELATORE:

Ing. Francesca CASALE

ANNO ACCADEMICO 2020/21



*But human beings, at our best, are so inventive and creative and ingenious,  
and I think that when we use love and compassion as our guiding principles,  
we can create, develop and implement systems of change that are beneficial to  
all sentient beings and to the environment.*

*Joaquin Phoenix, Oscars 2020*



# Ringraziamenti



# Sommario

L'oggetto dell'elaborato di tesi è l'effetto dei cambiamenti climatici sulla produttività pascoliva nel Parco Nazionale del Gran Paradiso. A tal scopo, sono stati introdotti degli indicatori agro-climatici. Le dinamiche del PNGP sono legate alla complessa idrologia criosferica dei bacini alpini e alla competizione interspecifica nella comunità colturale. Tali dinamiche sono destinate a variare a fronte dei potenziali scenari di cambiamenti climatici. Il modello *Poli-Hydro* è usato per simulare l'idrologia dei bacini ad alta quota, il modello *Poly-Pasture* è usato per la correzione dell'evapotraspirazione nelle aree di pascolo e per la simulazione della crescita della biomassa, e il modello *CoSMo* per la competizione interspecifica tra le specie: *Trifolium Alpinum* e *Dactylis Glomerata* a bassa quota (zone ad altitudine minore di 1800 m s.l.m.), e *Festuca Rubra* e *Nardus Stricta* ad alta quota (altitudine superiore a 1800 m s.l.m.). La calibrazione e validazione dei modelli è stata eseguita in funzione del parametro LAI (Indice di Area Fogliare) nel periodo di controllo 2005-2019, confrontando i valori di LAI simulati dal modello colturale con quelli osservati disponibili da immagini satellitari. Mediante l'utilizzo di quattro scenari dell'AR6 dell'IPCC: SSP1 2.6, SSP2 4.5, SSP3 7.0 e SSP5 8.5, applicati a sei modelli GCM: CESM2, CMCC, EC-EARTH3, HADGEM3, MIROC6 e MPI-ESM, sono stati ricavati i dati meteorologici fino all'anno 2100. A partire dalle proiezioni climatiche prodotte si sono stimati gli indicatori agro-climatici, l'area fogliare, la biomassa e la produttività pascoliva futuri.

I risultati ottenuti mostrano un peggioramento complessivo nelle zone di pascolo a bassa quota. Complessivamente, l'indice di area fogliare, secondo gli scenari analizzati, segna un calo fino al 23% per il decennio 2041-2050 e fino al 34% per il decennio 2091-2100, soprattutto a bassa quota dove si arriva fino -60% entro il 2100. A causa dell'aumento di temperature, è stato riscontrato un potenziale aumento di produttività nelle aree più elevate (fino al 15% in più entro il 2050 e del 20% in più entro il 2100) e un gravoso decremento nelle zone a bassa quota. I risultati portano in evidenza che il potenziale bestiame, e quindi tutta l'economia ad esso associata, si svilupperà in aree alpine più elevate rispetto alle attuali.





# Abstract

This study aims to assess the impact of climate change upon productivity of mountain pastures at Parco Nazionale del Gran Paradiso, Italy. For this purpose, I introduced some agro-climatic indices. PNGP dynamics are linked to the complex cryospheric hydrology of Alpine catchment and to the interspecies competition, which are in turn expected to change remarkably under prospective global warming scenarios. The *Poli-Hydro* model is used to simulate the cryospheric processes affecting the hydrology of high altitude catchments, the *Poly-Pasture* model is used to ETP correction in pasture areas and for the evaluation of actual biomass growth and *CoSMo* model is used for the interspecific competition among the species: *Trifolium Alpinum* and *Dactylis Glomerata* for low altitude belt (elevation lower than 1800 m a.s.l.), instead *Festuca Rubra* and *Nardus Stricta* for high altitude belt (elevation greater than 1800 m a.s.l.). Model calibration and validation is performed as a function of the parameter LAI (Leaf Index Area) over run period 2005-2019, comparing LAI values simulated by the crop model against observed values available from satellite imagery. Through four scenarios from AR6 of IPCC: SSP1 2.6, SSP2 4.5, SSP3 7.0 and SSP5 8.5, applied to six GCM models: CESM2, CMCC, EC-EARTH3, HADGEM3 and MPI-ESM, meteorological data up to the year 2100 are derived. From the climate projections, future agro-climatic indices, leaf area and pasture yield were estimated.

Obtained results show an overall deterioration in the lower elevation grazing areas. Overall, the leaf area index, according to the scenarios analyzed, marks a decline of up to 23% for the 2041-2050 decade and up to 34% for the 2091-2100 decade, especially at lower elevations where it goes up to -60% by 2100. Due to increasing temperatures, a potential increase in productivity has been found in higher areas (up to 15% more by 2050 and 20% in by 2100) and a severe decrease in lower elevation areas. Results provide preliminary evidence of potential livestock, and thereby economic development in the valley at higher altitudes than now.



# Indice

<b>Ringraziamenti</b>	<b>v</b>
<b>Sommario</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Pascoli e Cambiamenti climatici . . . . .	3
<b>2 Caso di Studio</b>	<b>5</b>
2.1 Il Parco Nazionale Gran Paradiso . . . . .	5
2.1.1 La Valsavarenche . . . . .	7
2.1.2 La Val di Cogne . . . . .	7
2.2 Inquadramento climatico e idrologico . . . . .	10
2.3 Bacini interessati . . . . .	12
<b>3 Dati utilizzati</b>	<b>15</b>
3.1 Dati meteorologici . . . . .	15
3.2 Dati topografici . . . . .	19
3.3 Dati di Portata . . . . .	19
3.4 Uso del suolo . . . . .	20
3.4.1 Pascoli . . . . .	22
3.4.2 Ghiacciai . . . . .	25
3.5 Osservazioni LAI . . . . .	26
<b>4 Modello idrologico</b>	<b>29</b>
4.1 Poli-Hydro . . . . .	29
4.2 Fusione nivale e glaciale . . . . .	31
4.2.1 Modellazione nivale e glaciale - <i>Poli-Ice</i> . . . . .	32
4.3 Deflusso sotterraneo . . . . .	34
4.4 Evapotraspirazione . . . . .	34
4.4.1 Modellazione pascoliva - <i>Poly-Pasture</i> . . . . .	35

4.4.2	Biomassa e LAI . . . . .	37
4.4.3	Parametri del suolo . . . . .	39
4.4.4	Parametri di vegetazione . . . . .	39
4.5	Modello CoSMo . . . . .	45
4.5.1	Calibrazione CoSMo . . . . .	49
4.5.2	Parametri per la competizione interspecifica . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Calibrazione e validazione del Modello</b>	<b>53</b>
5.1	Indici di calibrazione . . . . .	54
5.2	Validazione LAI . . . . .	60
5.3	Validazione delle portate . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Modelli climatici</b>	<b>61</b>
6.1	IPCC . . . . .	61
6.2	Modelli di circolazione globale . . . . .	62
6.3	Limitazioni dei modelli . . . . .	63
6.4	Modelli considerati . . . . .	64
6.4.1	Modello CESM2 . . . . .	64
6.4.2	Modello CMCC . . . . .	64
6.4.3	Modello EC-EARTH3 . . . . .	65
6.4.4	Modello HadGEM3 . . . . .	65
6.4.5	Modello MIROC6 . . . . .	66
6.4.6	Modello MPI-ESM . . . . .	67
6.5	CMIP6 . . . . .	68
6.5.1	Representative Concentration Pathways . . . . .	68
6.5.2	Shared Socio-Economic Pathways . . . . .	69
6.5.3	Scenario MIP per CMIP6 . . . . .	70
<b>7</b>	<b>Downscaling modelli GCM</b>	<b>75</b>
7.1	Downscaling . . . . .	75
<b>8</b>	<b>Indicatori Agro-climatici</b>	<b>79</b>
8.1	Mappe di Produttività . . . . .	91
8.1.1	Relazione tra produttività ed altitudine . . . . .	92
8.2	Competizione interspecifica . . . . .	94
8.2.1	Presenza relativa e altitudine . . . . .	104
<b>9</b>	<b>Proiezioni Climatiche future</b>	<b>107</b>
9.1	Variazioni della temperatura . . . . .	107
9.1.1	Variazione della temperatura massima . . . . .	107
9.2	Variazioni della precipitazione . . . . .	109

<b>10 Dinamiche pascolive future</b>	<b>113</b>
10.1 Proiezioni di Produttività . . . . .	113
10.1.1 Relazione tra produttività futura ed altitudine . . . . .	120
10.2 Proiezioni di LAI . . . . .	122
10.2.1 Proiezioni LAI a bassa quota . . . . .	122
10.2.2 Proiezioni LAI ad alta quota . . . . .	122
10.2.3 Relazione con la Biomassa . . . . .	126
<b>11 Proiezioni degli indicatori Agro-Climatici</b>	<b>129</b>
<b>12 Conclusioni</b>	<b>159</b>
12.1 Riepilogo delle analisi . . . . .	159
12.2 Incertezze nella modellazione . . . . .	161
<b>Bibliografia</b>	<b>169</b>



# Elenco delle figure

2.1	Inquadramento geografico dell'area analizzata (versante Valdostano) del Parco Nazionale del Gran Paradiso. . . . .	6
2.2	Regimi Pluviometrici in Italia e Ietogramma mensile medio di regime sublitorale alpino. . . . .	11
2.3	Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Kppen-Geiger. . . . .	12
2.4	Suddivisione dell'area del PNGP nei tre sottobacini. . . . .	13
2.5	Percorso del fiume Dora rispetto al PNGP. . . . .	14
3.1	Rappresatazione grafica del metodo dei poligoni di Thiessen. . .	16
3.2	Stazioni idro-meteorologiche nell'area PNGP. . . . .	18
3.3	Mappa d'uso del suolo (CLC e PTP Valle d'Aosta). . . . .	21
3.4	Estensione dei Pascoli secondo il PTP nel PNGP. . . . .	22
3.5	Ripartizione dei Pascoli per fascia di quota. . . . .	23
3.6	Copertura dei pascoli assoluta rispetto all'area di interesse. . . .	23
3.7	Partizione dei pascoli tra alta e bassa quota. . . . .	24
3.8	Estensione dei ghiacciai secondo il PTP nel PNGP. . . . .	25
3.9	Immagine satellitare LAI - MODIS . . . . .	27
3.10	LAI riportato su <i>ArcGIS</i> (registrato in data 2006.7.28) nelle aree pascolive. . . . .	28
4.1	Sforzo di taglio <i>vs</i> dislivello di quota secondo Haeberli. . . . .	33
4.2	Valutazione del parametro $\alpha$ di Priestley e Taylor per l'evapotraspirazione secondo le specie erbacee di riferimento di: A) Piracicaba, SP, Brasil; B) Davis, CA, USA. . . . .	36
4.3	Schema semplificato dei calcoli Biomassa e LAI in $P - P$ . . . . .	38
4.4	Gerarchia della vegetazione pastorale nelle Alpi interne. . . . .	41
4.5	Specie di vegetazione a bassa quota del Gran Paradiso. . . . .	42
4.6	Specie di vegetazione a bassa quota del Gran Paradiso. . . . .	42
4.7	Diagramma del funzionamento di CoSMo. . . . .	46
4.8	Diagramma del funzionamento dei modelli impiegati. . . . .	52

5.1	Confronto tra LAI osservato in data in data 2006.7.28 e LAI simulato per lo stesso giorno nelle aree pascolive. . . . .	53
5.2	Confronto LAI tra modello e osservazione a bassa quota. . . . .	56
5.3	Confronto LAI tra modello e osservazione ad alta quota. . . . .	56
5.4	Confronto LAI tra modello e osservazione. . . . .	57
5.5	Confronto LAI giornaliero tra modello e osservazione. . . . .	57
5.6	Scatter plot: LAI da satellite vs LAI da modello $P - P$ durante la stagione di crescita. . . . .	58
6.1	Schema CMIP6. . . . .	69
6.2	Emissioni e concentrazioni di CO <sub>2</sub> , forze radiative antropogeniche e temperatura media globale nel 21° secolo secondo il CMIP6. . . . .	72
6.3	Cambiamenti in terreni coltivati, foreste, pascoli ed altri terreni naturali nel 21° secolo secondo il CMIP6. . . . .	73
8.1	Diagramma di flusso della metodologia di calcolo degli indicatori Agro-Climatici a partire da <i>Poli-Hydro</i> (idrologia) e da <i>Poly-Pasture</i> (crescita biomassa). . . . .	80
8.2	Produttività media di fine stagione del periodo 2005-2019. . . . .	91
8.3	Produttività (ton/ha) in funzione dell'altitudine per i pascoli a bassa quota. . . . .	92
8.4	Produttività (ton/ha) in funzione dell'altitudine per i pascoli ad alta quota. . . . .	93
8.5	Variazione della presenza relativa della specie 1 ( <i>Trifolium Alpinum</i> ) rispetto alla specie "competitiva" ( <i>Dactylis Glomerata</i> ), ad alta quota, a inizio stagione, nel periodo 2005-2019. . . . .	97
8.6	Variazione della presenza relativa della specie 1 ( <i>Trifolium Alpinum</i> ) rispetto alla specie "competitiva" ( <i>Dactylis Glomerata</i> ), ad alta quota, a fine stagione, nel periodo 2005-2019. . . . .	99
8.7	Variazione della presenza relativa della specie 1 ( <i>Festuca Rubra</i> ) rispetto alla specie "competitiva" ( <i>Nardus Sstricta</i> ), ad alta quota, a inizio stagione, nel periodo 2005-2019. . . . .	101
8.8	Variazione della presenza relativa della specie 1 ( <i>Festuca Rubra</i> ) rispetto alla specie "competitiva" ( <i>Nardus Sstricta</i> ), ad alta quota, a fine stagione, nel periodo 2005-2019. . . . .	103
8.9	Gradiente altitudinale di presenza relativa a bassa quota. Valutato a fine stagione 2019. . . . .	104
8.10	Gradiente altitudinale di presenza relativa ad alta quota. Valutato a fine stagione 2019. . . . .	105



9.1	Variazione della temperatura media nel decennio P1:2041-2050 nelle fasce ad alta quota secondo i diversi scenari dei GCM. . . . .	108
9.2	Variazione della temperatura media nel decennio P2:2091-2100 nelle fasce ad alta quota secondo i diversi scenari dei GCM. . . . .	109
9.3	Variazione della temperatura media nel decennio P1:2041-2050 nelle fasce a bassa quota secondo i diversi scenari dei GCM. . . . .	110
9.4	Variazione della temperatura media nel decennio P2:2091-2100 nelle fasce a bassa quota secondo i diversi scenari dei GCM. . . . .	110
9.5	Variazione della temperatura massima nel decennio P1:2041-2050 nelle fasce ad alta quota secondo i diversi scenari dei GCM. . . . .	111
9.6	Variazione della temperatura massima nel decennio P2:2091-2100 nelle fasce ad alta quota secondo i diversi scenari dei GCM. . . . .	111
9.7	Variazione della temperatura massima nel decennio P1:2041-2050 nelle fasce a bassa quota secondo i diversi scenari dei GCM. . . . .	112
9.8	Variazione della temperatura massima nel decennio P2:2091-2100 nelle fasce a bassa quota secondo i diversi scenari dei GCM. . . . .	112
10.1	Proiezioni future di Produttività, $tonha^{-1}$ , nelle aree pascolive secondo il modello CESM2 nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP. . . . .	114
10.2	Proiezioni future di Produttività, $tonha^{-1}$ , nelle aree pascolive secondo il modello CMCC nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP. . . . .	115
10.3	Proiezioni future di Produttività, $tonha^{-1}$ , nelle aree pascolive secondo il modello EC-EARTH3 nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP. . . . .	116
10.4	Proiezioni future di Produttività, $tonha^{-1}$ , nelle aree pascolive secondo il modello HADGEM3 nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP. . . . .	117
10.5	Proiezioni future di Produttività, $tonha^{-1}$ , nelle aree pascolive secondo il modello MIROC6 nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP. . . . .	118
10.6	Proiezioni future di Produttività, $tonha^{-1}$ , nelle aree pascolive secondo il modello MPI-ESM nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP. . . . .	119
10.7	Produttività ad alta quota vs altitudine, secondo gli scenari: MIROC6 SSP3 7.0 nel decennio P1 e MPI-ESM SSP1 2.6 in P2. . . . .	120
10.8	Produttività ad alta quota vs altitudine, secondo gli scenari: CMCC SSP5 8.5 nel decennio P1 e EC-EARTH3 SSP5 8.5 in P2. . . . .	120

10.9	Produttività a bassa quota vs altitudine, secondo gli scenari: HADGEM3 SSP2 4.5 nel decennio P1 e HADGEM3 SSP1 2.6 in P2. . . . .	121
10.10	LAI medio stimato dai GCM nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2050 a bassa quota rispetto al LAI medio attuale. . . . .	125
10.11	LAI medio stimato dai GCM nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2050 ad alta quota rispetto al LAI medio attuale. . . . .	125
10.12	Tasso giornaliero di biomassa e biomassa cumulata durante la stagione di crescita dell'anno 2014. . . . .	126
10.13	Tasso giornaliero di biomassa e biomassa cumulata durante la stagione di crescita dell'anno 2050 simulato da MPI-ESM SSP1 2.6. . . . .	127
10.14	Tasso giornaliero di biomassa e biomassa cumulata durante la stagione di crescita dell'anno 2100 simulato da HADGEM3 SSP5 8.5. . . . .	127
10.15	Tasso giornaliero di biomassa e biomassa cumulata durante la stagione di crescita dell'anno 2050 simulato da CMCC SSP2 4.5. . . . .	127
11.1	Presenza relativa delle due specie vs altitudine, secondo gli scenari: MIROC6 SSP2 4.5 nel decennio P1 e HADGEM SSP1 2.6 in P2. . . . .	131
11.2	Confronto tra l'indicatore AC1 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . . .	145
11.3	Confronto tra l'indicatore AC1 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . . .	145
11.5	Confronto tra l'indicatore AC2 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . . .	146
11.4	Confronto tra l'indicatore AC2 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . . .	146
11.6	Confronto tra l'indicatore AC3 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . . .	147
11.7	Confronto tra l'indicatore AC3 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . . .	148

11.8	Confronto tra l'indicatore AC4 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	148
11.9	Confronto tra l'indicatore AC4 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	149
11.10	Confronto tra l'indicatore AC5 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	149
11.11	Confronto tra l'indicatore AC5 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	150
11.12	Confronto tra l'indicatore AC6 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	150
11.13	Confronto tra l'indicatore AC6 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	151
11.14	Confronto tra l'indicatore AC7a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	151
11.15	Confronto tra l'indicatore AC7a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	152
11.16	Confronto tra l'indicatore AC7b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	152
11.17	Confronto tra l'indicatore AC7b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	153
11.18	Confronto tra l'indicatore AC8a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	153
11.19	Confronto tra l'indicatore AC8a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	154
11.20	Confronto tra l'indicatore AC8b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	154

11.21	Confronto tra l'indicatore AC8b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	155
11.22	Confronto tra l'indicatore AC9a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	155
11.23	Confronto tra l'indicatore AC9a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	156
11.24	Confronto tra l'indicatore AC9b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	156
11.25	Confronto tra l'indicatore AC9b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto. . . .	157

# Elenco delle tabelle

2.1	Comuni del Parco Nazionale del Gran Paradiso. . . . .	8
2.2	Coordinate del centroide e dimensioni del Parco Nazionale del Gran Paradiso. . . . .	8
3.1	Stazioni idro-meteorologiche nell'area PNGP. . . . .	19
3.2	Aree e copertura pascoli nell'area PNGP. . . . .	22
4.1	Temperature soglia di pioggia/neve $T_{threshold,snow}$ e neve/ghiaccio $T_{threshold,ice}$ . . . . .	32
4.2	Fattori termali e radiativi di ghiaccio e neve. . . . .	32
4.3	Parametri geo-idraulici del Modello $P - P$ nell'area PNGP. . . . .	39
4.4	Riepilogo dati di vegetazione campionati ad Orvieille, quota 2300 metri,Introd, in data 15/07/2019. . . . .	41
4.5	Parametri di vegetazione di bassa quota richiesti dal Modello $P - P$ nell'area PNGP. . . . .	43
4.6	Parametri di vegetazione di alta quota richiesti dal Modello $P - P$ nell'area PNGP. . . . .	44
4.7	Parametri richiesti dal Modello <i>CoSMo</i> a bassa quota nell'area PNGP. . . . .	51
4.8	Parametri richiesti dal Modello <i>CoSMo</i> ad alta quota nell'area PNGP. . . . .	51
5.1	Indici di distorsione statistica del LAI a bassa quota. . . . .	54
5.2	Indici di distorsione statistica del LAI ad alta quota. . . . .	55
5.3	Indici di distorsione statistica del LAI complessivo. . . . .	55
5.4	Confronto tra i valori di LAI osservati e simulati dal modello $P - P$ a bassa quota. . . . .	58
5.5	Confronto tra i valori di LAI osservati e simulati dal modello $P - P$ ad alta quota. . . . .	59
5.6	Confronto tra i valori di LAI osservati e simulati dal modello $P - P$ complessivi. . . . .	59

5.7	Confronto tra il valore di LAI osservato ad Orvieille (2300 m s.l.m.) nel 2019 e il LAI simulato dal modello $P - P$ nel 2019. . . . .	60
5.8	Indici di distorsione delle portate valutati nel periodo 2005-2019. . . . .	60
6.1	GCM considerati. . . . .	66
8.1	Elenco indicatori Agro-Climatici. . . . .	81
8.2	Numero di giorni di precipitazioni intense annue. . . . .	85
8.3	Altezza di pioggia cumulata durante la stagione di crescita. . . . .	85
8.4	Rapporto ET/P. . . . .	86
8.5	Produttività valutata l'ultimo giorno della stagione di crescita. . . . .	86
8.6	Rapporto ET/Y. . . . .	87
8.7	Rapporto ET/ETP. . . . .	87
8.8	Numero di giorni in cui la temperatura è maggiore del a)60% b)80% e c)80% di T cutoff. . . . .	88
8.9	Indici di Biodiversità secondo a) Shannon b)Simpson. . . . .	89
8.10	Indici Agrometeorologici di a) Winkler b)Huglin. . . . .	90
8.11	Condizioni iniziali di presenza relativa. . . . .	94
10.1	Variazioni di LAI espresse in percentuale % rispetto ai valori medi attuali nel decennio P1. . . . .	123
10.2	Variazioni di LAI espresse in percentuale % rispetto ai valori medi attuali nel decennio P2. . . . .	124
11.1	Variazione in percentuale % dell'indicatore <b>AC1</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	132
11.2	Variazione in percentuale % dell'indicatore <b>AC2</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	133
11.3	Variazione in percentuale % dell'indicatore <b>AC3</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	134
11.4	Variazione in percentuale % dell'indicatore <b>AC4</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	135
11.5	Variazione in percentuale % dell'indicatore <b>AC5</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	136
11.6	Variazione in percentuale % dell'indicatore <b>AC6</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	137

11.7	Variazione assoluta dell'indicatore <b>AC7a</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	138
11.8	Variazione assoluta dell'indicatore <b>AC7b</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	139
11.9	Variazione assoluta dell'indicatore <b>AC7c</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	140
11.10	Variazione in percentuale % dell'indicatore <b>AC8a</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	141
11.11	Variazione in percentuale % dell'indicatore <b>AC8a</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	142
11.12	Variazione in percentuale % dell'indicatore <b>AC9a</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	143
11.13	AC9b . . . . .	144
11.14	Variazione in percentuale % dell'indicatore <b>AC9b</b> medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM . . . . .	144





# Capitolo 1

## Introduzione

Gli effetti dei cambiamenti climatici globali sono già visibili nei sistemi idrici. Il crescente aumento delle temperature e l'alternanza tra lunghi periodi di siccità e piogge intense impattano notevolmente sul ciclo idrologico e su ciò da cui esso dipende [1]. I sistemi pascolivi montani non sono esenti dalle ripercussioni climatiche. Secondo un approccio dinamico multi specie, in questa tesi si valuteranno gli effetti dei potenziali cambiamenti climatici sui pascoli. L'area di studio è il Parco Nazionale Gran Paradiso, in particolar modo verranno trattate le aree pascolive situate nel versante valdostano di questa grande riserva naturale.

Le regioni alpine sono molto vulnerabili, in quanto soggette ad elevata pericolosità naturale e crescenti pressioni antropiche ed ambientali. [2]. Recenti studi hanno difatti dimostrato come, secondo le proiezioni climatiche future, le aree montante della Valle d'Aosta [3] e della Valtellina [4] sperimenteranno una riduzione dei contributi nivali e glaciali a causa della riduzione del volume dei ghiacciai, dovuto all'aumento di temperatura, causando così portate più intense in primavera e più deboli in estate rispetto alle attuali.

Inoltre, le variazioni del regime idrologico nei bacini, hanno un impatto sulle colture. Esistono diverse pubblicazioni scientifiche a riguardo, tra le quali, vi è lo studio della produttività del riso in Pianura Padana [5] e la produttività agricola nei monti dell'Himalaya [6], in risposta ai potenziali scenari di cambiamenti climatici. Il limite di tali studi però, è che sono riferiti ad un'unica specie di raccolto, il che è plausibile se si tratta di piantagioni monospecifiche, ma non veritiero nel caso di popolazioni vegetali variegata quali i pascoli naturali. Le praterie ricche di specie, a diversi stadi di maturità, cambiano continuamente stato. Ciò costituisce una difficoltà per la modellazione dei processi interazione tra le specie e i meccanismi vegetazione-atmosfera che si verificano nel suolo [7]. Da qui nasce l'esigenza di creare un modello tale da considerare i processi di fitocenosi nel loro insieme, occupandosi della competizione interspecie [8].

L'idea di base è che la presenza di una specie influenza la presenza di un'altra, per questo si studia l'adattabilità di una specie rispetto alle altre presenti.

Attraverso il modello colturale sviluppato dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA) del Politecnico di Milano in collaborazione col Dipartimento di Scienza dei Raccolti, Sezione Agronomia, dell'Università Statale di Milano, che è un modello semi-distribuito, di risoluzione  $100m \times 100m$ , si è valutato il contributo delle aree di pascolo nella traspirazione, che governa il regime idrologico. La traspirazione offerta dalle aree verdi pascolive, è sì un importante contributo nel bilancio idrologico, ma serve anche per la valutazione delle dinamiche pascolive, rappresentate da Biomassa, LAI ed altri indicatori Agro-Climatici (ACi). Gli indicatori agro-climatici sono risultati del modello colturale o combinazione tra risultati, utili per interpretare le dinamiche dei pascoli.

Considerando quattro scenari SSP, *Shared Socio-Economic Pathways*, ognuno dei quali viene elaborato da tre modelli climatici GCM, *General Circulation Model*, si simulano le proiezioni climatiche future e si valutano gli effetti sugli indicatori agro-climatici.

Le mere proiezioni climatiche future non forniscono una metrica di facile interpretazione. Così, le nuove precipitazioni e temperature simulate negli scenari futuri, costituiscono i nuovi input del modello idrologico. Dai risultati del modello, si ricavano output che costituiscono una misura più diretta dell'effetto climatico, come la variazione di biomassa, di produttività, di evapotraspirazione specifica, di impronta idrica ed altri ancora. È quindi importante, per analizzare l'impatto sui pascoli, valutare gli indicatori agro-climatici rispetto al presente e confrontarli con le proiezioni future. L'elaborato ha come obiettivo la valutazione degli impatti climatici sui sistemi pascolivi del Gran Paradiso. Nello specifico, si analizzano:

- la variazione dei deflussi nei bacini e dei loro regimi;
- le proiezioni di biomassa e produttività future;
- le proiezioni degli indicatori agro-climatici.

Nel capitolo 1 si introduce il problema dei cambiamenti climatici sulle aree montane, in particolar modo su quelle adibite al pascolo.

Nel capitolo 2 si descrive il caso di studio, riportando l'inquadramento geografico, climatico e idrologico. Si descrivono le aree ed i bacini interessati dalla modellazione di questo studio.

Nel capitolo 3 si elencano i dati utilizzati nella modellazione idrologica e colturale. Si tratta di dati meteorologici, topografici, di uso del suolo e osservazioni satellitari.

Nel capitolo 4 si spiegano i metodi e modelli impiegati ed i loro parametri.

Il capitolo 5 è dedicato alla calibrazione e validazione dei modelli introdotti nel capitolo precedente.

Il capitolo 6 è riferito ai modelli di circolazione globale applicati agli scenari socio-economici. Vengono così create delle proiezioni climatiche globali fino al 2100, le quali verranno calibrate attraverso la procedura di *downscaling*, nel capitolo 7.

Nel capitolo 8 si introducono gli indicatori agro-climatici e vengono valutati rispetto al presente, mediando i risultati ottenuti nel periodo di osservazione 2005-2019. Per completezza vengono anche riportate le mappe di produttività e di presenza relativa delle specie di vegetazione.

Nel capitolo 9 si riportano le proiezioni future di temperatura e precipitazione, nei decenni 2041-2050 e 2091-2100.

Nei capitolo 10 e 11 si riportano i risultati degli effetti delle proiezioni climatiche su biomassa, produttività, LAI e indicatori agro-climatici, nei decenni 2041-2050 e 2091-2100.

## 1.1 Pascoli e Cambiamenti climatici

È atteso che i cambiamenti climatici influenzino negativamente le risorse naturali come i pascoli che, soprattutto nelle regioni alpine, sono riconosciuti come ecosistemi molto sensibili e vulnerabili al cambiamento climatico. In questa prospettiva, una questione cruciale è la conservazione dei pascoli di montagna per la loro produttività e biodiversità e per la loro capacità di proteggere i suoli dall'erosione, mantenere paesaggi e spazi aperti utili per le attività turistiche [9]. Nel contesto alpino, esiste un gran numero di programmi, esperienze, protocolli e metodologie riguardanti il monitoraggio e gli indicatori biologici dei cambiamenti climatici. È necessario armonizzarli e sviluppare partenariati operativi concentrando le ricerche a livello regionale e locale con specifici scopi di attuazione [10].

Il Parco Nazionale del Gran Paradiso ospita aree adibite ai pascoli. Essendo uno degli ecosistemi più sensibili ai cambiamenti climatici e a disturbi antropici, i pascoli alpini sono stati identificati come hot spot per quanto riguarda i cambiamenti del clima e dell'uso del suolo. È perciò di fondamentale importanza analizzare gli effetti degli impatti climatici sui sistemi pascolivi montani.

Il laboratorio interdisciplinare *Climate – LAB*, del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale del Politecnico di Milano, prende parte al progetto IPCC\_MOUA (Interdisciplinary Project for assessing current and expected Climate Change impacts on MOUtain PASTures). Questo progetto, in coo-

perazione con la Statale di Milano (Dip. SPE) è finalizzato alla valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici sui sistemi pascolivi in aree montane. Utilizzando opportuni modelli di stima della biomassa pascoliva, e proiezioni di IPCC atte a valutare le variazioni del clima, si definisce il potenziale di produzione pascoliva in alcune aree significative, ovvero il Parco Nazionale Gran Paradiso in Valle d'Aosta, la Valtellina e le zone montane della Sardegna.

Il mio elaborato di tesi, parte infatti da questo progetto e si occuperà del Parco Nazionale Gran Paradiso.

Secondo lo studio eseguito in Valtellina, le proiezioni climatiche future, simulate da modelli GCM e scenari RCP e SSP del quinto e sesto AR dell'IPCC, segnano una decrescita di biomassa nei pascoli a quota inferiore ai 1100 metri ed un aumento dal +50% al +140% della biomassa ad alta quota, causano un allungamento temporale della stagione di crescita dei pascoli ed una maggior richiesta idrica. I risultati convergono nell'affermare che lo sviluppo del bestiame avverrà nelle zone a quota maggiore, dove è prevista ancora grande produttività [11].

# Capitolo 2

## Caso di Studio

IPCC\_MOUPA, Interdisciplinary Project for assessing current and expected Climate Change impacts on MOuntain PASTures, è un progetto finanziato da Fondazione Cariplo nel bando AGER 2017.

Questo studio, in cooperazione con la Statale di Milano (Dip. SPE) è finalizzato alla valutazione dell’impatto dei cambiamenti climatici sui sistemi pascolivi in aree montane. Utilizzando opportuni modelli di stima della biomassa pascoliva, e proiezioni di IPCC atte a valutare le variazioni del clima, verrà definito il potenziale di produzione pascoliva in alcune aree significative, quali:

- Valle d’Aosta, Parco Nazionale Gran Paradiso
- Valtellina, Sondrio
- zone montane della Sardegna

Nel mio lavoro di tesi sarà analizzata l’area del Parco Nazionale Gran Paradiso (AO).

### 2.1 Il Parco Nazionale Gran Paradiso

Il Parco Nazionale Gran Paradiso è stato istituito nel 1922. Ha un’estensione complessiva di circa 71 000 ettari, di cui 37 000 in Valle d’Aosta e 34 000 in Piemonte. La perimetrazione è coincidente col SIC-ZPS IT1201000 “Gran Paradiso”, Sito della Rete Natura 2000. Il territorio dell’area protetta è diviso in due parti distinte dalla catena montuosa compresa tra la Punta Nera e la Punta Tsanteleina che si sviluppa all’incirca lungo i confini regionali tra Piemonte e Valle d’Aosta. Le due parti si differenziano dal punto di vista ambientale e climatologico. Il Parco ricopre, almeno in parte, la superficie di



Figura 2.1: Inquadramento geografico dell'area analizzata (versante Valdostano) del Parco Nazionale del Gran Paradiso.

tredici comuni, di cui sette valdostani e sei piemontesi. Il territorio montuoso del Parco è caratterizzato da un'orografia complessa e si estende dagli 800 ai 4000 m circa. La mia analisi riguarderà solo il versante valdostano, in particolar modo la parte di Parco appartenente ai comuni di Cogne, Valsavarenche e Aymavilles.

### 2.1.1 La Valsavarenche

Valsavarenche è una località delle Alpi Graie valdostane particolarmente nota per le sue emozionanti vedute del Gran Paradiso, a causa del suo collocamento altimetrico, posto a circa 1 540 metri s.l.m. E' la più stretta e selvaggia delle valli valdostane, la sua notorietà deriva dall'essere stata nel tempo teatro di ascensioni e grandi traversate attorno al gruppo del Massiccio del Gran Paradiso. Il comune valdostano è attraversato dal torrente Savara, dal quale ne deriva il nome. Il torrente Savara, è affluente di destra della Dora Baltea. Nasce ai piedi del massiccio del Gran Paradiso, si forma a partire dai laghi del Nivolet, Noir e Trebecchi. Lungo il percorso, di circa 27 km, lungo la Valsavarenche, ha come affluenti principali il torrente Côte Savolère ed il torrente Lévionaz. All'altezza di Introd riceve il contributo della Dora di Rhêmes, e poco più a valle, a Villeneuve, confluisce nella Dora Baltea.

Il territorio comunale raggiunge la massima altezza con la vetta del Gran Paradiso al confine con il territorio del comune di Cogne.

Valsavarenche si trova in zona climatica F<sup>1</sup>, con 4.544 gradi giorno. Il clima è temperato-freddo, caratterizzato da inverni lunghi e rigidi, in cui la temperatura minima può scendere anche sotto i -15 °C, ed estati fresche.

### 2.1.2 La Val di Cogne

La Val di Cogne è una valle alpina laterale della Valle d'Aosta, che prende il nome dal comune di Cogne, centro abitato più importante. Gran parte della valle ricade all'interno del Parco Nazionale del Gran Paradiso.

La valle di Cogne è una valle a U successivamente scavata dall'impeto dei torrenti le cui alte pareti rocciose sono state erose a più riprese durante le glaciazioni. Poco prima di raggiungere il centro abitato, la valle si apre e si dirama in più valli laterali, come Valtoney, Vallone di Grauson, Vallone dell'Urtier, Valeille e Vallone d'Arpisson. Il paesaggio è quello tipico dell'alta montagna: boschi di pini, abeti e larici alle quote più alte coprono i versanti delle montagne fino ai 2200 metri; salendo si incontrano steppe erbose, poi pietraie e roccia nuda e infine ghiacciai. Tutti i torrenti provenienti da queste

---

<sup>1</sup>d.P.R. 26 Agosto 1993, n. 412, allegato A

Comuni	ha	%
Aymavilles	2.421	7
Cogne	13.796	37
Introd	787	2
Rhêmes Notre-Dame	4.293	12
Rhêmes Saint-Georges	1.792	5
Valsavarenche	13.874	37
Villeneuve	63	0
<b>Valle d'Aosta</b>	<b>37.027</b>	
<b>Piemonte</b>	<b>34.017</b>	
<b>Estensione PNGP</b>	<b>71.044</b>	

Tabella 2.1: Comuni del Parco Nazionale del Gran Paradiso.

**LOCALIZZAZIONE ed ESTENSIONE DEL PNGP**Longitudine:  $E 7^{\circ} 15' 55''$ Latitudine:  $N 45^{\circ} 35'$ Superficie:  $71\ 044\ ha$ Altitudine minima:  $800\ m$ Altitudine massima:  $4\ 061\ m$ 

Tabella 2.2: Coordinate del centroide e dimensioni del Parco Nazionale del Gran Paradiso.

valli, alimentati perlopiù dalla fusione delle nevi e dai laghi in quota, confluiscono nella Grand Eyvia, la quale si riversa nella Dora Baltea poco a monte dell'abitato di Aymavilles.

Caratteristici di questa zona sono i pascoli del Gran Nomenon. L'impressionante parete nord della montagna Grivola, precipita con il suo ghiacciaio fin sulla verde distesa di pascoli dell'alpeggio del gran Nomenon. Il contrasto dei colori, gli alpeggi, i boschi e la possibilità di osservare gli animali al pascolo fanno della zona una delle perle del Parco.

## Monitoraggio e gestione del sistema naturale

I rilievi alpini accolgono ecosistemi altamente specializzati, ricchi di biodiversità, di specie endemiche e a rischio estinzione. Sono aree che garantiscono servizi ecosistemici importanti per le zone appartenenti al Parco, circostanti e bacini imbriferi sottesi, come aria e acqua pulita, materie prime, stabilità dei versanti, regolazione stagionale del ciclo idrologico, turismo e servizi culturali. Sono però sensibili ai cambiamenti climatici e ambientali, che possono indur-



re importanti modificazioni nella composizione qualitativa e quantitativa della biodiversità, sino ad indurre all'estinzione di specie. Il riscaldamento sulle Alpi induce le migrazioni verso le fasce a più alta quota. Tuttavia, lungo il gradiente di altitudini, le specie migranti possono incontrare habitat non adatti per le loro esigenze ecologiche, specie più competitive che le sopraffanno, condizioni climatiche più aggressive da stressarli. Per queste ragioni, negli ultimi anni sono stati ordinati da parte del MATM<sup>2</sup> operazioni di controllo e di intervento per mitigare i rischi e proteggere la biodiversità. E' da rilevare il contributo fondamentale della sorveglianza che prosegue il monitoraggio delle specie animali e vegetali attraverso la raccolta dei dati con l'utilizzo di computer palmari con georeferenziazione.

## Flora e vegetazione

Il Parco del Gran Paradiso presenta una notevole varietà litologica e climatologica. Le differenze sono apprezzabili fra il versante piemontese e quello valdostano. Considerando le tipologie di uso del suolo <sup>3</sup>, complessivamente il 62% del territorio del Parco è occupato da ambienti non o scarsamente vegetati (ghiacciai, rupi e detriti), il 20.2% da boschi e arbusteti, il 16.6% da praterie naturali, solo l'1% da prati irrigui e coltivi e lo 0.2% da aree urbanizzate. I boschi sono l'habitat di un gran numero di specie animali, e costituiscono un sistema naturale di difesa dal dissesto idrogeologico (frane, valanghe, esondazioni). Nei boschi dei fondovalle gli alberi più frequenti sono larici e abeti rossi, più limitati i boschi di latifoglie. Risalendo i versanti, gli alberi lasciano spazio a vasti pascoli alpini ricchi di fiori. Salendo ancora le rocce caratterizzano il paesaggio dove, in difficili condizioni ma con grande capacità di adattamento, sopravvivono le piante alpine. Le praterie, si distinguono in:

- praterie steppiche, a quote relativamente basse, utilizzate dall'uomo solo di rado per il pascolo ovino;
- prato-pascoli, di erba densa e continua appartenente a specie vegetali molto varie;
- pascoli alpini o d'alta quota, assai diffusi nel Parco, occupano tutte le aree sopra il limite dei boschi. Qui il terreno è ricoperto da vegetazione erbacea, rocce affioranti e sono presenti fiori di grandi dimensioni che attirano i rari insetti impollinatori;

---

<sup>2</sup>Direttiva del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare per la conservazione della biodiversità n.0052238 del 28.12.2012,

<sup>3</sup>Corine Land Cover

- vallette nivali, avvallamenti del suolo in cui la neve permane per buona parte dell'anno, lasciando il terreno scoperto solo per uno o tre mesi al massimo. Le piante che vi crescono svolgono il loro ciclo in tempo piuttosto breve.

Negli ultimi tempi in alcuni pascoli di quota, ma anche in aree prative all'interno dei boschi (piani subalpino ed alpino), a causa della variazione di alcune pratiche agro-pastorali quali l'abbandono dell'attività di pascolo in certe aree, l'aumento del carico di bestiame in altre più vicine alle stalle d'alpeggio e la presenza sempre più consistente di capi ovini e caprini, si sta osservando una variazione della composizione floristica. A ciò bisogna aggiungere, per effetto dei cambiamenti climatici, anche la progressiva risalita di alcune specie e, nei piani inferiori (montano e subalpino), l'ingresso di specie alloctone invasive.

## Fenologia dei pascoli

Per misurare l'effetto dei cambiamenti climatici sulla vegetazione è la fenologia delle specie erbacee dei pascoli di quota [12]. Negli ultimi anni sono incrementati i dispositivi di monitoraggio della fenologia vegetativa e riproduttiva, al fine di registrare le osservazioni, elaborarle e studiare il comportamento del sistema alpino rispetto alle variazioni climatiche.

In generale, l'attività pascoliva ha effetti positivi sulla sostenibilità ambientale, manutenzione del territorio e del valore culturale, supporta la biodiversità e la fertilità del suolo, quindi riduce perdita di suolo e rischio ambientale. Al contrario, la trascuranza dei territori porta alla crescita di piante infestanti, alla perdita di biodiversità tra le specie vegetali, all'aumento del rischio di erosione, incendio e valanghe, perdita di attività produttive e paesaggi [13],

Essendo uno degli ecosistemi più sensibili ai cambiamenti climatici e a disturbi antropici, i pascoli alpini sono stati identificati come hot spot per quanto riguarda i cambiamenti del clima e dell'uso del suolo [14].

## 2.2 Inquadramento climatico e idrologico

Il clima della Valle d'Aosta è fortemente condizionato dalla topografia. Le alte montagne che la circondano impediscono l'accesso da parte delle masse d'aria umide di origine mediterranea o atlantica, determinando nella zona centrale un clima caratterizzato da un elevato grado di aridità, con precipitazioni anche inferiori ai 500 mm/anno; le zone di confine, in particolare quelle sud-orientali e le testate delle vallate nord-occidentali presentano, invece, precipitazioni medie superiori ai 1400 mm/anno.

Il regime pluviometrico dell'area di interesse è il sublitoraneo alpino. Tale regime è caratterizzato da un ietogramma con due picchi l'anno. Le precipitazioni più intense si verificano durante la stagione autunnale e quella primaverile.

Le precipitazioni medie in questa area sono in linea con le piogge medie in Italia, al più leggermente sopra la media.

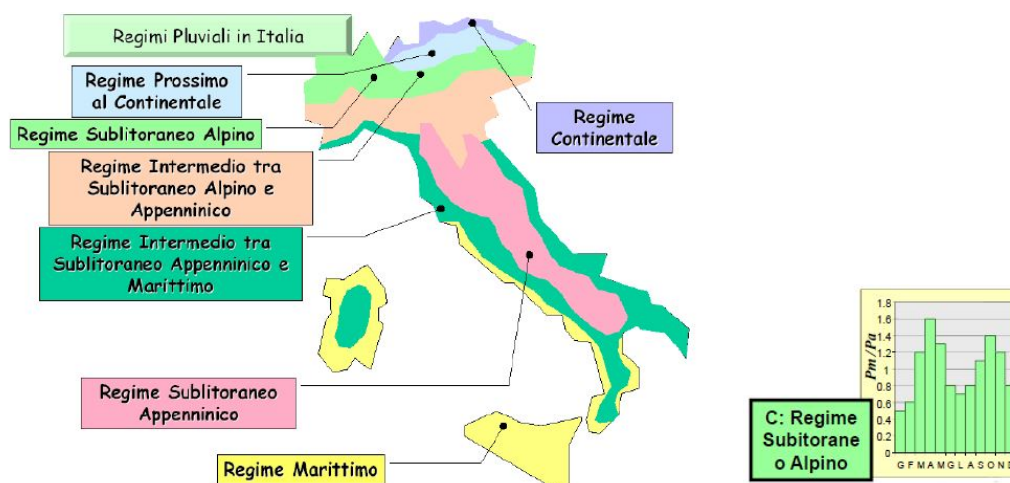


Figura 2.2: Regimi Pluviometrici in Italia e Ietogramma mensile medio di regime sublitorale alpino.

Durante il periodo invernale, in ragione della temperatura e delle quote mediamente elevate, le precipitazioni sono prevalentemente di carattere nevoso. La stagione estiva è invece caratterizzata da precipitazioni di tipo convettivo, con frequente sviluppo di temporali o rovesci; la stagione primaverile e quella autunnale sono caratterizzate da precipitazioni stratiformi, che possono generare eventi pluviometrici anche di più giorni, con conseguente aumento del pericolo di alluvioni.

In accordo col sistema Kopper-Geiger, il PNGP rientra tra i gruppi C e D, ovvero tra i climi temperati a medie latitudini e i climi nivali, rispettivamente. Il sottogruppo in questione è 'wa', quindi il clima è caratterizzato da una stagione secca nel trimestre freddo, con temperatura media nel mese più caldo superiore a 22°.

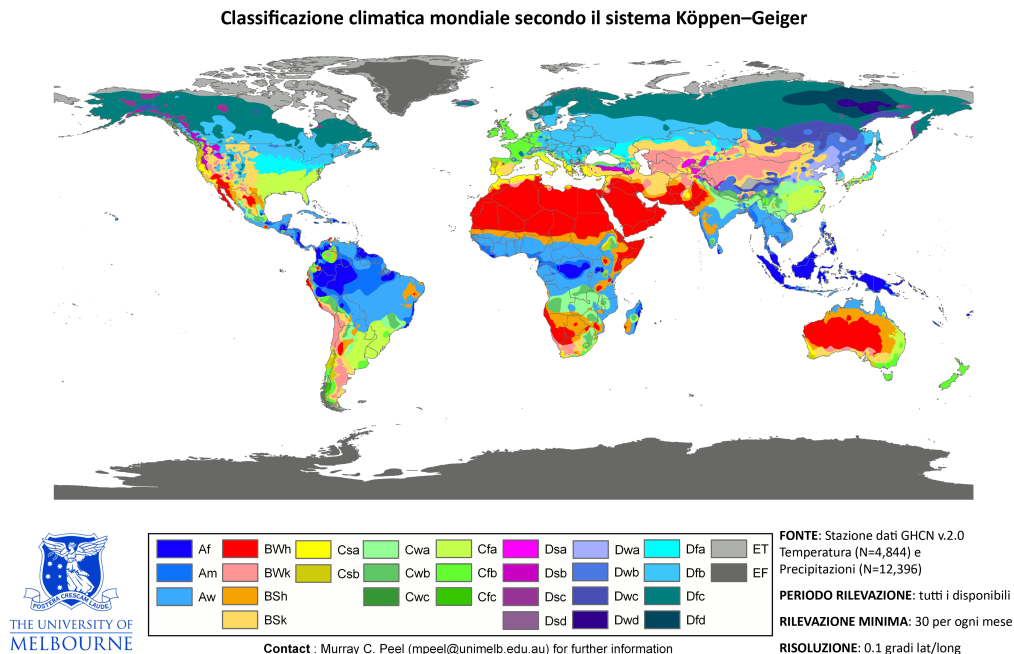


Figura 2.3: Classificazione climatica mondiale secondo il sistema Köppen-Geiger.

## 2.3 Bacini interessati

Il versante Valdostano del Parco Nazionale Gran Paradiso appartiene al bacino della Dora Baltea, così chiamato perché interamente attraversato dall'omonimo fiume (Figura 2.5). La Dora Baltea, lunga circa 170 km, nasce in Valle d'Aosta dalla confluenza, presso Entrèves, della Dora di Ferret e dalla Dora di Vèny. Alimentato da diversi affluenti lungo il suo corso, dalla Dora di Valgrisenche al Buthier, attraversa le aree vallive della Val d'Aosta per circa 170 km fino a raggiungere il comune Piemontese di Crescentino e confluire nel fiume Po. La Dora Baltea è l'unico fiume italiano dal regime nivo-glaciale: infatti la notevole altezza delle montagne presenti nel suo alto corso consente al fiume di mantenere una portata molto elevata soprattutto durante l'estate, grazie alle abbondanti acque di fusione dei ghiacciai del Monte Bianco e di gran parte di quelli situati in testa ai suoi affluenti. Si caratterizza dagli altri fiumi italiani per la sua tonalità molto chiara, l'elevata velocità di scorrimento e le sue gelide temperature. Benché abbia un corso relativamente lungo, l'alveo della Dora Baltea non raggiunge mai larghezze importanti poiché i suoi affluenti sono in genere di scarsa rilevanza idrografica rispetto all'asta fluviale principale.

In particolare, si distinguono tre sottobacini interessanti l'area di studio,

distinguibili in Figura 2.4:

- il bacino delimitato dalla presa sul Nomenon;
- il bacino delimitato dalla presa sul Grand Eyvia;
- il bacino delimitato dalla presa sul Savara.

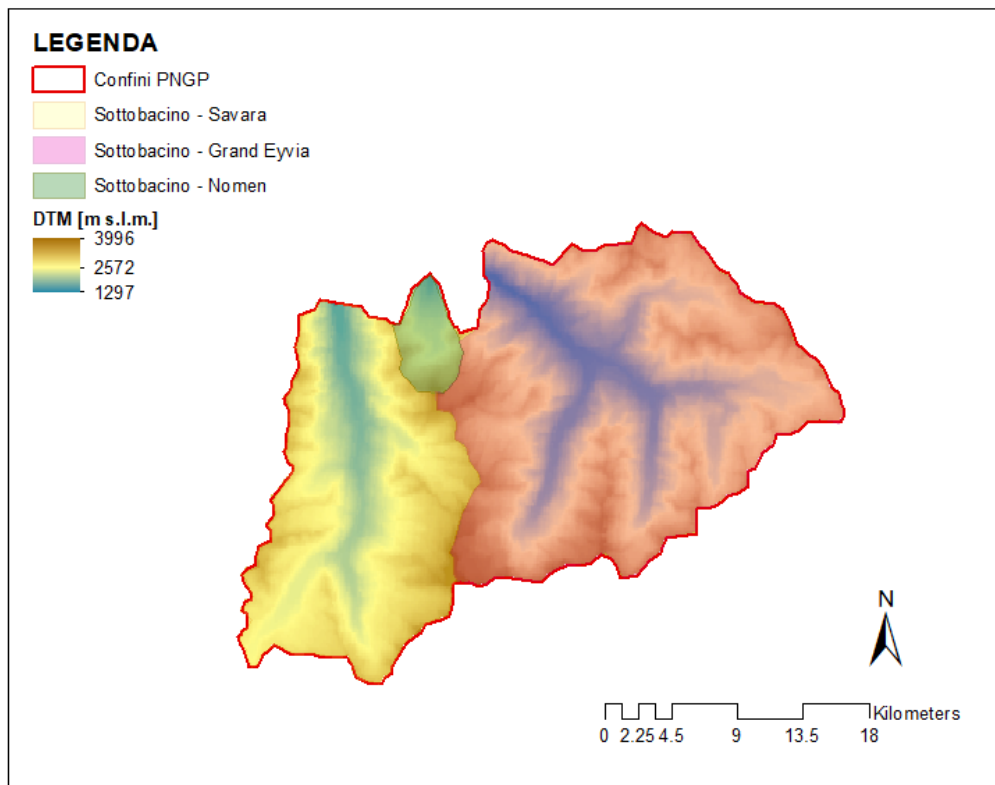


Figura 2.4: Suddivisione dell'area del PNGP nei tre sottobacini.



Figura 2.5: Percorso del fiume Dora rispetto al PNGP.

# Capitolo 3

## Dati utilizzati

In questo capitolo verranno introdotti i dati utilizzati e le loro fonti. Le informazioni meteorologiche sono disponibili dal Centro Funzionale della Valle d'Aosta e dall'ARPA, mentre dati topografici ed uso del suolo sono riportati sul geoportale della Valle d'Aosta. In aggiunta, è stato consultato il portale ufficiale del Parco Nazionale Gran Paradiso [15] per informazioni generiche riguardo l'area in analisi. Altri dati utilizzati riguardano le osservazioni dell'indice di area fogliare, reso disponibile da immagini satellitari.



### 3.1 Dati meteorologici

Il modello *Poli – Hydro* è controllato dai dati meteorologici, quindi da:

- temperatura media giornaliera;
- precipitazioni totali (solide e liquide);
- radiazione.

Il modello elabora tali input e restituisce gli output di:

- contenuto d'acqua nel suolo;

- evapotraspirazione;
- fusione nivale e glaciale;
- deflussi superficiali, sotterranei e totali.

Tutti i parametri sono valutati con un passo temporale di 24 ore.

I dati meteorologici sono reperibili dal Centro Funzionale e dal sito ARPA della regione autonoma della Valle d'Aosta. I dati recuperati risalgono ad un periodo di osservazione di 15 anni, dal 1 Gennaio 2005 al 31 Dicembre 2019.

Poiché il modello utilizzato è spazialmente semi-distribuito, è necessario conoscere il valore dei parametri meteorologici, quali temperature, precipitazioni e radiazioni, in ogni cella della griglia. I dati in ogni punto del sistema vengono stimati usando il metodo dei poligoni di Thiessen. Il valore dei parametri meteorologici in un dato punto non campionato è stimato in funzione delle distanze medie tra i punti campionati e il punto in analisi. Tracciando una linea retta passante per i punti equidistanti fra i più insediamenti si delinea una serie di poligoni. Ciascuno di essi avrà un numero di lati pari al numero dei punti che circondano un determinato sito. Per semplicità di calcolo, non è necessario considerare tutti i siti campionati, ma solo quelli che rientrano entro un raggio di influenza prestabilito attorno al sito da stimare 3.1.

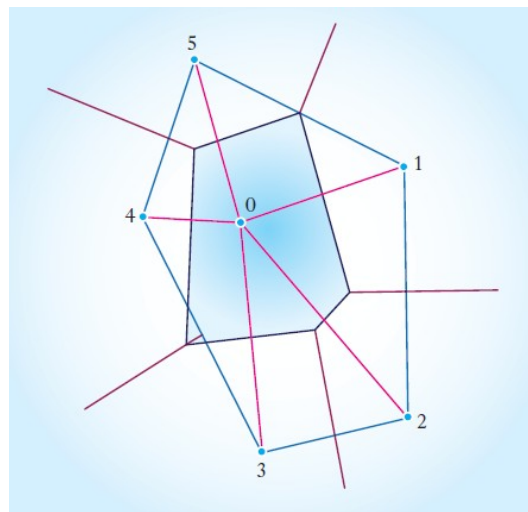


Figura 3.1: Rappresetazione grafica del metodo dei poligoni di Thiessen.

I dati di temperatura sono stati ottenuti tramite termometri, situati in 16 località distribuite bacino di interesse, i quali registrano giornalmente, talvolta a passo orario, le temperature minime, massime e medie nell'apposita località.



I dati di precipitazione totale, solida e/o liquida, sono ricavabili tramite reti pluviometriche o pluviografiche. Tra gli strumenti, si trovano pluviometri, classici o riscaldati, e nivometri. Se nella stazione di rilevamento è presente un nivometro riscaldato, esso segna direttamente l'altezza di precipitazione durante l'evento piovoso o nevoso. Nel caso in cui non è possibile avere una misura diretta della precipitazione totale, ma sono presenti strumenti come nivometri o pluviometri, l'altezza di precipitazione viene ricavata applicando il principio di conservazione della massa.

$$SWE = \frac{\rho_{snow}}{\rho_{H_2O}} \cdot h_{snow} [mm] \quad (3.1)$$

Dove  $h_{snow}$  è l'altezza della neve misurata,  $\rho_{H_2O}$  è la densità dell'acqua, pari a  $1000kg/m^3$  e  $\rho_{snow}$  è la densità della neve. Quest'ultima varia a seconda della compattazione della neve, dell'altitudine, del periodo dell'anno e da altre condizioni. I valori di densità della neve variano da  $30kg/m^3$  a  $917kg/m^3$  in caso di ghiaccio puro. Per questa applicazione, si considera solo neve fresca, quindi  $\rho_{H_2O} = 100kg/m^3$ .

Il modello idrologico prevede anche i dati di radiazione. Questi ultimi sono misurati solamente in un'unica stazione appartenente al bacino di interesse, e non sono sempre disponibili nei tempi osservati. L'indisponibilità di tali osservazioni, tuttavia, non compromette l'efficacia del modello, in quanto la radiazione solare teorica può essere ricavata tramite operazioni di calcolo. La radiazione osservata, laddove disponibile, è preferibile alla teorica, in quanto considera le presenti condizioni di copertura nuvolosa, mentre la radiazione teorica si ottiene in condizioni di cielo sereno.

L'elenco delle stazioni di rilevamento di precipitazione, temperatura e radiazione è riportato in tabella 3.1, specificando in ognuna di esse quali sono i tipi di dati reperibili.

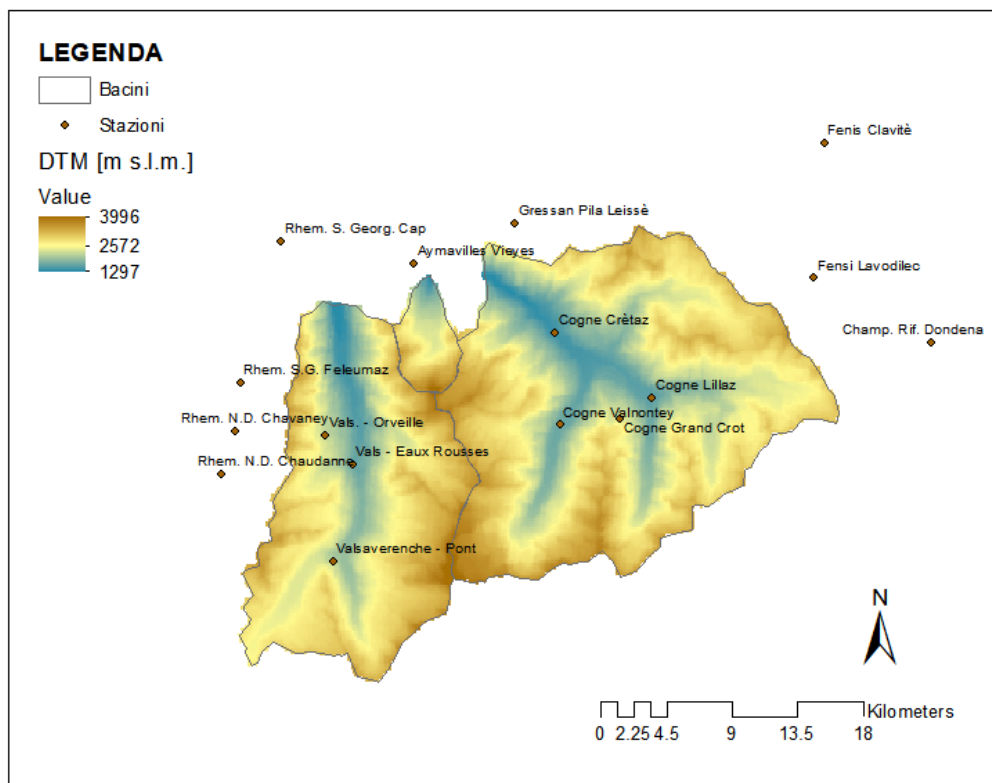


Figura 3.2: Stazioni idro-meteorologiche nell'area PNGP.

Stazione	Lat[deg]	Long [deg]	Quota [m slm]	Dati
Valsaverenche-Pont	45.5268	7.20093	1951	P,T,R
Valsaverenche-Eaux-Rousses	45.5668	7.20835	1651	P,T
Valsaverenche-Orvieille	45.5799	7.1919	2170	P,T
Cogne-Lillaz	45.5951	7.39184	1613	P,T
Cogne-Grand-Crot	45.5880	7.36744	2279	P,T
Cogne-Valnontey	45.5855	7.33708	1682	P,T
Cogne-Crétaz	45.6145	7.34048	1470	T
Gressan-Pila-Leissé	45.6643	7.30885	2280	P,T
Fenis-Clavalité	45.686	7.50058	1531	T
Fenis-Lavodilec	45.6448	7.48514	2250	P,T
Champorcher-Rifugio-Dondena	45.6123	7.55184	2181	P,T
Ayamvilles-Vieyes	45.6497	7.2508	1139	T
Rhemes-Notre-Dame-Chaudanne	45.5604	7.11374	1794	P,T
Rhemes-Notre-Dame-Chavaney	45.5788	7.12338	1690	P,T
Rhemes-Saint-Georges-Feleumaz	45.6007	7.12249	2325	P,T
Rhemes-Saint-Georges-Capoluogo	45.6497	7.15259	1179	P,T

Tabella 3.1: Stazioni di rilevamento di T: temperatura, P: precipitazioni e R: radiazioni. Sistema di Coordinate di Riferimento: WGS 1984.

## 3.2 Dati topografici

Il DTM, *Digital Terrain Model*, è una griglia dove ogni cella è associata ad un'elevazione rispetto al livello medio del mare. Tale modello rappresenta quindi le altitudini nell'area di interesse ed è utile per il tracciamento del reticolo idrografico, in corrispondenza dei minimi locali. Il geoportale della regione Valle d'Aosta fornisce il DTM aggiornato al periodo 2005-2008, a partire dai dati ricavati da voli LIDAR durante due campagne di rilevamento:

- copertura regionale Valle Dora e affluenti - edizione 2005 - volo laser scanner 2005 e 2006;
- copertura interno territorio regionale ad esclusione della Valle Dora e affluenti - edizione 2008 - volo laser scanner 2008.

## 3.3 Dati di Portata

Per quanto riguarda i dati di portata, essi sono resi disponibili sempre dal sito del Centro Funzionale della Regione Autonoma della Valle d'Aosta. I valori considerati ricoprono l'intervallo temporale 2005-2019 e provengono dalle

stazioni di Valsaverenche - Eaux Rousses e Cogne - Crêtaz, collocate a quota 1651 e 1470 metri s.l.m., rispettivamente.

### 3.4 Uso del suolo

La mappa d'uso del suolo è disponibile:

- a scala europea dal progetto CLC (Corine Land Cover),
- a scala regionale dal Piano Territoriale Paesistico PTP della Valle d'Aosta.

Il progetto CLC è nato per determinare e monitorare le caratteristiche di copertura e uso del territorio, ponendo attenzione alle esigenze di tutela ambientale. Il Piano Territoriale Paesistico è uno strumento di governo del territorio regionale, che si aggiunge a quelli di cui già l'amministrazione pubblica dispone, per indirizzarne e coordinarne le azioni. Costituisce inoltre lo strumento base per impostare una revisione generale delle aree tutelate dalle leggi n. 1497 del 1939 e n. 431 del 1985 e per una revisione delle procedure autorizzative. Tale piano fu redatto nel 1998, per poi essere aggiornato e integrato negli anni successivi. Tra i contenuti, disponibili come mappe in formato shapefile, del Piano si trovano:

- assetto generale;
- disciplina d'uso e valorizzazione;
- linee programmatiche;
- vincoli paesaggistici ex legge n.1497 del 1939 ed ex legge n. 431 del 1985 fasce fluviali del Piano Stralcio Fasce Fluviali (PSFF) dell'Autorità di Bacino competente;
- Siti, beni e aree di specifico interesse e di beni culturali isolati;
- pericolosità geologica e idraulica.

Il PTP è stato impiegato per collocare spazialmente le aree adibite al pascolo e i ghiacciai della Valle d'Aosta, in particolar modo nel Parco Nazionale Gran Paradiso. Per ricostruire la mappa d'uso del suolo, riportata in figura 3.3 è stato usato il progetto Corine, integrato con le informazioni del PTP. A partire dalla mappa e dalle destinazioni d'uso del suolo è possibile derivare i valori del Curve Number (CN), indicatore della capacità di detenere acqua.

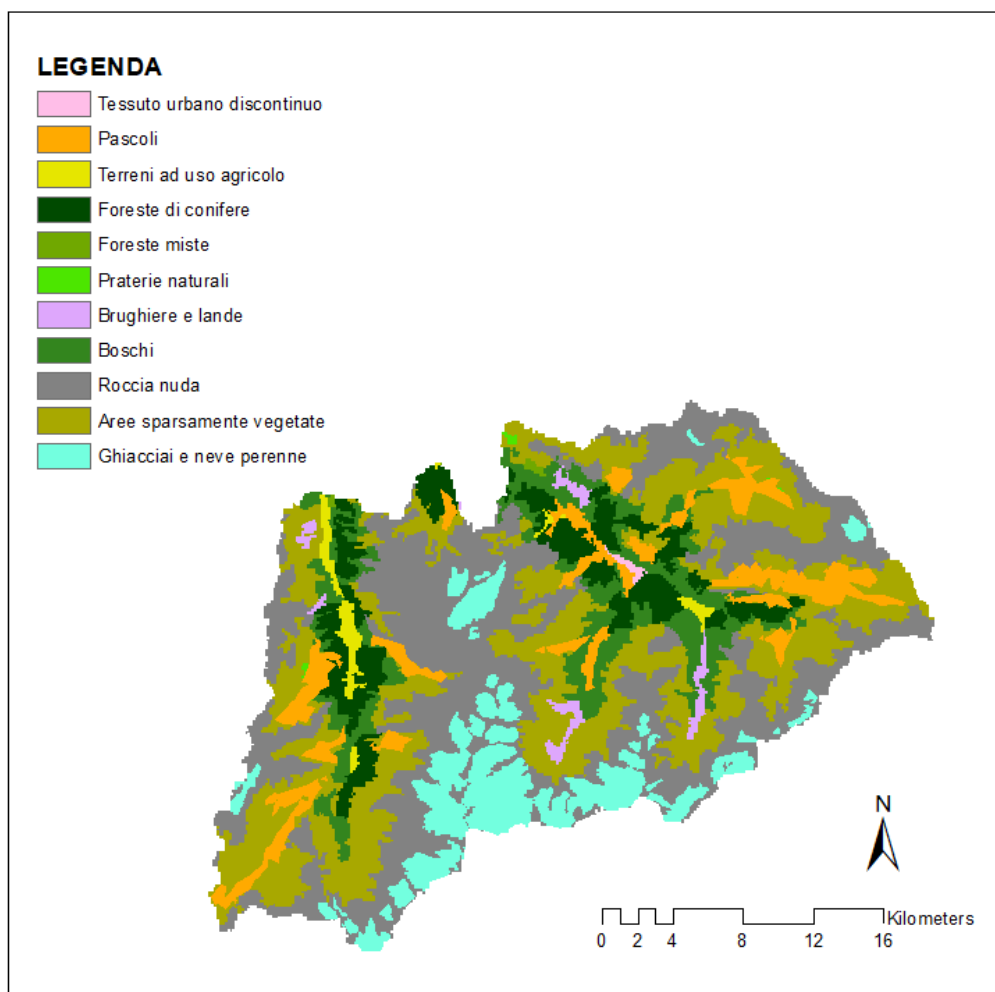


Figura 3.3: Mappa d'uso del suolo (CLC e PTP Valle d'Aosta).

### 3.4.1 Pascoli

I pascoli situati a bassa quota (altitudine fino a 1800 m s.l.m.) occupano  $805,876 m^2$ , mentre quelli ad alta quota (altitudine maggiore di 1800 m s.l.m.) hanno un'estensione di  $14,321,262 m^2$ . Complessivamente i pascoli occupano circa  $15 km^2$ .

Tenendo conto che l'area da me considerata si estende per  $363 km^2$ , le aree pascolive costituiscono un'impronta del 5% sul totale del bacino di interesse. I pascoli sono collocati per lo più nei pressi di fiumi e laghi presenti nella zona. La partizione tra pascoli ad alta quota e bassa quota è sbilanciata verso la prima categoria. In ogni caso, i pascoli sono collocati per lo più nei pressi di fiumi e laghi e non superano la quota di 2800 m s.l.m.

Area [ $km^2$ ]	Pascoli A.Q. [ $km^2$ ]	Pascoli B.Q. [ $km^2$ ]	Copertura Pascoli [%]
363.72	14.32	0.81	5

Tabella 3.2: Aree e copertura pascoli nell'area PNGP.

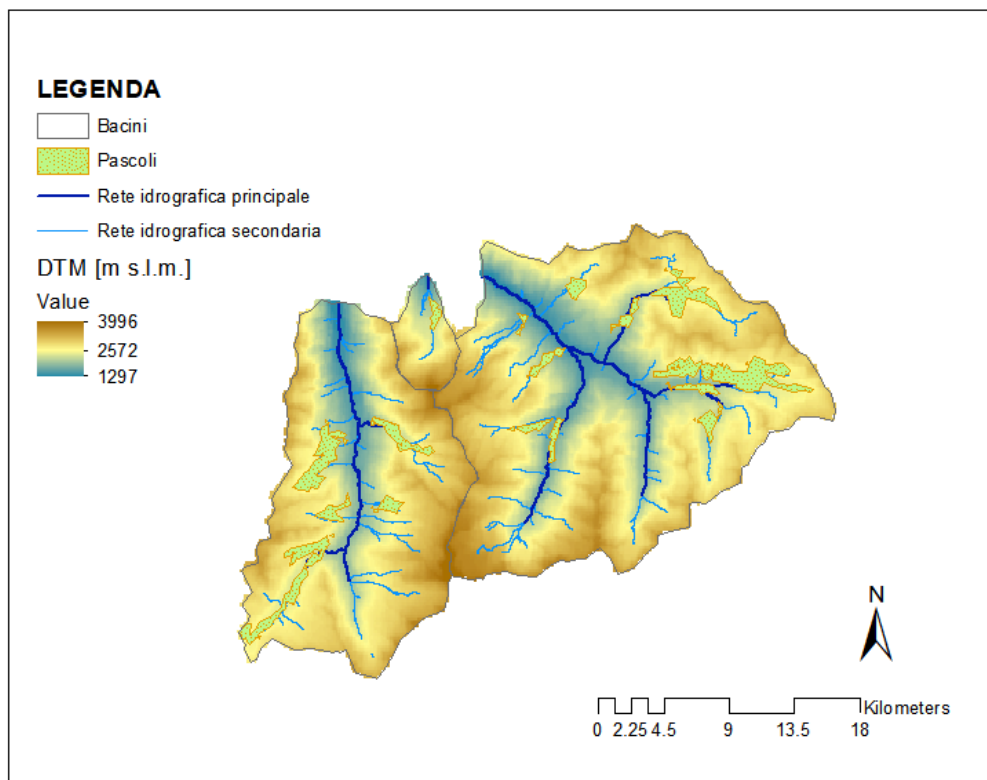


Figura 3.4: Estensione dei Pascoli secondo il PTP nel PNGP.

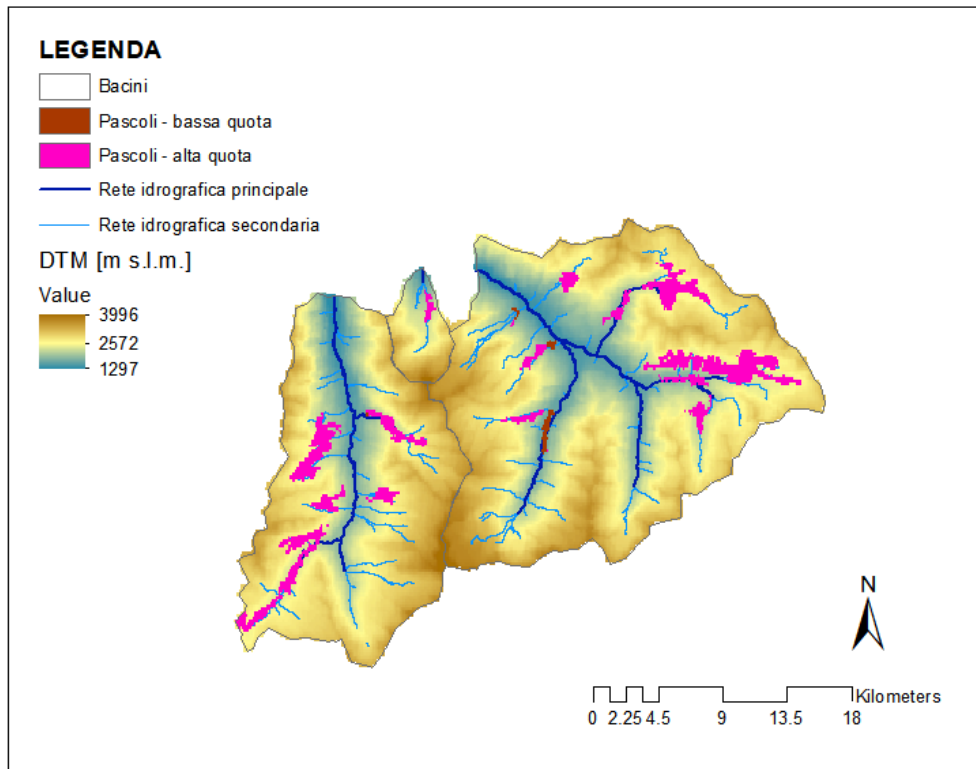


Figura 3.5: Ripartizione dei Pascoli per fascia di quota.

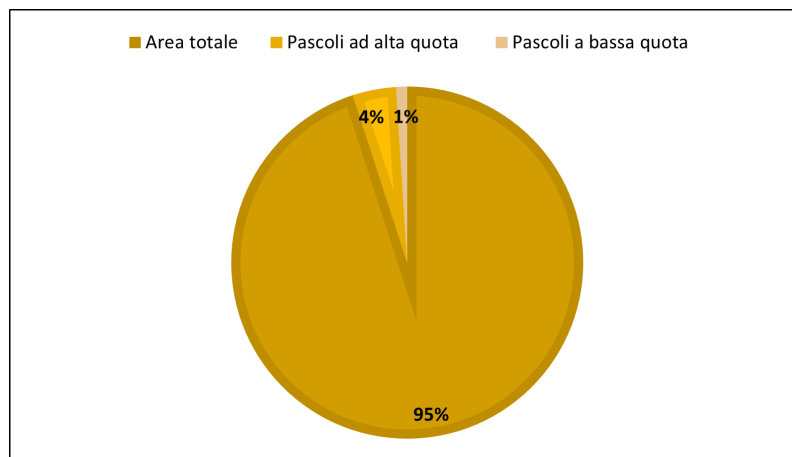


Figura 3.6: Copertura dei pascoli assoluta rispetto all'area di interesse.

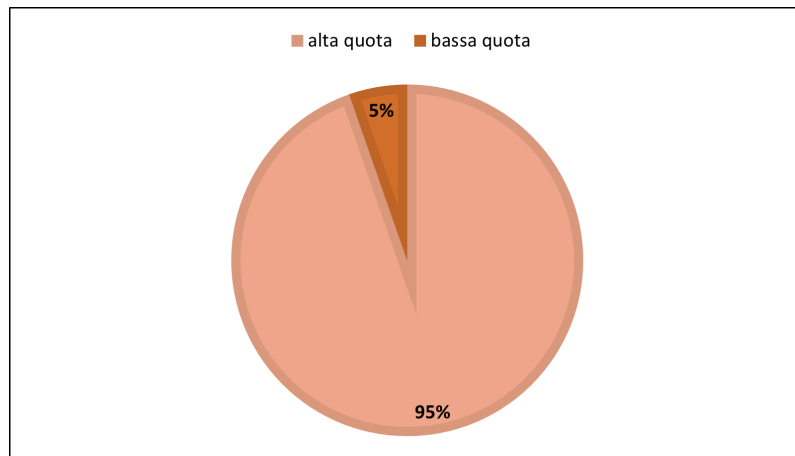


Figura 3.7: Partizione dei pascoli tra alta e bassa quota.



### 3.4.2 Ghiacciai

Sempre nel PTP è disponibile il Catasto dei ghiacciai. L'estensione delle aree glaciali è richiesto dal modello idrologico per poter studiare le dinamiche glaciali. Tali dati sono stati necessari per la validazione delle portate, in quanto l'ablazione glaciale è un contributo di notevole importanza in un bacino alpino.

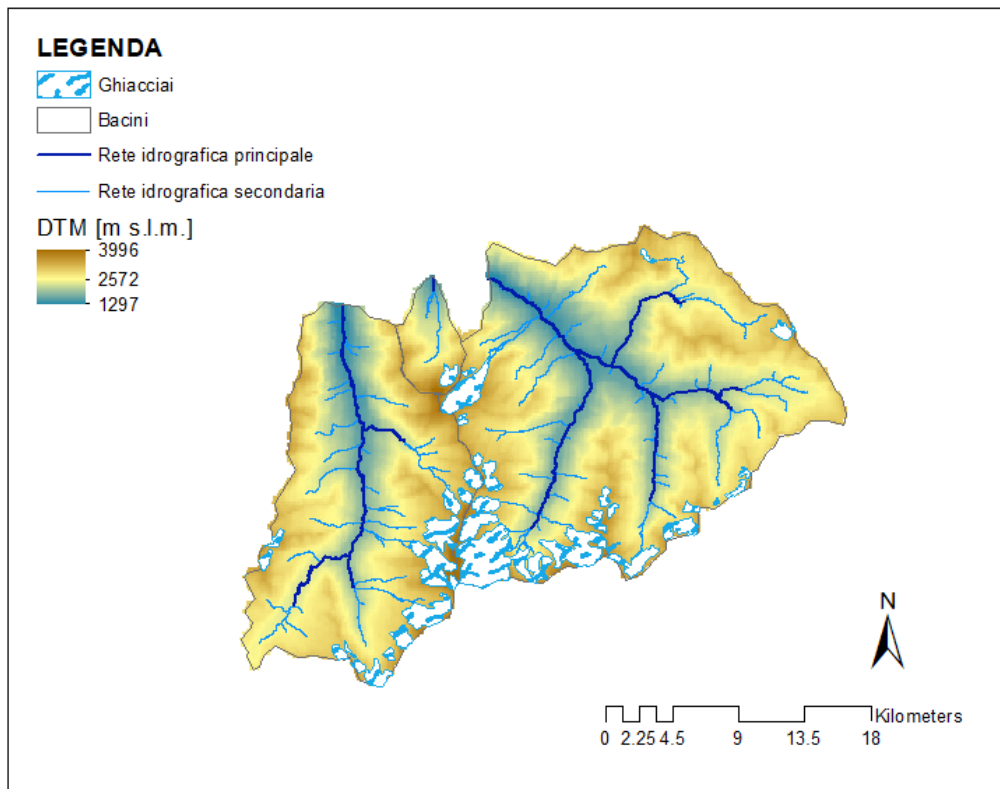


Figura 3.8: Estensione dei ghiacciai secondo il PTP nel PNGP.

### 3.5 Osservazioni LAI

La bontà di un terreno, adibito al pascolo in questo caso, può essere valutata tramite il calcolo di alcuni parametri stimabili dal Modello *Poly-Pasture*, quali la produttività  $Y[\text{tonha}^{-1}]$  l'indice di area fogliare  $LAI[m^2m^{-2}]$  la biomassa  $[tonha^{-1}]$  o una combinazione di essi. L'Indice di area fogliare (in inglese Leaf Area Index, da cui l'acronimo LAI) è una misura della superficie fogliare per unità di superficie del suolo ed è un parametro essenziale per lo studio delle coperture forestali e agrarie. L'indice LAI è funzione della biomassa [8, 16, 17, 18].

$$LAI = \frac{SLA \cdot B_r}{(1 + lsB_s)^2} \quad (3.2)$$

Dove  $SLA$  è l'area fogliare specifica,  $B_r$  è il tasso di biomassa, ovvero la biomassa giornaliera  $[tonha^{-1}]$ ,  $B_s$  è lo stato della biomassa  $[tonha^{-1}]$ , ovvero la quantità di biomassa immagazzinata fino al giorno considerato, e  $ls$  è il coefficiente di partizione stelo-foglia.

L'inventario dei valori LAI [19] è disponibile sul centro attivo di archiviazione dei processi territoriali, noto con l'acronimo *LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center)*, fornito dalla *NASA, National Aeronautics and Space Administration*, collocato al Centro *EROS, USGS Earth Resources Observation and Science*, Fig. 3.9. Questi dati hanno una risoluzione spaziale di  $1/12$  gradi (9.3 Km) e sono disponibili a un passo temporale di 7 giorni. Il satellite osserva e registra gli *NDVI*. Tramite un'elaborazione delle dati di *NDVI*, *Normalized Difference Vegetation Index*, viene simulato il valore dell'indice LAI [20]. I dati scaricabili nel sopra citato database della NASA, sono già elaborati e disponibili come indici LAI. In questo elaborato, si utilizza il pedice 'OSS' ( $LAI_{oss}$ ) qualora il LAI derivi dalle osservazioni di *NDVI*, si utilizza invece il pedice 'MOD' ( $LAI_{mod}$ ), quando il LAI è simulato dal modello  $P - P$ .

Per la mia calibrazione sono state impiegate le osservazioni LAI nell'area in cui ricade il Nord-Ovest Italiano, dal 2005 al 2019 a partire dal 25 Maggio fino al 14 Settembre, ogni due settimane. Il periodo analizzato coincide con la stagione di crescita della vegetazione. Tali dati sono disponibili sotto forma di mappe in formato *.HDF* importabili nei software di tipo *GIS*<sup>1</sup>. Non tutti gli anni sono stati registrati e riportati sul portale della NASA. Mancano le osservazioni degli anni 2009, 2016 e 2018, ma si è comunque ritenuta attendibile la calibrazione fatta su 12 anni rispetto a 15.

---

<sup>1</sup>*Geographical Information System* - strumento che permette di analizzare, rappresentare, interrogare entità o eventi che si verificano sul territorio

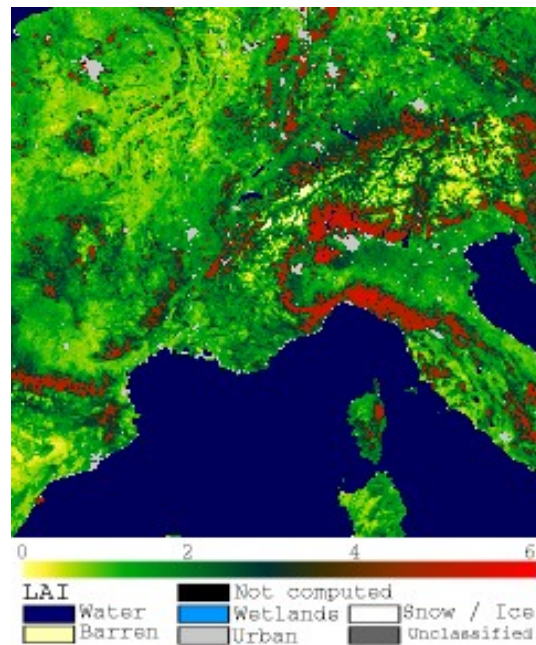


Figura 3.9: .  
Immagine satellitare LAI - MODIS (registrata in data 2006.07.28).

È stato inoltre necessario ridurre la scala delle celle osservate di LAI per poter effettuare un opportuno confronto tra LAI osservato e LAI simulato. Il modello  $P - P$  simula l'indice LAI in ogni cella della griglia, la quale ha stessa dimensione del DTM. Il procedimento è stato: tagliare l'immagine satellitare LAI lungo il contorno del PNGP e adeguare la scala di questa mappa alla scala del DTM, in modo tale che le celle abbiano stessa dimensione. In seguito sono state escluse le celle non ricadenti nelle aree pascolive. Questa operazione è stata eseguita direttamente tramite l'impiego dagli strumenti di *ArcGIS*.

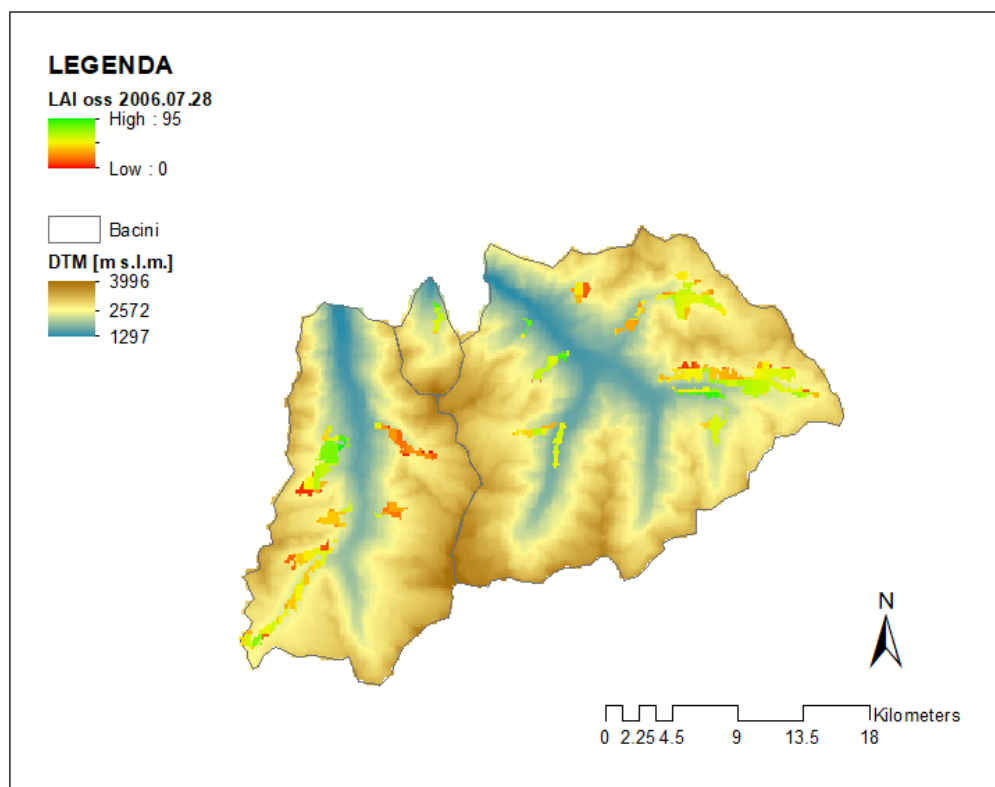


Figura 3.10: .  
LAI riportato su *ArcGIS* (registrato in data 2006.07.28) nelle aree pascolive.

# Capitolo 4

## Modello idrologico

Per modello idrologico si intende un modello matematico che esprime il bilancio tra flussi entranti e flussi uscenti da una sezione di chiusura del bacino idrografico. Trattandosi di un bacino alpino, la fusione nivale e glaciale costituiscono un importante contributo nel bilancio idrologico.

Il modello idrologico impiegato in questo lavoro ha sia carattere scientifico che empirico, e necessita di essere calibrato prima della sua applicazione. È richiesto l'impiego di formule fisicamente basate, ma, per ridurre il costo computazionale dei calcoli, alcune parti del modello vengono parametrizzate. Il modello è semi-distribuito, in quanto l'area di interesse viene suddivisa in celle e in ognuna di esse viene applicato il bilancio idrologico, però, per definire i deflussi generati da ogni singola cella, ci si basa su parametri generali su tutto il bacino e non specifici della singola cella. Definiti i parametri, per ogni sottobacino, i deflussi di ogni cella sono diretti alla sezione di chiusura del sottobacino stesso, senza occuparsi della modalità di incanalamento dell'acqua lungo i versanti.

Per includere gli effetti del pascolo sul bilancio idrologico, sono stati implementati tre modelli. L'obiettivo del modello *Poli-Hydro* è usato come base per l'elaborazione dei dati idrologici, nelle aree pascolive si aggiunge il modulo *Poly-Pasture* per la correzione della evapotraspirazione e la valutazione della crescita di vegetazione e il modello *CoSMo* è impiegato per studiare la competizione interspecifica tra le specie di vegetazione presenti nei pascoli.

### 4.1 Poli-Hydro

Il modello *Poli-Hydro*, [2, 21, 22], è un modello spazialmente semi-distribuito basato sull'equazione di conservazione della massa. Il modello si adatta bene per la valutazione del bilancio idrico in aree ad alta quota. Il tempo è discre-

tizzato in intervalli temporali e lo spazio in una griglia di celle bidimensionali, tra esse indipendenti e senza scambi di flusso laterali tra essi. L'area di studio è discretizzata in una griglia di celle da  $100 \times 100 m^2$  e in ognuna di queste celle vengono studiate le variabili in esame a passo temporale pari a 1 giorno (dalle 00:00 alle 23:59).

A tale modello vengono integrati i moduli *Poli-Ice*, per la modellazione nivale e glaciale, e *Poly-Pasture*, per la modellazione pascoliva.

Il modello *Poly-Pasture PP*, [11, 23, 24], è stato sviluppato e già impiegato da scienziati e ricercatori del Politecnico di Milano. È ottenuto dalla combinazione del modulo di crescita della vegetazione, basato su modelli colturali come *Cropsyst* [16, 17, 18] e *WOFOST*, e un modello idrologico. Quest'ultimo dipende dal contenuto d'acqua ricavato dal MC. Il modello colturale, a sua volta, restituisce al modulo idrologico il parametro *LAI* (*Indice di Area Fogliare*), richiesto per il calcolo della traspirazione, per la frazione di suolo ricoperto da vegetazione e per l'aggiornamento del contenuto d'acqua nel suolo. Entrambi i modelli, spazialmente semi-distribuiti, lavorano a scala giornaliera su una griglia di celle tra loro indipendenti. Ogni cella ha le proprie caratteristiche topografiche, un tipo di vegetazione, i propri input meteorologici e proprietà del suolo. Sono trascurati i flussi laterali, per l'ipotesi di indipendenza tra celle, e ogni strato di suolo è spesso quanto la massima profondità raggiungibile dalla specie di vegetazione presente. Il modello idrologico è fondato sull'equazione semplificata di *water budget*. Il contenuto di acqua nel suolo viene calcolata in due tempi successivi fissato l'intervallo di tempo  $\Delta T$ , eq. 4.1

$$S(t + \Delta t) = S(t) + P + M_s + M_i - ET_{eff} - Q_g \quad (4.1)$$

Con:

- $S(t)$  contenuto d'acqua nel suolo all'istante  $t$ ;
- $P$  precipitazione liquida nell'intervallo di tempo  $\Delta T$ ;
- $M_s$  altezza di neve fusa nell'intervallo di tempo  $\Delta T$ ;
- $M_i$  altezza di ghiaccio fuso nell'intervallo di tempo  $\Delta T$ ;
- $ET_{eff}$  reale evapotraspirazione nell'intervallo di tempo  $\Delta T$ ;
- $Q_g$  deflusso sotterraneo nell'intervallo di tempo  $\Delta T$ .

Il tutto espresso in *mm*.

Per semplicità si assume che, finché il terreno non è del tutto saturo, non si sviluppa deflusso in superficie.

$$Q_s = \begin{cases} S(t + \Delta t) - S_{max}, & \text{se } S(t + \Delta t) > S_{max} \\ 0, & \text{se } S(t + \Delta t) \leq S_{max} \end{cases} \quad (4.2)$$

Secondo il metodo Curve Number del Soil Conservation Service (CSC-CN), la ritenzione massima potenziale di umidità del suolo dopo l'inizio del deflusso,  $S_{max}$ , dipende dal *Curve Number*,  $CN$ .

$$S_{max} = S_0 \cdot \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4.3)$$

Con  $S_0$  imbibimento iniziale del suolo e  $CN$  Curve Number.

## 4.2 Fusione nivale e glaciale

Il modello *Poli – Hydro*, per valutare i contributi di ghiaccio e neve fusi nel *water budget*, eq. 4.1, sfrutta il metodo di Pellicciotti [25]. I meccanismi di fusione e accumulo di tali masse, sono valutati assumendo un approccio radiativo, ovvero si considera il contributo della temperatura accoppiato alla radiazione solare. È un approccio di *Thermal Time Accumulation*, cioè dovuto dall'accumulo di unità di unità termali temporali, quindi dal prodotto tra la temperatura e l'unità di tempo (giorno), ovvero i *degree – day*. Entrambi i dati meteorologici rientrano nella formula del tasso di fusione di neve, eq. 4.4, o ghiaccio, eq. 4.5, e sono ponderati con opportuni fattori termali e albedo riportati in Tab. 4.2 :

$$M(\bar{x}, t)_{snow} = \begin{cases} TMF_{snow} \cdot (T(\bar{x}, t) - T_{cr}) + RMF_{snow} \cdot R(\bar{x}, t)(1 - \alpha_{snow}) & \text{se } T > T_{cr} \\ 0 & \text{se } T \leq T_{cr} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$M(\bar{x}, t)_{ice} = \begin{cases} TMF_{ice} \cdot (T(\bar{x}, t) - T_{cr}) + RMF_{ice} \cdot R(\bar{x}, t)(1 - \alpha_{ice}), & \text{se } T > T_{cr} \\ 0 & \text{se } T \leq T_{cr} \end{cases} \quad (4.5)$$

Dove:

- $M(\bar{x}, t)$  è il tasso di fusione della neve o del ghiaccio, nel punto  $\bar{x}$  e al tempo  $t$  [ $mm$ ];
- $TMF$  (Thermal Melting Factor) è il fattore di fusione dovuto alla temperatura per neve o ghiaccio [ $mm^\circ C^{-1} day^{-1}$ ], tale fattore è indicato anche con *Degree-Day*,  $DD$ ;

Temperature limite	
$T_{threshold,snow}$ [C]	0
$T_{threshold,ice}$ [C]	0

Tabella 4.1: Temperature soglia di pioggia/neve  $T_{threshold,snow}$  e neve/ghiaccio  $T_{threshold,ice}$ .

FATTORI TERMALI e RADIATIVI	
$TMF_{snow}$ [ $mmday^{-1}C^{-1}$ ]	0.6
$TMF_{ice}$ [ $mmday^{-1}C^{-1}$ ]	1.3
$RMS_{snow}$	0.003
$RMS_{ice}$	0.005
$albedo$	0.20

Tabella 4.2: Fattori termali e radiativi di ghiaccio e neve.

- $RMS$  (Radiation Melting Factor) è il fattore di fusione dovuto alla radiazione per neve o ghiaccio [ $mm \frac{W}{m^2}^{-1} day^{-1}$ ];
- $R(\bar{x}, t)$  è la radiazione incidente  $Wm^{-2}$  nella posizione  $\bar{x}$  al tempo  $t$ ;
- $T_{cr}$  è la temperatura critica, o di soglia, al di sotto della quale non avviene fusione (Tabella 4.1);
- $\alpha$  è l'albedo di ghiaccio o di neve.

### 4.2.1 Modellazione nivale e glaciale - *Poli-Ice*

Nel modello *Poli-Hydro* è contenuto un modulo, *Poli-Ice* [3], impiegato per la simulazione delle dinamiche criosferiche.

Nelle aree ghiacciate o innevate, a partire dal bilancio semplificato delle forze rispetto un volume elementare rappresentativo di ghiaccio, *Poli-Ice* valuta la velocità del ghiaccio in funzione dello sforzo di taglio di base  $\tau_b$ .

$$\tau_b = h_{ice} \cdot \rho_{ice} \cdot g \cdot \sin\alpha \quad (4.6)$$

Dove:

- $\rho_{ice}$  è la densità del ghiaccio pari a  $917Kg m^{-3}$ ;
- $g$  è l'accelerazione di gravità pari a  $9.81ms^{-2}$ ;



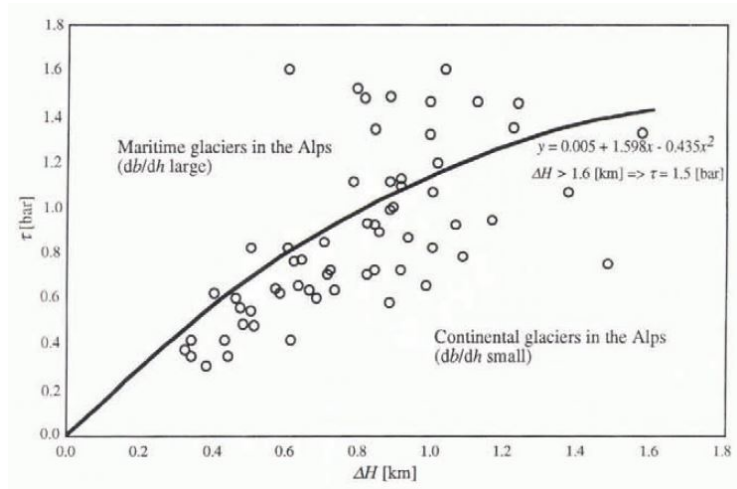


Figura 4.1: Sforzo di taglio di base medio lungo la linea di flusso centrale rispetto all'estensione altitudinale delle aree glaciali alpine. Haerberli, 1985 [26].

- $\sin\alpha$  è la pendenza del ghiacciaio, assumendo sia essa la stessa dello strato superficiale del terreno;
- $h_{ice}$  è lo spessore dello strato del ghiaccio.

L'ultimo parametro  $h_{ice}$  è però non disponibile. È possibile stimare tale valore sulla base della relazione empirica ricavata da Haberli [26], la quale correla lo sforzo di taglio del ghiaccio col dislivello tra la minima e la massima altitudine  $\Delta H$ .

$$\tau_b = \begin{cases} 0.005 + 1.598\Delta H - 0.4325\Delta H^2 [bar], & \text{se } \Delta H \leq 1.6 km \\ 1.5 [bar], & \text{se } \Delta H > 1.6 km \end{cases} \quad (4.7)$$

Dalla formula empirica di Haerberli e Holzle è possibile risalire allo spessore glaciale tramite l'equazione 4.6.

La relazione di Haerberli e Holzle permette di ottenere dei risultati diversi, a seconda dell'estensione dei ghiacciai: a parità di pendenza media, infatti, un ghiacciaio meno esteso, quindi con minore  $\Delta H$ , ha uno spessore medio minore. Tuttavia questo approccio può portare a dei risultati non accurati, in quei casi particolari in cui si ha a che fare con ghiacciai con un'estensione minore di  $0.1 km^2$ . Come riporta uno studio già effettuato in area PNGP [3],  $\Delta H$  è pari a  $0.5 km$  e  $\tau_b = 50 KPa$ .

### 4.3 Deflusso sotterraneo

La portata defluente tramite infiltrazione nella parte sotterranea del bacino è funzione del contenuto di acqua nel suolo  $S$  e della permeabilità del suolo  $K$ . I deflussi subsuperficiali hanno stessa sezione di sbocco e stesso spartiacque dei deflussi in superficie. Questa ipotesi è necessaria per studiare gli scambi di flusso in questo modello idrologico.

$$Q_g = K \cdot \left( \frac{S}{S_{max}} \right)^b \quad (4.8)$$

Dall'idrogramma è possibile calibrare i parametri  $b$  e  $K$ .

### 4.4 Evapotraspirazione

Per calcolare il contributo di evapotraspirazione effettiva  $ET$  dell'eq. 4.1, è necessario dapprima calcolare l'evapotraspirazione potenziale  $ETP$ , e poi correggerla tramite fattori inerenti al tipo di suolo, tipo di copertura vegetativa e umidità del suolo. La formula utilizzata per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale [ $mmday^{-1}$ ] è l'equazione empirica di Hargreaves [27].

$$ETP(t) = 0.0023 \cdot S_0 \cdot D_T^{0.5} \cdot (T + 17.8) \quad (4.9)$$

I parametri dell'equazione 4.9 sono:

- $S_0[mmday^{-1}]$ , equivalente idrico della radiazione solare extraterrestre;

$$S_0 = 15.392 d_{TS} (\omega_s \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (4.10)$$

- Latitudine  $\phi$ ;
  - Inclinazione solare al tramonto  $\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$  [ $rad$ ];
  - Declinazione solare  $\delta = 0.4093 \sin(2\pi j/365 - 1.405)$  [ $rad$ ] dove  $j$  indica il giorno dell'anno;
  - Distanza relativa Terra-Sole  $d_{TS} = 1 + 0.033 \cos(2\pi j/365)$  [ $rad$ ] dove  $j$  indica il giorno dell'anno.
- $D_T[^\circ C]$ , la media mensile della differenza tra la temperatura massima e minima giornaliera;
  - $T[^\circ C]$ , la temperatura media giornaliera.

Definita la copertura vegetativa  $f$  e il contenuto relativo di acqua nel suolo  $\theta$  (eq. 4.13), l'evaporazione e la traspirazione effettiva, calcolate a partire da 4.9, vengono definite come:

$$E_{eff} = \alpha(\theta) \cdot ETP \cdot (1 - f) \quad (4.11)$$

$$T_{eff} = \beta(\theta) \cdot ETP \cdot f \quad (4.12)$$

$$\theta = \frac{S}{S_{max}} \quad (4.13)$$

Da  $\theta$  e  $f$  dipendono i parametri  $\alpha$  e  $\beta$ .

$$\alpha = \theta \quad (4.14)$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{\theta - \theta_w}{\theta_l - \theta_w}, & \text{se } \theta > \theta_w \\ 0, & \text{se } \theta \leq \theta_w \end{cases} \quad (4.15)$$

I parametri  $\theta_w$  e  $\theta_l$  sono riportati in tabella 4.3.

L'evapotraspirazione  $ET$  richiesta dal modello idrologico è data dalla somma di evaporazione (eq. 4.11) e traspirazione (eq. 4.12) effettive.

$$ET = E_{eff} + T_{eff} \quad (4.16)$$

#### 4.4.1 Modellazione pascoliva - *Poly-Pasture*

Il contributo dell'evapotraspirazione può cambiare se nell'area interessata sono presenti pascoli. Il modulo *Poly - Pasture*, viene applicato per la correzione di  $ET$  [28], qualora la cella del dominio studiata ricadesse in una zona adibita al pascolo. L'evapotraspirazione di equilibrio [29] in  $mmday^{-1}$  è data da:

$$ET_{eq} = \frac{s}{s + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (4.17)$$

Dove:

- $R_n$  [ $MJm^{-2}day^{-1}$ ] è la radiazione netta sulla superficie, ovvero la differenza tra la radiazione entrante (o a *onde corte*) e la radiazione uscente (*onde lunghe*);
- $G$  [ $MJm^{-2}day^{-1}$ ] è il flusso di calore al suolo, che si considera pari al 10% della radiazione netta;

- $\lambda$  è il calore latente di vaporizzazione;
- $\gamma[kPaK^{-1}]$  è il coefficiente locale psicrometrico;
- $s[kPaK^{-1}]$  è la pendenza della curva pressione-temperatura di vapore saturo, calcolata nel punto di temperatura medio.

Secondo gli autori Priestley e Taylor [30], la formula dell'evapotraspirazione di equilibrio, può essere corretta tramite un coefficiente,  $\alpha_1 = 1.26$ , che tenga conto dell'evapotraspirazione imposta dall'aria circostante [31] per ricavare l'evapotraspirazione potenziale.

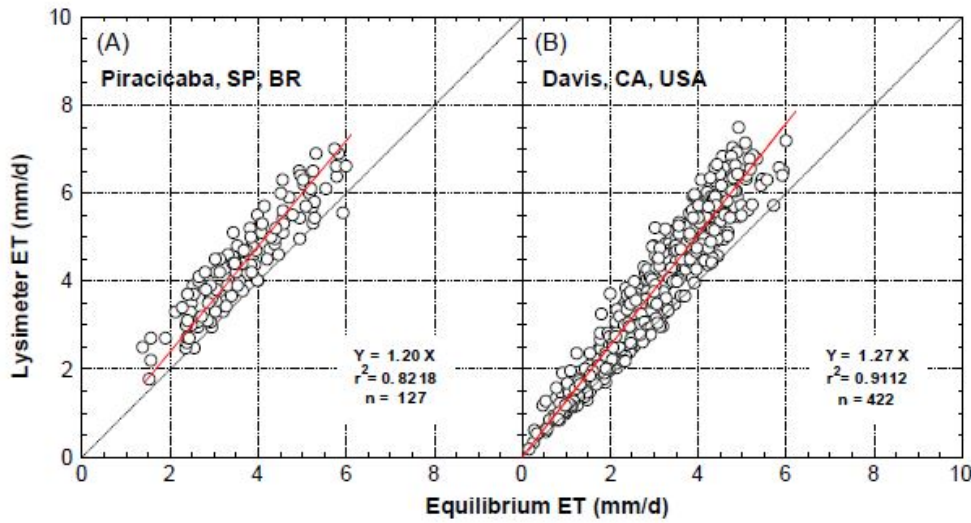


Figura 4.2: Valutazione del parametro  $\alpha$  di Priestley e Taylor per l'evapotraspirazione secondo le specie erbacee di riferimento di: A) Piracicaba, SP, Brasil; B) Davis, CA, USA [29].

$$ETP_{P-P} = \alpha_1 \cdot \frac{s}{s + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (4.18)$$

La formula di Priestley e Taylor, eq.4.18, viene adoperata per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale in presenza di pascolo  $ETP_{P-P}$ , mentre la formula di Hargreaves, eq.4.9, viene usata in per calcolare l'evapotraspirazione potenziale  $ETP$  altrove. A partire dall'evapotraspirazione potenziale, valutata nelle celle di pascolo,  $ETP_{P-P}$ , si possono ricavare evaporazione e traspirazione effettiva. L'evaporazione segue il medesimo approccio precedentemente introdotto con l'eq. 4.11, usando però quest'ultimo valore di evapotraspirazione potenziale, mentre la traspirazione è calcolata tramite un'equazione in funzione delle proprietà idrauliche delle specie vegetative [32], eq. 4.20.

$$E_{eff,P-P} = \alpha(\theta) \cdot ETP \cdot (1 - f) \quad (4.19)$$

$$T_{eff,P-P} = 86400 \cdot C / 1.5 (\Psi_{sc} - \Psi_w) \quad (4.20)$$

dove  $k[.]$  è il fattore di estinzione della radiazione solare,  $C[kgsm^4]$  la conduttanza radicale,  $\Psi_{sc}[Jkg^{-1}]$  il potenziale di acqua nel suolo,  $\Psi_w[Jkg^{-1}]$  il potenziale di acqua nel verde e 1.5 è il fattore di conversione radice-conduttanza idraulica (vedi Tab. 4.5 e 4.6).

Il valore di evapotraspirazione effettiva, espressa in  $mm$ , a passo giornaliero, restituito al modello idrologico diventa quindi:

$$ET_{P-P} = E_{eff,P-P} + T_{eff,P-P} \quad (4.21)$$

#### 4.4.2 Biomassa e LAI

Il modello di crescita vegetativa considera il valore minore di crescita espressa in  $[kgm^{-2}day^{-1}]$  fra la *crescita di biomassa* in funzione della traspirazione, eq. 4.22, e quella in funzione della radiazione, eq. 4.23.

$$G_{TR} = (T_{eff} \cdot BTR) / VPD. \quad (4.22)$$

$$G_R = LtBc \cdot PAR \cdot f_{PAR} \cdot T_{lim} \quad (4.23)$$

Con:

- $T_{eff}[mday^{-1}]$  traspirazione effettiva;
- $VPD[kPa]$  deficit di tensione di vapore;
- $BTR[kPakgm^{-3}]$  parametro di conversione traspirazione-biomassa;
- $LtBc[kgMJ^{-1}]$  parametro di conversione luce-biomassa;
- $PAR[MJm^{-2}day^{-1}]$  radiazione attiva fotosinteticamente;
- $f_{PAR}[.]$  frazione di PAR intercettata dalla canopia <sup>1</sup>;
- $T_{lim}[.]$  fattore di limitazione della temperatura.

---

<sup>1</sup>porzione superiore di una comunità di piante o colture formata dalle chiome delle piante

Si ipotizza la massima disponibilità dei nutrienti nel suolo. In genere i pascoli, sebbene soggetti a naturale fertilizzazione da parte degli animali, non sono sottoposti ad ulteriore fertilizzazione o irrigazione. Per questo, la biomassa valutata è in senso *potenziale*. Gli stadi di crescita della vegetazione sono basati sull'accumulazione di *gradi giorno* durante la stagione di crescita. Ogni specie raggiunge il successivo stadio di crescita quando i gradi giorno necessari sono stati cumulati. Al di sotto della temperatura di base, non avviene tale cumulazione. In presenza di biomassa vegetativa, l'evapotraspirazione dipende dal *LAI*, il quale viene calcolato iterativamente per ogni giorno di simulazione. La traspirazione effettiva dipende dalla crescita di vegetazione giornaliera, e la sua fase vegetativa:

$$f_{PAR} = 1 - \exp(-k \cdot LAI_{cum}) \quad (4.24)$$

L'indice di area fogliare, che si ricava dall'Equazione 3.2, dipende strettamente dalla biomassa. Biomassa e LAI sono output del modello colturale mono specie *CropSyst* [8, 17, 16], sul quale si fonda il modello multi specie *CoSMO* e fa parte del modello *P - P*. Questo metodo calcola la crescita giornaliera di LAI a partire dalla biomassa, e non viceversa.

Lo sviluppo delle colture è simulato come funzione dei fattori tempo termali accumulati (Degree-Day) tra la temperatura base ( $T_{base}$ ) e la temperatura di soglia ( $T_{cutoff}$ ). La crescita colturale invece è simulata per l'intera canopia come funzione della radiazione intercettata e la disponibilità idrica. Le variabili di crescita dipendenti da traspirazione e radiazione sono riportate nelle Equazioni 4.22 e 4.23, rispettivamente.

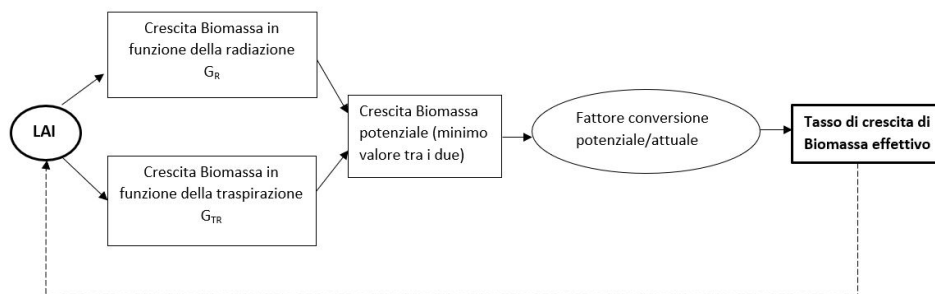


Figura 4.3: Schema semplificato dei calcoli Biomassa e LAI in *P - P*.

La derivata dell'Equazione 3.2 rispetto alla biomassa esprime la variazione di LAI al variare della biomassa. Così, la quantità di nuova area fogliare prodotta in ogni giorno di simulazione è una funzione della produzione di biomassa in quel giorno. La fine della stagione di crescita segna la fine di produzione di

LAI. All'indice LAI è assegnato un fattore termale giorno (Degree-Day). Raggiunti i gradi giorno, il LAI giornaliero non cresce più, e ha inizio il processo di senescenza delle foglie.

### 4.4.3 Parametri del suolo

Il modello *Poly – Pasture* richiede, per ogni cella, le proprietà idrauliche del suolo [23, 24]. Tali proprietà sono:

- punto di appassimento  $\theta_w$ ;
- capacità del campo  $\theta_l$ ;
- saturazione  $\theta_s$ ;
- conducibilità idraulica  $K$ .

Parametro	
$\theta_w$ [.]	0.13
$\theta_l$ [.]	0.28
$\theta_s$ [.]	0.32
$K$ [mm h <sup>-1</sup> ]	3.5

Tabella 4.3: Parametri geo-idraulici del Modello *P – P* nell'area PNGP.

### 4.4.4 Parametri di vegetazione

Il modello dei pascoli richiede anche alcuni parametri agronomi, riguardanti la fenologia dei pascoli, analogamente coi modelli colturali. Si tratta di:

- $T_{base}$  [°C]: temperatura di base;
- $T_{cutoff}$  [°C]: temperatura di *cutoff* o di soglia;
- $T_{opt}$  [°C]: temperatura sotto la quale il tasso di crescita è ridotto;
- $R_{d,max}$  [m]: massima profondità radicale;
- $GD_{emerg}$  [°Cday]: gradi giorno all'emergenza;
- $GD_{mat}$  [°Cday]: gradi giorno alla maturazione;
- $GD_{flow}$  [°Cday]: gradi giorno alla fioritura
- $K_{c0}$  [.]: coefficiente colturale di evapotraspirazione;

- $k[\cdot]$ : coefficiente di estinzione della radiazione solare;
- $L_{tbc}[gMJ^{-1}]$ : parametro di conversione luce-biomassa;
- $U_{max}[kgm^{-2}day^{-1}]$ : massimo assorbimento giornaliero di acqua;
- $D_{max}[cm^{-2}]$ : massima densità radicale;
- $\psi_{sc}[Jkg^{-1}]$ : potenziale idrico critico della foglia;
- $\psi_w[Jkg^{-1}]$ : potenziale idrico della foglia al punto di appassimento;
- $BTR[kPakgm^{-3}]$ : parametro di conversione traspirazione-biomassa;
- $SLA[m^2kg^{-1}]$ : Area Fogliare Specifica;
- $ls$ : coefficiente di ripartizione stelo-foglia.

I valori di questi parametri, riportati nelle tabelle 4.5 e 4.6, sono in parte ricavati da letteratura [7] e d'altra parte risultato di accurata calibrazione.

La vegetazione presente nel Parco Nazionale del Gran Paradiso è ricca e variegata, la sua tipologia cambia a seconda del versante, della fascia di quota e dell'uso di suolo tipico in quella zona. La gerarchia della vegetazione pastorale nelle Alpi interne (Figura 4.4) è così strutturata: vi sono principalmente zone umide, zone ghiaiose, brughiere, vegetazione nitrofile e praterie, in mezzo alle quali spiccano specie tipiche alpine usate talvolta come foraggio [14].

Tra le specie presenti nelle praterie del Gran Paradiso ho scelto di inserire nel modello colturale due specie per fascia di quota.

Si è scelto di adottare solo due specie di vegetazione a rappresentanza di tutta la comunità vegetale in una fascia di altitudine poiché (i) sono quelle presenti in maggior abbondanza, (ii) si ha a disposizione più letteratura a riguardo e (iii) per semplificare la modellazione. Utilizzare tutte le specie elencate in Fig. 4.4 sarebbe stato molto più oneroso dal punto di vista computazionale, oltre ad essere non pertinente per un tipo di analisi dinamica idrologica. Si ritiene quindi che quattro specie vegetali in totale siano sufficientemente rappresentative.

Le indagini in sito, eseguite precisamente a Orvieille, a quota 2300 metri, nel comune di Introd, confermano la predominante abbondanza delle specie *Nardus Stricta* e *Festuca Rubra* ad alta quota (Tabella 4.4). La scelta di adottare queste due specie a rappresentanza della comunità vegetale ad alta quota, risulta quindi convalidata sul campo.



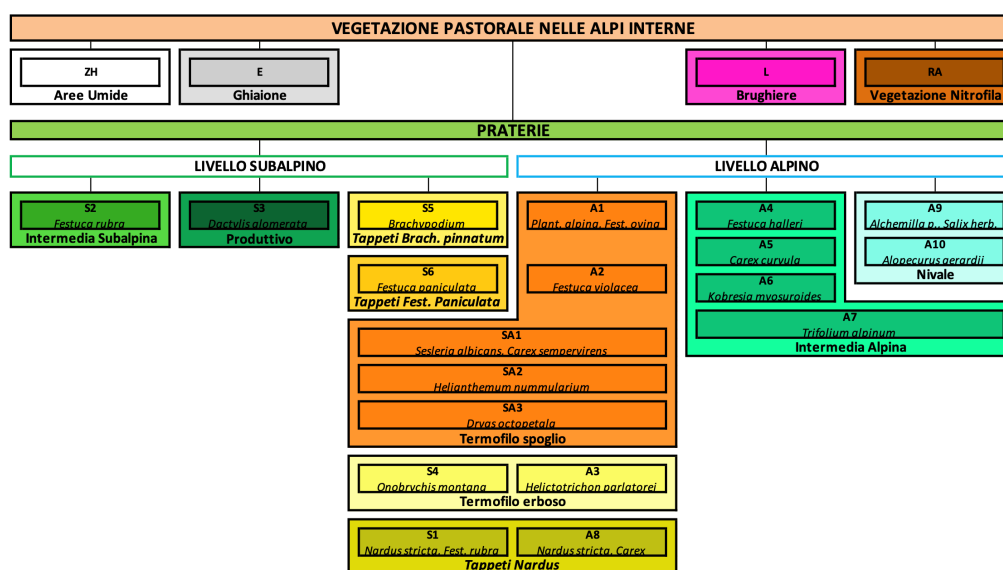


Figura 4.4: Gerarchia della vegetazione pastorale nelle Alpi interne.

Specie	Peso lordo [g]	Tara [g]	Peso netto [g]	Presenza [%]
<i>Festuca Rubra</i>	57.53	18.41	39.12	22.8
<i>Alchemilla flabellata</i>	43.89	9.22	34.67	20.2
<i>Nardus Stricta</i>	43.44	9.18	34.26	19.97
<i>Ranunculus acris</i>	43.09	9.32	33.77	19.68
<i>Achillea millefolium</i>	25.50	9.19	16.31	6.50
<i>Phleum rhaeticum</i>	15.24	9.16	6.081	3.54
<i>Trifolium montanum</i>	14.51	9.19	5.32	3.10
<i>Antennaria dioica</i>	11.23	9.16	2.06	1.20

Tabella 4.4: Riepilogo dati di vegetazione campionati ad Orvieille, quota 2300 metri, Introd, in data 15/07/2019.

I parametri di vegetazione servono al modello *Poly-Pasture* per la valutazione di parametri necessari al modulo idrologico e servono al modello *CoSMo* per studiarne la competizione interspecifica. Le specie studiate sono:

- a bassa quota:
  - *Trifolium Alpinum*;
  - *Dactylis Glomerata*;
- ad alta quota:

- *Festuca Rubra*;
- *Nardus Stricta*.



Figura 4.5: Specie di vegetazione a bassa quota del Gran Paradiso. A destra *Trifolium Alpinum*, a sinistra *Dactylis Glomerata*.



Figura 4.6: Specie di vegetazione ad alta quota del Gran Paradiso. A destra *Festuca Rubra*, a sinistra *Nardus Stricta*.

Parametro	<i>Trifolium Alpinum</i>	<i>Dactylis Glomerata</i>	Riferimento
$T_{base}[^{\circ}C]$	2	5	a
$T_{cutoff}[^{\circ}C]$	28	28	a
$T_{opt}[^{\circ}C]$	10	8	<i>cal</i>
$R_{d,max}[m]$	1	1.4	a
$GD_{emerg}[^{\circ}Cday]$	40	50	a,f
$GD_{mat}[^{\circ}Cday]$	3000	4000	a,f
$GD_{flow}[^{\circ}Cday]$	400	650	a,f
$K_{c0}[\cdot]$	1	1	a
$k[\cdot]$	0.4	0.45	a
$L_{tbc}[gMJ^{-1}]$	1.7	2.7	<i>cal</i>
$U_{max}[kgm^{-2}day^{-1}]$	10	8	d,e
$D_{max}[cm^{-2}]$	4	4	c
$\psi_{sc}[Jkg^{-1}]$	-1200	-1200	e
$\psi_w[Jkg^{-1}]$	-1500	-1500	e
$BTR[kPakgm^{-3}]$	5	4	<i>cal</i>
$SLA[m^2kg^{-1}]$	55	50	<i>cal</i>
$ls[m^2kg^{-1}]$	1	4.5	a

Tabella 4.5: Parametri vegetazione di bassa quota richiesti dal *ModelloP – P* nell'area PNGP. I valori sono stati presi da letteratura (Riferimenti: a [7]; b [11]; c [33]; d [23]; e [24]; f [34]) o calibrati (*cal*).

Parametro	<i>Festuca Rubra</i>	<i>Nardus Stricta</i>	Riferimento
$T_{base}[^{\circ}C]$	4	1	a,b
$T_{cutoff}[^{\circ}C]$	27	24	a,b
$T_{opt}[^{\circ}C]$	7	5	<i>cal</i>
$R_{d,max}[m]$	1.45	1.5	a,b
$GD_{emerg}[^{\circ}Cday]$	40	50	a,b,f
$GD_{mat}[^{\circ}Cday]$	3000	4000	a,b,f
$GD_{flow}[^{\circ}Cday]$	500	400	<i>cal</i>
$K_{c0}[.]$	1	1	a,b
$k[.]$	0.47	0.30	a,b
$L_{tbc}[gMJ^{-1}]$	2.5	1.7	<i>cal</i>
$U_{max}[kgm^{-2}day^{-1}]$	7	8	d,e,b
$D_{max}[cm^{-2}]$	4	4	c,b
$\psi_{sc}[Jkg^{-1}]$	-1200	-1200	e,b
$\psi_w[Jkg^{-1}]$	-1500	-1500	e,b
$BTR[kPakgm^{-3}]$	3	3	<i>cal</i>
$SLA[m^2kg^{-1}]$	60	50	<i>cal</i>
$ls[m^2kg^{-1}]$	2	3.5	a,b

Tabella 4.6: Parametri vegetazione di alta quota richiesti dal *ModelloP - P* nell'area PNGP. I valori sono stati presi da letteratura (Riferimenti: a [7]; b [11]; c [33]; d [23]; e[24]; f [34]) o calibrati (*cal*).

## 4.5 Modello CoSMo

I modelli colturali tradizionali, i quali simulano l'impatto delle condizioni meteorologiche, la fertilità del suolo e l'intensità di utilizzo dei sistemi di pascolo, ricevono dettagli eco-fisiologici e biofisici dai modelli colturali senza considerare esplicitamente i cambiamenti temporali nella composizione tassonomica e funzionale. Il modello dinamico dei pascoli CoSMo, *Community Simulation Model*, comprende una serie di algoritmi per simulare esplicitamente i cambiamenti della composizione della specie, all'interno di una comunità erbacea, durante la stagione di crescita. L'obiettivo è quello di studiare la fitocenosi nel suo insieme, simulando le dinamiche di raccolto [7, 8].

Il modello *CoSMo* si basa su un unico simulatore di raccolto per simulare dinamica e produttività di una comunità di vegetazione. Si tratta di un modello semplificato in quanto studia una comunità nel suo insieme, usando lo stesso algoritmo per tutte le specie appartenenti, piuttosto che usare un modulo diverso che si adatti al comportamento della singola specie. Questa semplificazione è consentita poiché CoSMo si fonda su due assunzioni. La prima è che si può, in qualsiasi step di tempo, risalire ai parametri di una singola specie a partire dai parametri complessivi della comunità. La seconda è che la competizione interspecifica è rappresentabile come una funzione tempo variante, che tiene conto delle condizioni che determinano l'adattabilità.

La logica è derivare una serie di parametri dal modello di simulazione del raccolto, detti parametri della comunità, a seconda della morfologia e delle caratteristiche fisiologiche delle specie presenti in tale comunità e derivare la presenza relativa tra specie differenti. I parametri della comunità vengono aggiornati ad ogni step temporale, a partire dalle condizioni iniziali in  $T_0$ , in funzione dei cambiamenti dei parametri della singola specie, di quanto questa si adatti alle nuove condizioni, e alla sua abbondanza. L'algoritmo di CoSMo è schematizzato in Figura 4.7. In  $T_0$  il modello viene inizializzato con le informazioni di suolo, gestione, parametri meteorologici e dati delle specie appartenenti alla comunità. Da queste condizioni iniziali valuta i fattori di *suitability* e ricava l'abbondanza, o presenza relativa, di ciascuna specie. CoSMo è in grado di calcolare un set di parametri del modello colturale che descrive la comunità vegetale in quell'istante temporale, ponderando per la presenza relativa della singola specie. A seguito il modello colturale aggiorna gli stati e tassi della comunità grazie al set medio dei parametri e alle informazioni di gestione, suolo e meteo; in questo modo  $T_0$  termina e inizia il nuovo step temporale  $T_1$ .

Per ogni specie e per ogni step temporale vengono stimati i fattori di *suitability*, indicati con  $f_i$ , spiegati nei seguenti paragrafi.

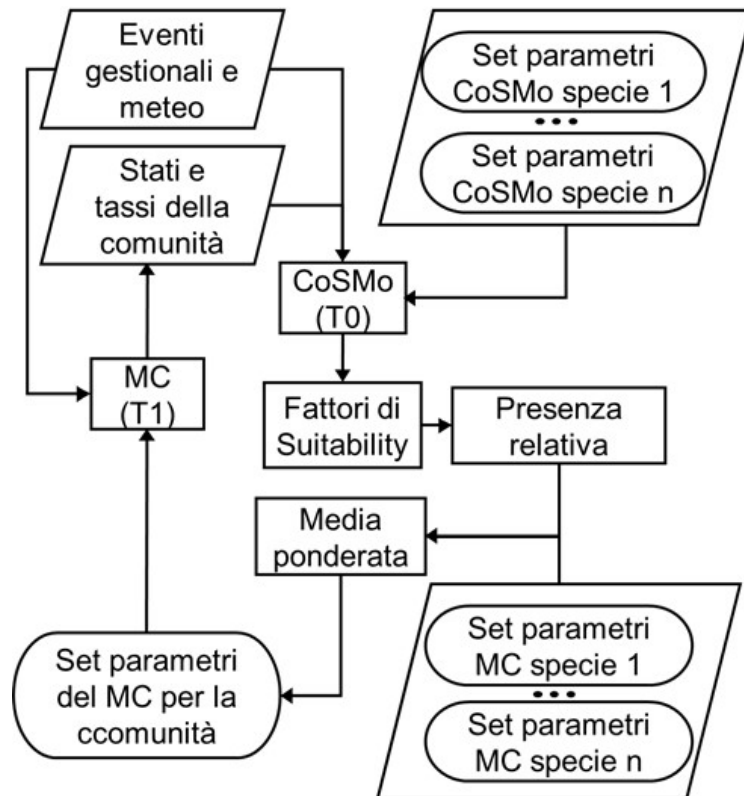


Figura 4.7: Diagramma del funzionamento di CoSMo dove T0 è il time step iniziale e T1 è il time step aggiornato.

## Gestione

A seconda della gestione del prato, si adotta uno dei due fattori tra:

### Pascolo

$$f_{liking} = (1 - L) \cdot \{1 + [(2 \cdot SCP(t - \Delta t) - 3) \cdot SCP(t - \Delta t)^2]\} \quad (4.25)$$

Dove,  $L$   $[0,1]$  descrive la preferenza dell'animale a mangiare la data specie (0: sgradisce, 1: gradisce) ed  $SCP(t - \Delta t)$  è l'abbondanza della specie al time step precedente.

### Taglio

Il fattore di *suitability* legato al taglio  $f_{cut}$  vale sempre 1, tranne nei giorni a partire dal taglio in cui la specie sta ricrescendo (fissato a 2 giorni per assenza di dati) dove  $f_{cut} = 0$ .

### Temperatura

$$f_t = \begin{cases} 0, & \text{se } T_{avg} \leq T_{base} \\ \frac{T_{avg} - T_{base}}{T_{opt} - T_{base}}, & \text{se } T_{avg} > T_{base} \quad T_{avg} \leq T_{opt} \\ \frac{T_{coff} - T_{avg}}{T_{coff} - T_{opt}}, & \text{se } T_{avg} > T_{opt} \quad T_{avg} < T_{coff} \\ 0, & \text{se } T_{avg} \geq T_{coff} \end{cases} \quad (4.26)$$

Dove  $T_{avg}$  è la temperatura giornaliera media dell'aria,  $T_{base}$ ,  $T_{opt}$  e  $T_{coff}$  sono le temperature base, ottimale e di cutoff, rispettivamente.

### Radiazione

$$f_{rad} = 0.5 + 0.025 \cdot \left( \frac{LAI_{max} - LAI(t)}{LAI_{max} + LAI(t)} + \frac{H_{max} - H}{H_{max} + H(t)} \right) \quad (4.27)$$

Dove  $LAI$  e  $H$  indicano l'indice di area fogliare e l'altezza della comunità erbacea, che siano i valori massimi o quelli calcolati all'istante  $t$ .

### Acqua

$$f_w = \frac{f_{PAW} + f_{root}}{2} \quad (4.28)$$

Per la stima dell'effetto della competizione sul fattore acqua 4.28, vengono considerati la disponibilità di acqua nel suolo 4.29 e l'approfondimento delle radici 4.30.

$$f_{PAW} = \begin{cases} 0, & \text{se } SWC(t) < 1 - DT \\ \frac{DT-1}{DT} + \frac{SWC(t)}{DT}, & \text{altrove} \end{cases} \quad (4.29)$$

Dove  $SWC(t)$  è la disponibilità idrica del suolo espressa in percentuale volumetrica dell'acqua rispetto al totale delle porosità, mentre  $DT$  è un parametro specifico  $[0,1]$  che identifica la tolleranza delle singole specie erbacee allo stress idrico (1: tollerante, 0: sensibile).

$$f_{root} = \begin{cases} 1 - \frac{RD(t)}{RD_{max}}, & \text{se } RT(t) \leq RD_{max} \\ 0, & \text{altrove} \end{cases} \quad (4.30)$$

Con  $RD(t)$  profondità radicale della comunità erbacea al tempo  $t$  e  $RD_{max}$  massima profondità radicale della singola specie.

### Calcolo *suitability* complessiva

Per ogni specie erbacea considerata, i fattori sono ordinati in modo gerarchico, come indicato nelle equazioni 4.31 - 4.34, e aggregati, eq. 4.35, per i quattro fattori precedentemente elencati.

$$HSf_1 = f_{liking} \parallel f_{cut} \quad (4.31)$$

$$HSf_2 = \sqrt{f_{liking} \parallel f_{cut} \cdot f_t} \quad (4.32)$$

$$HSf_3 = \sqrt{\sqrt{f_{liking} \parallel f_{cut} \cdot f_t} \cdot \sqrt{f_t} \cdot f_{rad}} \quad (4.33)$$

$$HSf_4 = \sqrt{\sqrt{\sqrt{f_{liking} \parallel f_{cut} \cdot f_t} \cdot \sqrt{f_t} \cdot f_{rad}} \cdot \sqrt{f_{rad}} \cdot f_w} \quad (4.34)$$

$$Sfs = \sum_{q=1}^{q=4} (HSf_q) \quad (4.35)$$

Con  $n$  specie erbacee presenti, il fattore di *suitability* dell'intera comunità erbacea è:

$$CSf = \sum_{i=1}^{i=n} (Sfs_i) \quad (4.36)$$



## Confronto tra singola specie e comunità

In caso di crescita effettiva della biomassa vegetale la nuova presenza relative della specie sarà stimata secondo l'equazione 4.37, altrimenti rimarrà uguale a quella del time step precedente.

$$SCP_i(t) = SCP_i(t - \Delta t) + \left( \frac{Sf s_i - \frac{CSf}{n}}{I \cdot z} \right) \quad (4.37)$$

Dove  $I$  è un parametro [80,120] che identifica l'inerzia del sistema a cambiare.

## Stima dei parametri del modello colturale

I parametri del modello colturale (MC) che rappresentano la comunità vegetale ( $yr$ ) vengono ri-stimati ad ogni step temporale in base alla media ponderata tra i parametri delle singole specie  $yr_i$  e la presenza relativa 4.38.

$$yr = \forall y \sum_{i=1}^{i=n} (y_i \cdot SCP_i) \quad (4.38)$$

### 4.5.1 Calibrazione CoSMo

Il modello CoSMo da me utilizzato, è stato calibrato da Movedi [7]. L'autore si basa sulle osservazioni della produttività annuale nelle comunità colturali di Massa Marittima, in Toscana, località dal clima mediterraneo [35]. Inizialmente sono stati adottati i parametri di vegetazione implementati dal modello *CropSyst*. La procedura di calibrazione è stata eseguita tramite tentativi ed errori, confrontando le osservazioni con le simulazioni. I parametri di *CoSMo* sono stati calibrati indipendentemente dal loro legame col modello. Il parametro rispetto al quale è stato validato il modello è la presenza relativa delle specie della comunità erbacea in esame. Per valutare la bontà della stima e procedere con la correzione del modello, l'autore si è affidato agli indicatori i) RMSE, errore quadratico medio; ii) MAE, errore medio assoluto; iii) lo scarto quadratico medio  $R^2$ , ovvero la differenza al quadrato tra osservazione e simulazione e iv) CRM, cioè la tendenza del modello a sovrastimare i risultati. Per inizializzare il modello, si pone il valore di presenza relativa post-emergenza alla condizione pre-emergenza. Confalonieri [8] nella sua applicazione di CoSMo, constata che, qualunque siano le condizioni iniziali di presenza relativa delle specie analizzate in una comunità, esse tenderanno in un breve periodo a stabilire la loro gerarchia. Difatti, l'autore si è accorto che al cambiare le

ipotesi di abbondanza iniziale delle sue tre specie studiate, nel giro di pochi mesi, secondo il modello, esse raggiungevano lo stesso risultato di abbondanza che avrebbero ottenuto a partire da altre condizioni iniziali. Presa questa consapevolezza, anche nel mio studio, riguardante comunità colturali di due specie per fascia di quota, si assume come condizione iniziale la presenza relativa pari a 0.5 per specie. Questa ipotesi non influenzerà i risultati a seguire.

### 4.5.2 Parametri per la competizione interspecifica

La competizione tra le specie vegetali presenti nell'area di interesse, è valutata dal modello *CoSMo*. I dati necessari a questo modulo sono in parte già richiesti per il modello  $P - P$ , altri sono specifici di questa parte per poter analizzare la presenza relativa delle due specie, per fascia di quota.

I parametri in questione sono:

- $L$ , fattore di gradimento della specie da parte dei bovini al pascolo [36, 37].
- $DT$ , la tolleranza allo stress idrico;
- $Abbond0$ , l'abbondanza relativa della specie a inizio stagione di pascolo. Per semplicità si assume che il primo giorno di osservazione/modellazione (1 Aprile 2005) le due specie, per fascia di quota, siano presenti in egual quantità, quindi entrambe hanno presenza relativa del 50%.

Parametro	<i>Trifolium Alpinum</i>	<i>Dactylis Glomerata</i>
<i>L</i>	0.30	0.70
<i>DT</i>	1	1
<i>Abbond0</i>	0.5	0.5

Tabella 4.7: Parametri richiesti dal Modello *CoSMo* a bassa quota nell'area PNGP.

Parametro	<i>Festuca Rubra</i>	<i>Nardus Stricta</i>
<i>L</i>	0.70	0.30
<i>DT</i>	1	1
<i>Abbond0</i>	0.5	0.5

Tabella 4.8: Parametri richiesti dal Modello *CoSMo* ad alta quota nell'area PNGP.

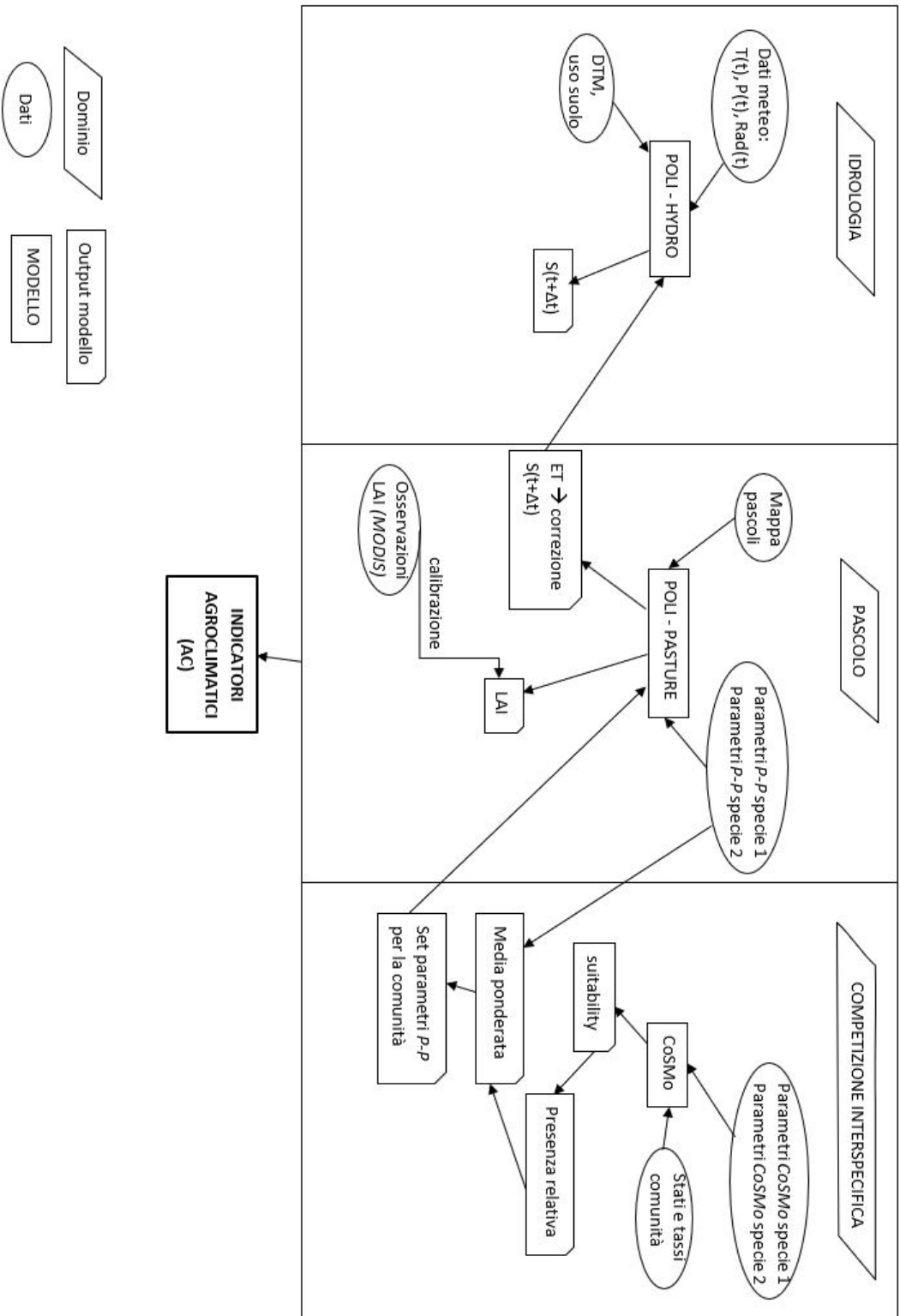


Figura 4.8: Diagramma del funzionamento dei modelli impiegati.

# Capitolo 5

## Calibrazione e validazione del Modello

In questo capitolo si riporta la procedura di calibrazione, eseguita al fine di convalidare il modello. Come variabile di riferimento per la calibrazione del modello ho usato l'indice *LAI*, facendo un confronto tra i valori simulati e quelli osservati. La fase di calibrazione è di sostanziale importanza in quanto corregge il modello in modo tale che sia più pertinente con la realtà e quindi più adatto per le proiezioni future. In aggiunta, in questa fase, alla stima viene associato un grado di accuratezza, grazie agli indici di distorsione.

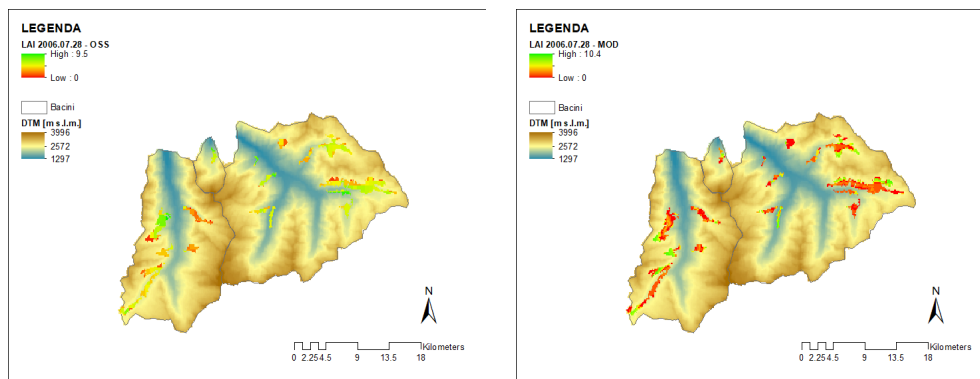


Figura 5.1: Confronto tra LAI osservato in data in data 2006.7.28 e LAI simulato per lo stesso giorno nelle aree pascolive secondo il modello Poly-Pasture.

I parametri impiegati dal modello  $P - P$  [Tabelle 4.5 e 4.6] per stimare l'indice *LAI* sono stati calibrati al fine di ottenere congruenza tra il *LAI* osservato e quello simulato.

## 5.1 Indici di calibrazione

La bontà della stima è quantificabile grazie parametri statistici come *Bias*, *NSE* e *RMSE*.

l'indice *Bias* è l'errore medio percentuale tra osservazione e modellazione. Tale errore non raggiunge quasi mai lo zero, ma l'importante è che si mantenga al di sotto di una soglia di tolleranza  $t\%$ .

$$Bias_{\%} = \frac{|\mu_{LAI_{mod}} - \mu_{LAI_{oss}}|}{\mu_{LAI_{oss}}} \cdot 100 \leq t_{\%} \quad (5.1)$$

Altro indicatore statistico è il *Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)*, il quale esprime il grado di varianza.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{oss}} (\epsilon^2)}{\sum_{i=1}^{n_{oss}} (LAI_{oss} - \mu_{LAI_{oss}})^2} \quad (5.2)$$

Con  $\mu$  e  $\epsilon$  si intendono media campionaria e errore di modellazione, rispettivamente, e  $n_{oss}$  è il numero di osservazioni.

Per un'ulteriore livello di accuratezza ci si accerta che anche l'errore quadratico medio *RMSE* sia tendente a zero. Il valore RMSE è una misura di errore assoluta in cui le deviazioni vengono elevate al quadrato per evitare che valori positivi e negativi possano annullarsi l'uno con l'altro.

$$RMSE = (LAI_{oss} - LAI_{mod})^2 \quad (5.3)$$

Per ogni cella della mappa del Parco, per ogni giorno dell'anno dal 2005 al 2019, è stato stimato l'indice LAI. Questa variabile è stata poi suddivisa in sottocategorie:

- LAI in aree pascolive, tra cui:
  - pascoli a bassa quota;
  - pascoli ad alta quota;
- LAI in altri terreni.

L'attenzione di questo lavoro è rivolta verso le aree pascolive, motivo per cui è stato analizzato e studiato il *LAI* solo in corrispondenza di queste zone.

<i>Bias</i> [%]	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>
-1.09	-1.98	4e-3

Tabella 5.1: Indici di distorsione statistica del LAI a bassa quota.

<i>Bias</i> [%]	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>
0.11	0.18	2e-5

Tabella 5.2: Indici di distorsione statistica del LAI ad alta quota.

<i>Bias</i> [%]	<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>
2.78	0.12	1.6e-2

Tabella 5.3: Indici di distorsione statistica del LAI complessivo.

Si facciano le opportune considerazioni sugli indicatori di distorsione statistici estratti.

- Il *NSE* dei LAI calcolato a bassa quota, Tabella 5.1, è minore di zero, e non maggiore come la teoria richiede. Si tratta comunque di un valore prossimo allo zero e la bontà degli altri indici di distorsione rende attendibile la stima della variabile LAI. Inoltre le celle di LAI a bassa quota sono di numero inferiore rispetto alla quantità delle celle ad alta quota, in proporzione sono il 5% di tutta l'area pascoliva (Figura 3.7). Per questo fatto, la stima del LAI a bassa quota è più sensibile alla variazione delle variabili di controllo (ovvero dei parametri di vegetazione).
- Gli indicatori riportati nelle tabelle 5.1, 5.2 e 5.3 si rifanno al valore LAI mediato per tutto periodo di osservazione (2005-2019), per fascia di quota, in presenza di pascoli, nella stagione di crescita. Durante la fase di calibrazione, il *Bias* e il *RMSE* sono stati calcolati per ogni stagione, si è quindi posta attenzione anche sui loro valori annuali, oltre che al risultato finale. Il procedimento di calibrazione si è considerato terminato quando la discrepanza modello/osservazione è minima non solo nei valori medi del periodo di osservazione, ma anche nei risultati annuali.
- Il modello  $P - P$  simula i valori di LAI in funzione dei parametri di vegetazione delle specie analizzate, che per semplicità di calcolo sono due per fascia di quota, mentre in realtà la vegetazione presente è assai più ricca. Condizioni climatiche che alterano la biomassa di una specie, possono non garantire lo stesso effetto nei confronti delle altre specie presenti. La calibrazione dei parametri delle quattro specie considerate dal modello viene eseguita anche per far sì che le proprietà siano il più rappresentative possibile, tali da descrivere il comportamento di tutta la comunità vegetale presente nei pascoli.

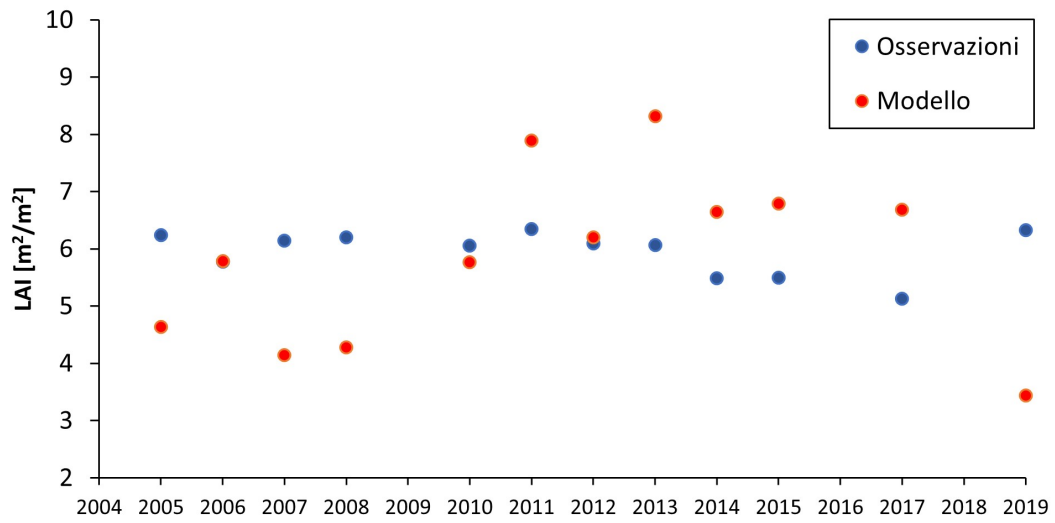


Figura 5.2: Confronto LAI tra modello e osservazione a BASSA QUOTA.

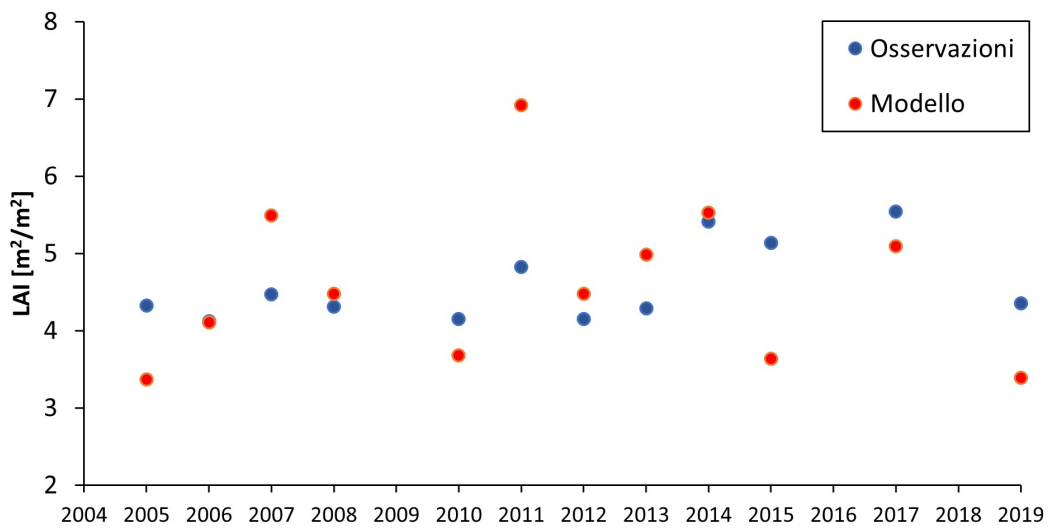


Figura 5.3: Confronto LAI tra modello e osservazione ad ALTA QUOTA.



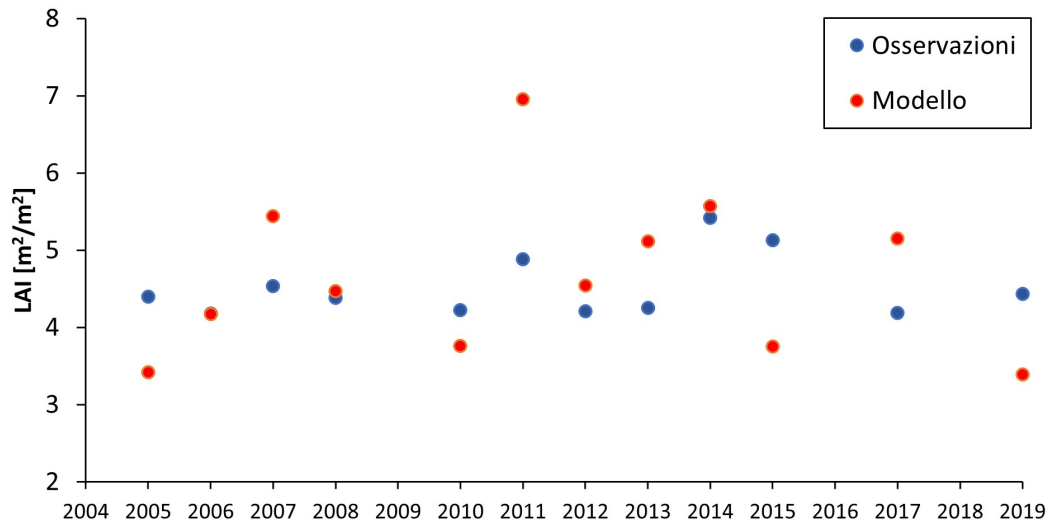


Figura 5.4: Confronto LAI tra modello e osservazione.

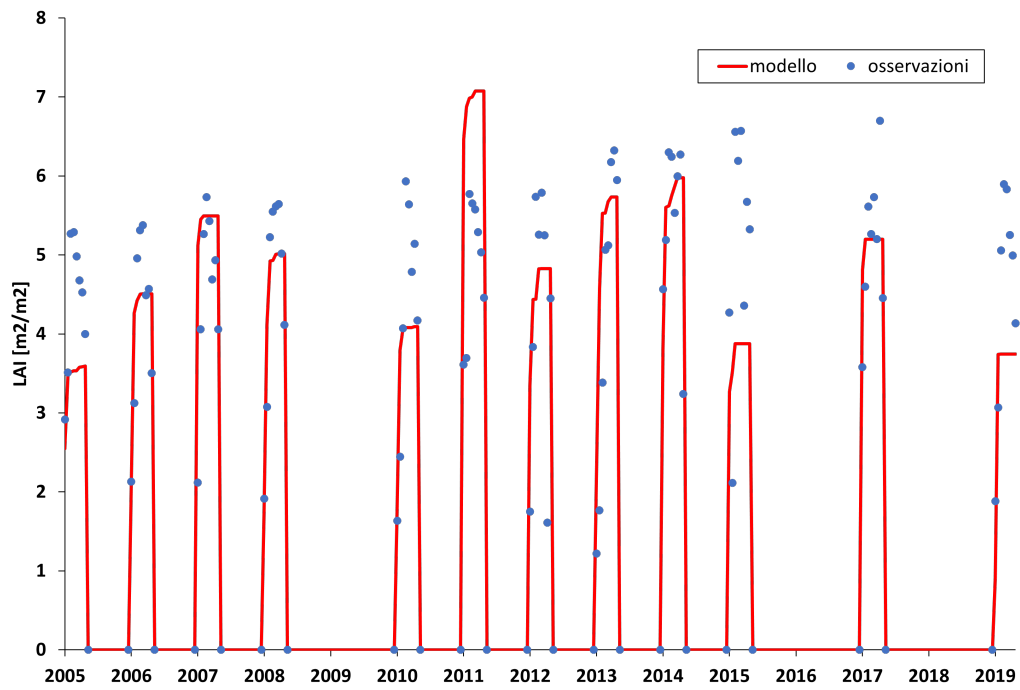


Figura 5.5: Confronto LAI giornaliero tra modello e osservazione.

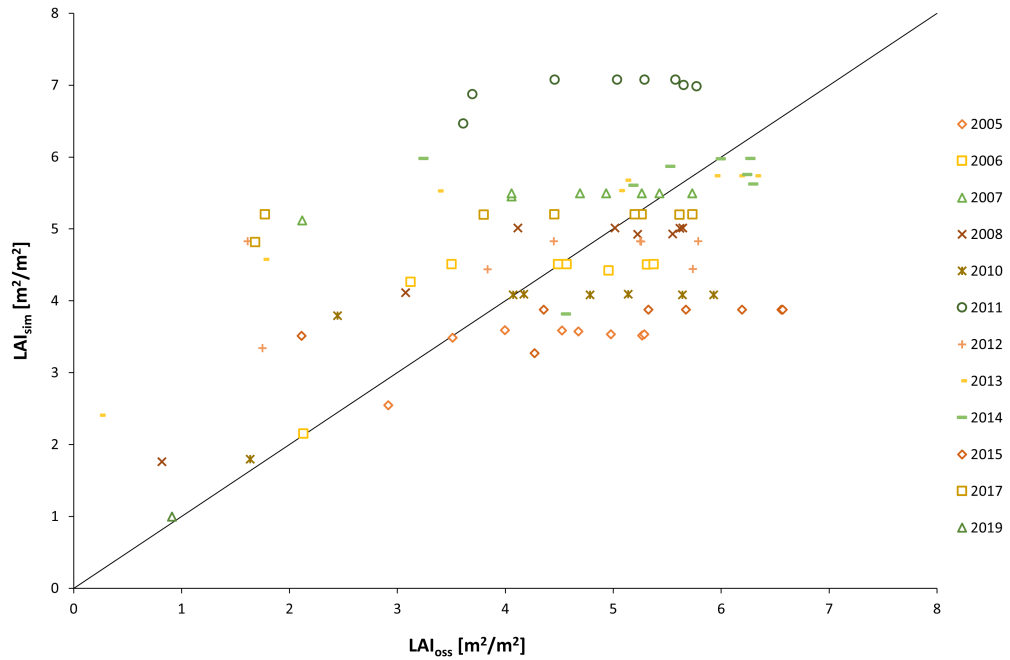


Figura 5.6: Scatter plot: LAI da satellite vs LAI da modello  $P - P$  durante la stagione di crescita (8 date per anno).

Anno	$LAI_{oss}$	$LAI_{mod}$
2005	6.24	4.65
2006	5.77	5.78
2007	6.14	4.15
2008	6.20	4.30
2010	6.05	5.76
2011	6.34	7.89
2012	6.10	6.20
2013	6.07	8.31
2014	5.48	6.64
2015	5.50	6.78
2017	5.13	6.68
2019	6.32	3.44
Media	5.94	5.89

Tabella 5.4: Confronto tra i valori di LAI osservati e simulati dal modello  $P - P$  a bassa quota.

Anno	$LAI_{oss}$	$LAI_{mod}$
2005	4.32	3.37
2006	4.12	4.10
2007	4.47	5.49
2008	4.32	4.47
2010	4.15	3.68
2011	4.83	6.91
2012	4.15	4.47
2013	4.29	4.98
2014	5.41	5.53
2015	5.13	3.64
2017	5.55	5.11
2019	4.36	3.39
Media	4.59	4.59

Tabella 5.5: Confronto tra i valori di LAI osservati e simulati dal modello  $P - P$  ad alta quota.

Anno	$LAI_{oss}$	$LAI_{mod}$
2005	4.39	4.42
2006	4.18	4.17
2007	4.53	5.44
2008	4.51	4.47
2010	4.22	3.77
2011	4.88	6.95
2012	4.21	4.54
2013	4.37	5.11
2014	5.41	5.57
2015	5.13	3.75
2017	5.14	5.15
2019	4.51	3.39
Media	4.63	4.64

Tabella 5.6: Confronto tra i valori di LAI osservati e simulati dal modello  $P - P$  complessivi.

## 5.2 Validazione LAI

Dal campionamento eseguito in data 15 Luglio 2019, ad Orvieille a quota 2300 metri, nel comune di Introd, si può confermare il valore di LAI ottenuto in media ad alta quota nella stagione del 2019.

2019	
$LAI_{oss,INTROD}$	$LAI_{mod}$
3.31	3.39

Tabella 5.7: Confronto tra il valore di LAI osservato ad Orvieille (2300 m s.l.m.) nel 2019 e il LAI simulato dal modello  $P - P$  nel 2019.

## 5.3 Validazione delle portate

Oltre alla calibrazione del modello colturale, è stata effettuata una validazione del modello idrologico. I parametri idrologici inerenti alla fusione nivo-glaciale nei ghiacciai del Gran Paradiso, sono stati calibrati nel 2019 in un elaborati di tesi del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale [3]. Tali parametri sono stati inseriti nel modello idrologico come input di primo tentativo. Successivamente i fattori termali e radiativi sono stati corretti tali da far convergere portate osservate (registrate nelle stazioni presenti) e portate simulate dal modello *Poli - Hydro*.

Gli indici di distorsione adottati sono il *Bias* e l' *NSE*, valutato mensilmente e giornalmente, le cui formule sono riportate nelle Equazioni 5.1 e 5.2

Stazione	$NSE_m$	$NSE_d$	$Bias[\%]$
Eaux Rousses	0.66	0.6	-18.62
Cogne Cretaz	0.63	0.53	-17.60

Tabella 5.8: Indici di distorsione delle portate valutati nel periodo 2005-2019.

# Capitolo 6

## Modelli climatici

L'umanità sta affrontando un periodo di cambiamenti epocali, senza precedenti. Lo sviluppo economico e l'incremento demografico sta riducendo le risorse terrestri allo stremo. Negli ultimi cinquant'anni la popolazione mondiale è più che raddoppiata e si prevede che nel 2040 supererà i nove miliardi. Gli indicatori economici crescono costantemente, ma disomogeneamente.

Oltre agli impatti locali, sia i paesi sviluppati sia quelli in via di sviluppo devono far fronte agli impatti che raggiungono la scala globale, dovuti principalmente all'aumento delle emissioni di gas serra. Questo aumento delle emissioni, e delle concentrazioni in atmosfera, ha dato origine a Cambiamenti Climatici Globali (GCC), come ormai dimostrato in modo inoppugnabile dalla comunità scientifica.

Gli effetti dei cambiamenti climatici globali sono già visibili nei sistemi naturali e antropici nel nostro pianeta, con grandi ricadute sulla salute umana, sulla sicurezza alimentare, biodiversità, economia, migrazioni, pericolosità naturale e disponibilità delle risorse idriche e terrene. I modelli climatici prevedono un ulteriore incremento delle temperature fino alla fine del secolo. Da qui, l'esigenza di mitigazione e adattamento ai GCC.

### 6.1 IPCC

L'IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change* è l'organismo delle Nazioni Unite che valuta la scienza relativa al cambiamento climatico. L'IPCC redige rapporti di valutazione completi, *Assessment Report*, sullo stato delle conoscenze scientifiche, tecniche e socio-economiche sul cambiamento climatico, i suoi impatti e i rischi futuri, e le opzioni per rallentare il tasso di tali cambiamenti. Prepara anche Rapporti Speciali su argomenti concordati dai suoi

governi membri, così come rapporti metodologici che forniscono linee guida per la preparazione di inventari di gas serra.

L'organizzazione si divide in tre gruppi di lavoro ed una task force.

- Il Working Group I esamina la scienza fisica alla base del cambiamento climatico passato, presente e futuro.
- Il Working Group II valuta la vulnerabilità dei sistemi socio-economici e naturali al cambiamento climatico, le sue conseguenze, sia positive che negative, e le opzioni di adattamento.
- Il Working Group III si concentra sulle mitigazioni al cambiamento climatico, ricercando metodi per ridurre le emissioni di gas e rimuovere i gas serra dall'atmosfera.
- La task force sugli inventari nazionali dei gas serra (TFI) sviluppa e ridefinisce metodologia e software concordati a livello internazionale per il calcolo e la comunicazione delle emissioni e degli assorbimenti nazionali di gas serra e incoraggia l'uso di questa metodologia da parte dei paesi partecipanti all'IPCC e dai firmatari della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC).

Attualmente, L'IPCC è al suo 6° Assessment Report. I modelli di circolazione globale utilizzati in questo elaborato appartengono tutti all'AR6 e sono redatti dal Working Group I.

## 6.2 Modelli di circolazione globale

Per investigare sulle variazioni del ciclo idrologico a causa dei cambiamenti climatici, vengono adottate le proiezioni dei modelli climatici. Questi modelli non forniscono una previsione deterministica del clima futuro, ma delle possibili condizioni climatiche, rappresentative e statisticamente basate, che possono verificarsi sotto specifiche ipotesi circa le concentrazioni di gas serra emessi. Si ricorda che, per proiezioni si intendono quelle predizioni a lungo termine, a differenza delle previsioni le quali si riferiscono al breve termine.

Un modello climatico è una versione semplificata del sistema terrestre che rappresenta ragionevolmente le interazioni fisiche e chimiche verificatesi in esso. I principali componenti del sistema terrestre sono simulati usando la parametrizzazione di esperimenti mirati. Esistono GCM che si occupano della circolazione atmosferica, *Atmospheric General Circulation Model (AGCM)*, e altri che riguardano mari e oceani, *Ocean General Circulation Model (OGCM)*.

Le due categorie di GCM, se accoppiate, generano un modello di circolazione accoppiato detto *Coupled GCM (CGCM)* o *Atmospheric-Oceanic GCM (AOGCM)*.

I modelli CGCM non devono specificare i flussi di interazione tra atmosfera e oceani. Tutti i corpi idrici scambiano energia con l'atmosfera. I GCM permettono, dunque, di descrivere tali processi di interazione che risultano essere di fondamentale importanza per descrivere l'intero sistema climatico. Le principali variabili riprodotte dai GCM sono la temperatura, la precipitazione, l'umidità dell'aria, la pressione atmosferica, la copertura nivale, l'umidità del suolo e l'irraggiamento solare.

Tuttavia, esistono processi non rappresentabili dai GCM. A tal proposito, si introducono gli *Earth System Model (ESM)*, modelli che combinano i GCM ad altri sistemi in grado di simulare fenomeni come il ciclo del carbonio, i processi chimici in atmosfera e negli oceani, l'uso del suolo, la dinamica della vegetazione e le variazioni dell'albedo superficiale. L'obiettivo degli ESM è quello di valutare le dinamiche dei cambiamenti climatici all'interno del sistema terrestre, occupandosi non solo delle componenti (atmosfera, criosfera e biosfera) considerate singolarmente, ma anche nelle loro interazioni tra di esse.

Le tipologie di modello di circolazione differiscono per variabili considerate, condizioni e ipotesi di partenza alla base delle legge fisiche applicate. La scelta di un modello è determinata dallo scopo. Non conoscendo a priori quali tra le ipotesi adottate siano le più rappresentative dei futuri eventi climatici, è opportuno scegliere di considerare diversi modelli per confrontarne i risultati ottenuti ed avere una visione di insieme dei possibili cambiamenti.

## 6.3 Limitazioni dei modelli

In genere i modelli climatici lavorano su larga scala, hanno risoluzione maggiore di 100 km, e infatti forniscono congetture climatiche che sono accettabili a scala globale, ma non considerano le variabilità locali. I processi atmosferici sono caratterizzati da un'alta variabilità intrinseca, che i modelli di circolazione globale non considerano, poiché la loro risoluzione è più approssimativa. Ciò porta ad imprecisioni nei valori simulati dai modelli. Pertanto, è necessario un adattamento locale, chiamato *downscaling* [38, 39], statistico, deterministico e dinamico, al fine di garantire miglior rappresentazione delle grandezze climatiche prese in considerazione. Un'altra limitazione dei GCM è legata all'incapacità di riprodurre fenomeni atmosferici come le nuvole, la forzante solare e la forzante vulcanica.

## 6.4 Modelli considerati

Nel caso in studio sono stati adoperati sei modelli climatici: CESM2, CMCC, EC-EARTH3, HADGEM3, MIROC6 e MPI-ESM, tutti derivanti dal sesto rapporto (AR6) dell'IPCC.

Nella Tabella 6.1 sono elencati i modelli considerati con le loro caratteristiche.

### 6.4.1 Modello CESM2

Il sistema CESM2, *Community Earth System Model Veersion 2*, è un modello open-source sviluppato da ricercatori e studenti del National Center for Atmospheric Research, che consiste in modelli accoppiati di oceano, atmosfera, terreni, terre e mari ghiacciati, fiumi ed onde, scambiando flussi tra loro [40]. Il presente modello è prodotto dal NCAR, è formato da diverse componenti che simulano i fenomeni riguardanti l'atmosfera, le terre emerse, gli oceani e il ghiaccio terrestre e marino:

- CAM6 - per la parte relativa all'atmosfera;
- CLM5 - per la parte delle terre emerse;
- POP2 - relativa ai fenomeni negli oceani;
- CICE5.1 - per la parte inerente al ghiaccio marino;
- CISM2.1 - per la parte del ghiaccio terrestre.

Le interazioni tra le componenti del modello avvengono grazie ad uno specifico accoppiatore. La risoluzione utilizzata è di  $1.25^\circ \times 0.9^\circ$  con 31 livelli in verticale per la parte atmosferica e 60 livelli per la parte oceanica, per una griglia di  $320 \times 384$ .

### 6.4.2 Modello CMCC

Il modello CMCC, *Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici Climate Model*, nel quale ha recentemente preso parte anche il Politecnico di Milano, si basa sulle componenti atmosferiche, terrestri e del ghiaccio marino del modello comunitario del sistema terrestre accoppiato con il modello oceanico globale Nucleus for European Modeling of the Ocean. La versione impiegata in questo caso studio è la CMCC-CM2, la nuova famiglia dei modelli climatici accoppiati globali sviluppati e utilizzati al CMCC [41].

Le parti del modello sono:



- CAM5 - per la componente atmosferica;
- NEMO - per la circolazione generale degli oceani;
- CICE4 - per le componenti glaciali di mari e oceani;
- CLM - per i processi della superficie terrestre.

La configurazione standard del CMCC-CM2, cioè il CMCC-CM2-SR5, utilizza griglie di risoluzione orizzontale di circa  $1^\circ$  per tutti i componenti del sistema. Per la componente atmosferica, è usata una griglia regolare di  $0.9^\circ \times 1.25^\circ$  e 30 livelli verticali. Per la componente oceanica si sono impiegati 56 livelli geopotenziali.

### 6.4.3 Modello EC-EARTH3

Il modello EC-EARTH3 rappresenta la versione più aggiornata del modello EC-EARTH, l'ESM sviluppato dal consorzio europeo prendendone lo stesso nome [42]. Le metriche chiave di performance di EC-Earth3 dimostrano come esso sia adatto per i più recenti modelli CMIP6 [43]. Del consorzio fanno parte gli istituti di ricerca meteorologici e università, tra i quali il KNMI, l'SMHI, il MetEireann, il DMI, il Meteorologisk Institutt e l'ETH Zurich. Il modello è costituito da tre componenti principali, già applicate nel modello originario, ma nei loro ultimi aggiornamenti:

- IFS cy36r4 - per la simulazione relativa alla parte dell'atmosfera e delle terre emerse;
- NEMO 3.6 - per la parte relativa agli oceani;
- LIM3 - per la parte del mare e del ghiaccio.

Le componenti sono combinate attraverso l'accoppiatore OASIS3-MCT. L'EC-EARTH3 può avere diverse risoluzioni: quella standard della parte atmosferica è  $0.75^\circ$  in orizzontale e 91 livelli in verticale, mentre la parte oceanica del modello utilizza una risoluzione di 75 livelli in verticale.

### 6.4.4 Modello HadGEM3

Il modello HadGEM3 GC3.1 è la più recente versione del Global Coupled (GC) Met Office Unified Model (UM) [44]. Differisce dalla versione precedente, usata nel CMIP5, per l'inclusione della nuova configurazione GC 3.1, con i componenti aggiornati:

Modello	Centro di ricerca	Nazione	Dimensione cella	Strati
CESM2	National Center for Atmospheric Research	USA	1.25° x 0.9°	32
CMCC	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	IT	1°x1°	30
EC-EARTH3	Europe-wide Consortium	EU	0.75° x 0.75°	91
HADGEM3	Met Office Headley Center	UK	0.25°x0.25°	85
MIROC6	Ineterdisciplinary Research Climate	JP	1°x1°	62
MPI-ESM	Max Planck Institute for Meteorology	DE	1.875° x 1.875°	47

Tabella 6.1: GCM considerati.

- GA7.0 - Global Atmosphere 7.0;
- GL7.0 - Global Land 7.0;
- GO6.0 - Global Ocean 6.0;
- GSI8.0 - Global Sea Ice 8.0;

La configurazione GC3.1 funziona con 85 livelli di atmosfera, 4 livelli di suolo e 75 livelli di oceano.

Il modello HadGEM3, impiegato dal CMIP6, ha due risoluzioni orizzontali:

- N96 - risoluzione bassa. Risoluzione atmosferica 1.875°x1.25° e risoluzione oceanica 1°x1°;
- N216 - risoluzione intermedia. Risoluzione atmosferica di 0.83°x0.56° e risoluzione oceanica 0.25°x0.25°.

### 6.4.5 Modello MIROC6

Il modello climatico MIROC6, *Model for Interdisciplinary Research on Climate version 6* è un modello climatico accoppiato, che contribuisce al progetto CMIP6 [45]. MIROC6 è inizializzato ogni anno per il periodo 1960-2018, assimilando le temperature osservate degli oceani e le anomalie nella salinità e campi di concentrazione di ghiaccio nei mari e prescrivendo gli stati iniziali dell'atmosfera dai dati di rianalisi.

È strutturato in 81 livelli verticali. Le componenti di atmosfera e superficie terrestre hanno una risoluzione orizzontale di un troncamento spettrale T85. Un importante aggiornamento in MIROC6 è l'incorporazione di una parametrizzazione convettiva poco profonda, che è uno schema di flusso di massa basato su un modello a flusso singolo di Park e Bretherton.

MIROC6 ha anche diversi aggiornamenti nei suoi sotto-componenti. Questi includono una parametrizzazione delle onde gravitazionali non orografiche; il trattamento dell'aerosol organico secondario e degli aerosol di origine oceanica; un'estensione del limite superiore del raggio di modo delle proprietà delle nuvole nella componente atmosferica; parametrizzazioni basate fisicamente per la distribuzione della neve; migliore miscelazione turbolenta vicino alla superficie sotto il ghiaccio marino nella componente oceanica. Il modello è basato su un sistema di coordinate tripolari con una risoluzione nominale di  $1^\circ$  e risoluzione oceanica a 62 livelli.

#### 6.4.6 Modello MPI-ESM

LA versione utilizzata del modello MPI-ESM è la 1.2. MIP-ESM1.2 è l'ESM sviluppato dall'Istituto di Meteorologia Max Planck di Amburgo, in Germania [46]. Il MPI-ESM1.2 è formato da quattro componenti:

- ECHAM6.3 per lo studio della parte atmosferica;
- MPIOM per l'analisi degli oceani;
- JSBach per la biosfera terrestre;
- HAMOCC per la bio-geo-chimica degli oceani.

Queste componenti comunicano tra loro attraverso l'accoppiatore OASIS3. Tale modello descrive l'interazione tra il sistema atmosferico e quello oceanico e terrestre tramite lo scambio di energia, di forze, di acqua e gas, quali l'anidride carbonica. Tra le caratteristiche principali introdotte nelle ultime versioni, si riscontrano: la presenza di un ciclo del carbonio accoppiato, la rappresentazione dell'albedo superficiale, degli aerosol e dell'incremento degli scambi di radiazioni ad onda corta. La simulazione del ciclo del carbonio permette inoltre lo studio degli effetti dei cambiamenti climatici sul ciclo stesso. Si utilizzano due griglie, una ad alta ed una a bassa risoluzione. La prima ha una risoluzione di  $1.875^\circ \times 1.875^\circ$  in orizzontale, per un totale di 192 valori di longitudine e 96 valori di latitudine, con una suddivisione verticale in 47 livelli, mentre la seconda è pari a circa  $0.95^\circ \times 0.95^\circ$  in orizzontale con una suddivisione verticale in 95 livelli.

## 6.5 CMIP6

CMIP, *Coupled Model Incorporated Project*, è un progetto del gruppo di lavoro della modellazione accoppiata (WGCM-Working Group of Coupled Modelling) del World Climate Research Programme (WCRP). Dalla sua prima pubblicazione, ha coordinato esperimenti di modelli climatici coinvolgendo più team internazionali di modellazione in tutto il mondo. Il CMIP ha portato a una migliore comprensione del cambiamento e della variabilità del clima passato, presente e futuro in un quadro multi-modello. Il CMIP è evoluto in diverse fasi, al momento è pianificazione la fase 6 (CMIP6).

Gli scenari che descrivono possibili futuri sviluppi delle azioni umane responsabili del cambiamento climatico (come emissioni di gas serra, gas chimici, aerosol e sfruttamento del suolo) consistenti con gli sviluppi socioeconomici svolgono un ruolo importante nella ricerca sul clima. Essi permettono una valutazione dei possibili cambiamenti nel sistema climatico, degli impatti sulla società ed ecosistemi, e l'efficienza delle opzioni di risposta, quali adattamento e mitigazione rispetto ad una gamma estesa di risultati futuri [47, 48].

Il CMIP6 provvederà proiezioni basate su multipli modelli climatici fondati su scenari alternativi che sono direttamente rilevanti per le preoccupazioni sociali riguardanti la mitigazione del cambiamento climatico, l'adattamento o gli impatti.

Queste proiezioni sono guidate da nuovi scenari di emissioni e di uso del suolo, prodotti con Modelli Integrati di Assessment (IAM) basati sui nuovi futuri scenari sociali, gli *Shared Socio-economic Pathways (SSP)*, e sui corrispondenti scenari di emissioni di gas serra, uso del suolo e inquinamento, cioè i *Representative Concentration Pathways (RCP)*. Gli RCP e SSP impiegati nel CMIP6, derivano dall'AR6. Le proiezioni CMIP6 differiscono dalle versioni precedenti, non solo perché sono il risultato di una versione aggiornata dei modelli climatici, ma anche perché sono generati con gli scenari di SSP, prodotti con l'ultima versione degli IAM e basati sui più recenti trend di emissioni.

### 6.5.1 Representative Concentration Pathways

Gli scenari rappresentativi di concentrazione dipendono dalla forzante radiativa proiettata per l'anno 2100. Si identificano quattro RCP diversi da usare in ingresso ai modelli climatici. La forzante radiativa, espressa come la somma delle emissioni umane di gas serra in  $W/m^2$ , individua i seguenti scenari:

- RCP 2.6 - scenario dai livelli radiativi molto bassi, che corrisponde ad una forzante radiativa di  $+2.6W/m^2$ , cioè di circa 490 ppm di  $CO_{2,eq}$ ;

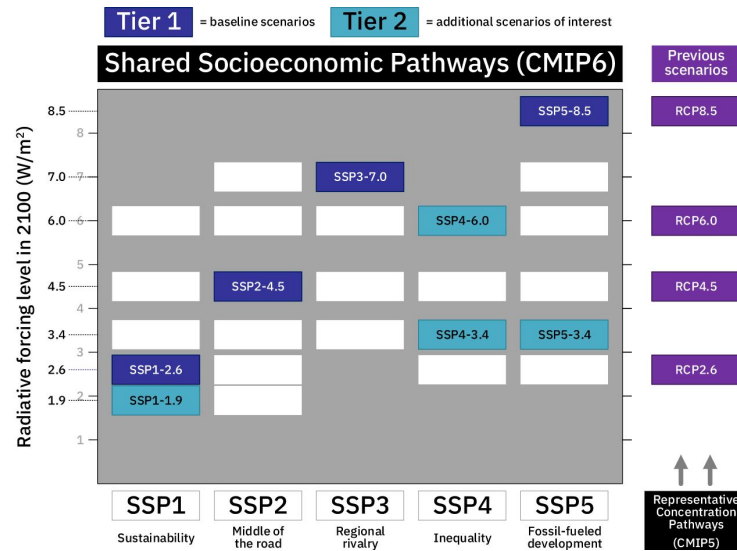


Figura 6.1: Schema CMIP6.

- RCP 4.5 - primo scenario intermedio, che corrisponde ad una forzante radiativa di  $+4.5W/m^2$ , cioè di circa 650 ppm di  $CO_{2,eq}$ ;
- RCP 7.0 - secondo scenario intermedio, che corrisponde ad una forzante radiativa di  $+7W/m^2$ , cioè di circa 1100 ppm di  $CO_{2,eq}$ ;
- RCP 8.5 - scenario di livelli radiativi alti, che corrisponde ad una forzante radiativa di  $+8.5W/m^2$ , cioè di circa 1370 ppm di  $CO_{2,eq}$ .

Gli scenari RCP, disponibili dal quinto rapporto sul clima del pianeta dell'I-PCC, possono realizzarsi con scenari economici e sviluppi tecnologici diversi.

### 6.5.2 Shared Socio-Economic Pathways

Gli SSP sono stati sviluppati per integrare gli RCP e sono basati su cinque "narrazioni" che descrivono futuri alternativi socio-economici. Rappresentano diverse evoluzioni della società futura considerando investimenti in educazione, sanità e sviluppo energetico [49].

- SSP1 - sviluppo sostenibile. Il mondo assiste ad una crescita sostenibile, fondata sul rispetto dell'ambiente;
- SSP2 - scenario a sviluppo intermedio. I trend sociali, economici e tecnologici proseguono con lo stesso andamento che hanno avuto fino ad ora;

- SSP3 - rivalità regionale. I vari Paesi sono incentrati su essi stessi, assicurandosi di essere competitivi e sicuri, ma ignorando il raggiungimento di uno sviluppo collettivo e non affrontando le questioni ambientali. Questo scenario può comportare una forte degradazione in alcune regioni;
- SSP4 - sviluppo con forti disuguaglianze. Le disparità sociali si accentuano sia internamente che esternamente i confini dei Paesi. Si fanno investimenti sia su risorse non rinnovabili che su risorse energetiche a basso impatto ambientale. Le politiche ambientali vengono applicate solo nelle zone a medio-alto reddito;
- SSP5 - sviluppo con tanti combustibili fossili. L'evoluzione umana è ottimistica, ma l'economia è basata principalmente sul fossile, conducendo dunque a problemi ambientali locali.

Gli SSP rappresentano dei possibili scenari futuri, senza applicare nuove politiche climatiche rispetto alle vigenti. Per analizzare in che modo gli eventuali sforzi di mitigazione del clima caratterizzino il futuro descritto dagli SSP, sono state fatte delle assunzioni. Le ipotesi riguardano la velocità di intervento della collaborazione internazionale, al fine di produrre politiche sul clima, nel rispetto dei limiti delle ipotesi di crescita demografica, economica e tecnologica in ogni scenario.

### 6.5.3 Scenario MIP per CMIP6

Qui sotto, viene elencata la descrizione di ogni scenario e spiegata la logica che giustifica l'accoppiamento scenario socio-economico con scenario radiativo. Nelle Figure 6.2 e 6.3 sono riportati gli andamenti di emissioni ed uso del suolo associati ad ogni scenario, le concentrazioni atmosferiche e le temperature medie risultate dal modello climatico.

#### SSP1-2.6

Questo scenario è il più ottimistico tra gli IAM presenti in letteratura ed aggiorna gli scenari RCP2.6. L'applicazione di questo scenario ai modelli climatici esistenti produce incrementi di temperatura nel 2100 sempre inferiori ai  $+2^{\circ}\text{C}$  e per questo motivo può supportare le analisi volte a questo obiettivo. È stata scelta la combinazione con SSP1 poiché ha un cambiamento sostanziale nell'uso del suolo. Secondo SSP1-2.6, si stimano pochi cambiamenti del suolo ed elevati sforzi per la mitigazione. Tra gli IAM, questo scenario è fortemente rilevante in quanto combina bassa vulnerabilità con pochi sforzi per la mitigazione così come un basso segnale di forzatura.

**SSP2-4.5**

Lo scenario in questione è l'aggiornamento del RCP4.5. In combinazione con RCP4.5 stato scelto SSP2 poiché i suoi scenari di uso del suolo e aerosol non sono tra le proiezioni più estreme. Questo IAM combina una vulnerabilità sociale intermedia con un livello intermedio di forze radiative.

**SSP3-7.0**

Questo scenario è medio-alto. Si è scelta un'accoppiamento dello scenario sociale SSP3 e quello delle forzanti RCP7.0 perché tale combinazione ha sia un cambiamento sostanziale nell'uso del suolo e alte emissioni di NTCTF (soprattutto di SO<sub>2</sub>). Lo scenario in questione combina una vulnerabilità sociale relativamente alta (SSP3), con una forzante radiativa relativamente elevata (RCP7.0).

**SSP5-8.5**

Questo è lo scenario più estremo tra gli IAM presenti in letteratura. Si è scelto di abbinare al RCP8.5 lo scenario SSP5, poiché è l'unico scenario sociale esistente che possa giustificare un incremento di forze radiative di  $+8.5W/m^2$  nel 2100.

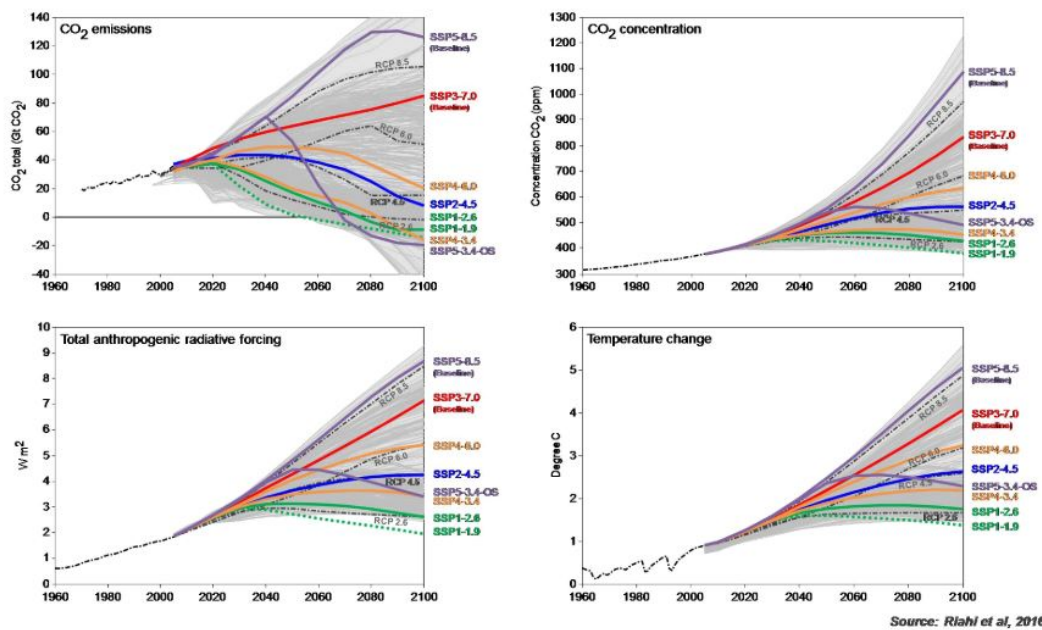


Figura 6.2: Emissioni e concentrazioni di CO<sub>2</sub>, forze radiative antropogeniche e temperatura media globale nel 21° secolo secondo il CMIP6 [50].



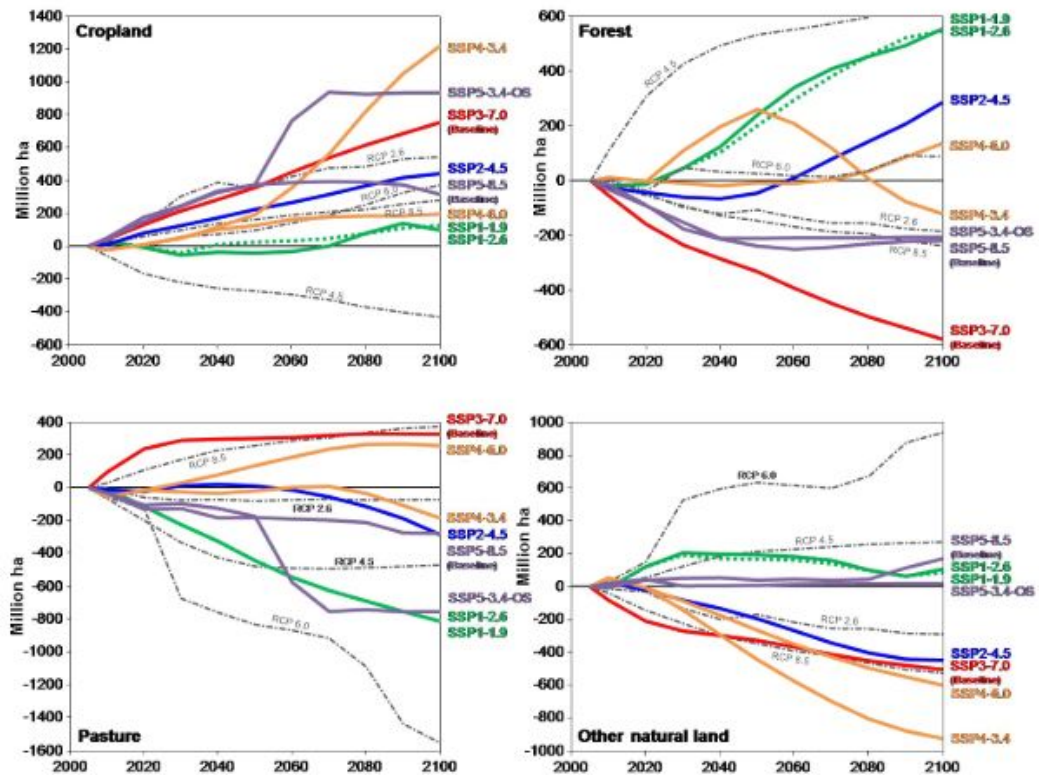


Figura 6.3: Cambiamenti in terreni coltivati, foreste, pascoli ed altri terreni naturali nel 21° secolo secondo gli IAM raffigurati in Fig. 6.2. Per il confronto è mostrato il cambiamento di uso del suolo per gli RCP [51].



# Capitolo 7

## Downscaling modelli GCM

I dati dei modelli di circolazione globale, alla loro scala naturale, non sono applicabili al modello idrologico, in quanto quest'ultimo presenta una risoluzione spaziale minore. Come anticipato nel Paragrafo 6.3, il processo che consente la trasformazione dalla scala grossolana dei GCM ad una scala più definita è detto *downscaling* [38, 39]. Delle tipologie di downscaling esistenti, si applica la procedura statistica. Il procedimento di downscaling statistico viene applicato sulle serie osservate di precipitazione e temperatura, registrati giornalmente nelle stazioni meteo (vedi Tabella 3.1), tra Valsavarenche e la Val di Cogne.

I passaggi eseguiti sono:

- stima degli errori nelle serie prodotte dai GCM sui valori cumulati di pioggia (P), temperatura media (T) e sul numero di giorni di pioggia mensili (Rainfall Day, RD) nel periodo di controllo 2005-2019 rispetto alla serie di valori corrispettivi osservati;
- correzione degli errori per tutte le stazioni considerate, al fine di eguagliare statisticamente, il più possibile, osservazioni e simulazioni durante il periodo di controllo;
- utilizzo dei parametri statistici calcolati nel passaggio precedente per stimare le correzioni da applicare alle serie future per i sei modelli dell'AR6 con i rispettivi scenari (SSP1 2.6, SSP2 4.5, SSP3 7.0 e SSP5 8.5), ottenendo 24 serie, per ogni stazione, a scala giornaliera, di pioggia e temperatura fino al 2100.

### 7.1 Downscaling

Specialmente nei bacini alpini, dove i contributi glaciali e nivali sono molto rilevanti nel bilancio idrologico e vi è alta variabilità topografica, la procedu-

ra di downscaling è fondamentale, al fine di rappresentare adeguatamente la variabilità spaziale della precipitazione e della temperatura.

In letteratura esistono diversi metodi di simulazione della pioggia, in grado di riprodurre l'auto-somiglianza e la discontinuità nello spazio e nel tempo. In questo elaborato si ricorre ad un algoritmo basato sulla teoria delle cascate casuali, su cui è imperniato il processo di downscaling, calibrato sulle serie di precipitazioni osservate.

La disaggregazione spaziale per ogni singola stazione avviene correggendo i bias mensili, relativi ai valori cumulati di precipitazione e all'intermittenza. Tale processo viene ripetuto per ogni stazione. I *bias* calcolati sono:

- $Bias_P$  - bias della precipitazione. Calcola il rapporto tra la precipitazione osservata e quella simulata dai GCM;
- $Bias_T$  - bias della temperatura. Rappresenta la differenza tra la temperatura osservata e simulata dai GCM;
- $Bias_{RD}$  - bias dei giorni di pioggia mensili. È il rapporto tra il numero di giorni di pioggia osservati e il numero di giorni piovosi nelle serie simulate dai GCM.

I *Bias* possono essere rappresentati come differenza o rapporto tra osservazione e simulazione. Se  $Bias_P$  e  $Bias_{RD}$  sono inferiori di 1 e  $Bias_T$  minore di 0, significa che il modello sovrastima la realtà. I valori di Bias ottenuti per ogni singola stazione vengono utilizzati per correggere le serie di precipitazione e temperatura simulate per il periodo di controllo. Si è ridotta la procedura di disaggregazione dei risultati dei GCM alla correzione del bias giornaliero, definito  $Bias_G$ .

### Downscaling della precipitazione

Il downscaling della precipitazione si effettua prima calcolando i valori di precipitazione cumulati mensili osservati  $R_{oss}$ , poi correggendoli rispetto ai modelli climatici  $R_{GCM}$ , attraverso una moltiplicazione con parametri stocastici, i quali tengono in considerazione l'intermittenza della precipitazione.

$$Bias_G = \frac{R_{oss}}{R_{GCM}} = B_G \cdot B_0 \cdot W_0 \quad (7.1)$$

Con  $W_0$  e  $B_0$  definiti come:

$$\begin{cases} Prob(B_0 = 0) = 1 - p_0 \\ Prob(B_0 = p_0^{-1}) = p_0 \\ E[B_0] = p_0^{-1} \cdot p_0 + 0 \cdot (1 - p_0) = 1 \end{cases} \quad (7.2)$$

$$\begin{cases} W_0 = \exp[w_0] - \sigma_{w_0}^2/2 \\ E[W_0] = 1 \end{cases} \quad (7.3)$$

dove  $B_G$ ,  $p_0$  e  $\sigma_{w_0}^2$  sono i parametri del modello. Precisamente:

- $B_G$  è una costante che impone l'uguaglianza della media mensile dei valori osservati con  $R_{GCM}$ ;
- $B_0$  è il generatore di tipo  $\beta$ , rappresentante della probabilità che il tasso di pioggia  $R_G$ , per un certo giorno, sia positivo, condizionato al valore di  $R_{GCM}$  positivo, modellato tramite una distribuzione binomiale;
- $W_0$  è un generatore di numeri casuali positivi, conferisce un carattere di aleatorietà alla precipitazione.

La procedura sopra descritta è applicata per tutti i modelli e i rispettivi scenari.

### Downscaling della temperatura

Per la correzione della temperatura, si utilizzano i dati giornalieri di temperatura forniti dai modelli GCM,  $T_{GCM}$ . Questi dati vengono confrontati con i valori di temperatura osservati nelle relative stazioni considerate, per il periodo preso in considerazione. Infine si valuta la differenza media per ogni mese  $i$  tra i valori osservati e quelli simulati dai GCM,  $\Delta T_i$ . Le temperature corrette giornaliere sono quindi pari a:

$$T_{corr,d} = T_{GCM,d} - \Delta T_i \quad (7.4)$$

Dove  $T_{corr,d}$  è la temperatura corretta per il giorno  $d$ , relativo al mese  $i$  e  $T_{GCM,d}$  è la temperatura fornita dal GCM per il giorno  $d$ . Completata l'operazione, si hanno dunque a disposizione serie giornaliere di precipitazione e di temperatura, per i modelli GCM, che risultano essere statisticamente simili, a scala mensile, alle serie osservate per le stazioni prese in considerazione.



# Capitolo 8

## Indicatori Agro-climatici

Per dare una misura all’impoverimento dei servizi ecosistemici nel tempo, vengono adottati i cosiddetti *indicatori Agro-Climatici (ACi)*. Si tratta di metriche, costruite ad hoc, adatte per fare un’analisi di sensibilità rispetto agli effetti dei cambiamenti climatici. In questo paragrafo saranno introdotti gli indicatori Agro-Climatici scelti per questo studio, i quali verranno prima calcolati rispetto al periodo corrente (2005-2019), per confrontarli successivamente coi decenni 2041-2050 e 2091-2100, secondo gli scenari dei GCM.

Nel concreto, un portatore di interesse nella gestione dei territori naturali, potrebbe chiedersi quali siano gli impatti dei cambiamenti climatici sui propri terreni, per poi adottare le opportune strategie di mitigazione. I meri dati idrologici, non rispondono a pieno a tale quesito e non sono direttamente interpretabili. A tal proposito, si calcolano gli Indicatori Agro-Climatici, per fornire uno strumento a supporto delle decisioni circa la gestione territoriale e i servizi ecosistemici forniti[52].

Tra gli scopi degli indicatori Agro-Climatici rientrano la valutazione delle condizioni ambientali, il monitoraggio di tali condizioni nel tempo, la segnalazione di un riscaldamento precoce dell’ambiente e le diagnosi dei problemi ambientali. Nessun indicatore può raggruppare tutte queste caratteristiche, quindi vengono adottati diversi indicatori AC, ognuno associato ai sistemi ecologici di interesse [53]. Gli indicatori AC derivano da:

- dati climatici;
- produttività dei pascoli;
- disponibilità ed uso della risorsa idrica.

Sono state scelte 8 categorie di indicatori, inerenti a diversi fattori, per dare una visione di insieme delle dinamiche delle specie pascolive. Tra i fattori

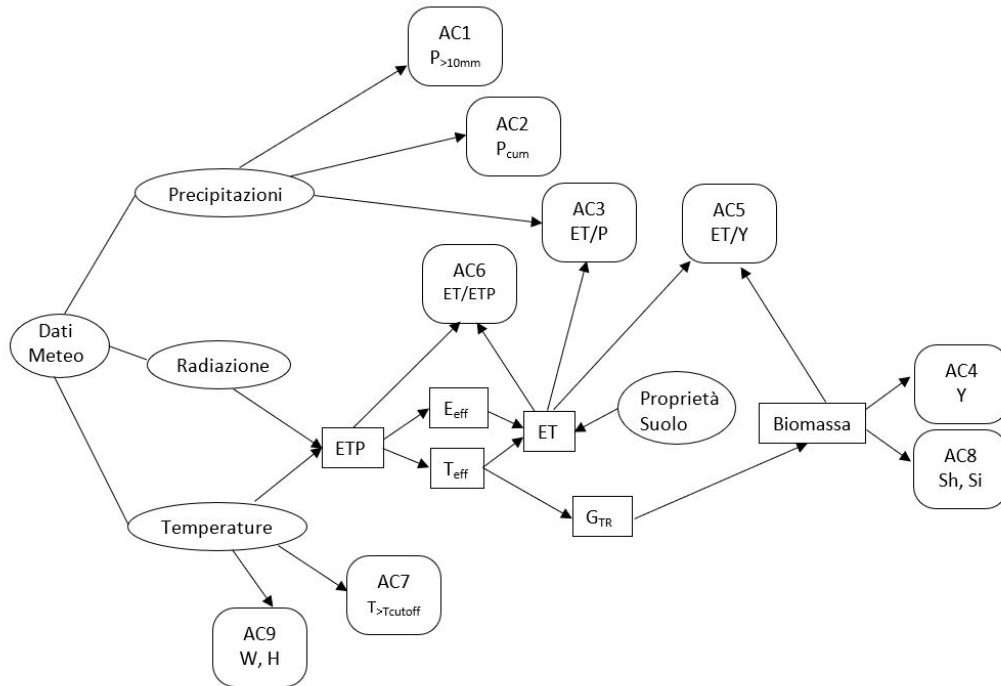


Figura 8.1: Diagramma di flusso della metodologia di calcolo degli indicatori Agro-Climatici a partire da *Poli – Hydro* (idrologia) e da *Poly – Pasture* (crescita biomassa).

in analisi vi sono temperature massime e critiche, precipitazioni cumulate e intense, produttività, aridità ed evapotraspirazione.

Tutti gli indici nel seguente elenco sono stati valutati durante la stagione di crescita colturale (ovvero nel periodo 30 Aprile - 30 Settembre) e per fascia di quota. Per ogni giornata del periodo analizzato, i parametri sono stati mediati spazialmente a bassa e ad alta quota. Si è ottenuto così un valore unico per giorno e per altitudine. Alcuni indicatori come *AC1* o *AC2* derivano dalla somma degli indicatori calcolati giornalmente, altri invece sono stati mediati per tutta la stagione o altri ancora, come *AC4* sono stati valutati in uno specifico giorno dell'anno. In Tabella 8.1 è presente l'elenco degli indicatori utilizzati e nelle Tabelle 8.2-8.10 sono presenti i risultati degli ACi ottenuti nel periodo di osservazione 2005-2019.

### ***AC1 - Precipitazione intensa***

Il primo indicatore agro-climatico consiste nella somma dei giorni nei quali la precipitazione media giornaliera di tutta l'area interessata, risulta essere



Indicatore	Unità di misura	Significato
AC1	<i>conta</i>	giorni in cui $P > 10mm$
AC2	[ <i>mm</i> ]	$P_{cum}$
AC3	[ <i>mm/mm</i> ]	$ET/P$
AC4	[ <i>tonha<sup>-1</sup></i> ]	$Y$
AC5	[ <i>mm/(tonha<sup>-1</sup>)</i> ]	$ET/Y$
AC6	[ <i>mm/mm</i> ]	$ET/ETP$
AC7	<i>conta</i>	giorni in cui $T > c \cdot T_{cutoff}$
AC8	[.]	indici di <i>biodiversita'</i>
AC9	[.]	indici <i>agrometeorologici</i>

Tabella 8.1: Elenco indicatori Agro-Climatici.

maggiore di 10 mm. Superata la soglia di 10 mm di altezza di precipitazione, l'evento piovoso viene considerato come precipitazione intensa.

### **AC2 - *Precipitazione cumulata***

AC2[*mm*] è la somma delle precipitazioni giornaliere, mediate nello spazio, durante la stagione.

### **AC3 - *ET/P***

L'indicatore AC3[*mm/mm*] esprime il rapporto tra l'evapotraspirazione effettiva in corrispondenza di aree pascolive, quindi valutata con la formula di Priestley e Taylor [29, 30], e la precipitazione. Sono stati considerati i valori di evapotraspirazione e di precipitazione cumulate durante la stagione. Questa metrica fornisce indicazioni sulla quantità di pioggia, in proporzione, sfruttata dalle piante per l'evapotraspirazione. In questo studio, l'indicatore si aggira attorno 0.3 - 0.4, ciò indica che il 30-40% della pioggia è "evapotraspirata". Adottando il concetto di impronta idrica verde [54], ovvero il consumo d'acqua immagazzinata al suolo come risultato di precipitazione, se l'indicatore è maggiore di 1, l'impronta idrica verde è costituita dalla precipitazione, se è minore di 1, è uguale alla evapotraspirazione effettiva [33].

### **AC4 - *Produttività***

AC4 [*tonha<sup>-1</sup>*] indica la produttività media della coltura erbacea raggiunta a fine stagione. Il modello *Poly-Pasture* simula il valore di produttività, in ogni cella del dominio ogni giorno, a partire dalla crescita di biomassa  $G[kgm^{-2}day^{-1}]$  (Equazioni 4.23 e 4.22).

### AC5 - $ET/Y$

$AC5$  [ $mm/(tonha^{-1})$ ] esprime il rapporto tra l'evapotraspirazione effettiva e la produttività media della stagione di crescita. L'impronta idrica specifica ( $AC8$ ) indica quanta acqua è necessaria per produrre una tonnellata di biomassa da raccogliere, quindi produttività [16].

### AC6 - $ET/ETP_{P-P}$

L'indicatore in questione  $AC6$  [ $mm/mm$ ] relaziona l'evapotraspirazione effettiva rispetto alla potenziale, ovvero all'ipotetica evapotraspirazione di una coltura erbacea 'standard' in attiva crescita e non limitata da stress idrico. L'evapotraspirazione potenziale è sempre maggiore rispetto a quella che effettivamente si verifica. Più l'indicatore in questione è ridotto, maggiore è la differenza tra richiesta idrica e disponibilità.

### AC7 - *Onda di calore*

L'onda di calore, secondo il WMO (World Meteorological Organization), si ha quando si verificano almeno 6 giorni consecutivi in cui la temperatura massima è superiore al 90° percentile di quel determinato giorno rispetto al periodo climatologico (trentennio) di riferimento. Per carenza di sufficienti informazioni per definire il trend degli ultimi trent'anni di temperature e per ridurre la difficoltà di calcolo, si è scelto di adottare degli indici di più semplice interpretazione. Questi consistono nella conta di giorni tali per cui la temperatura media supera la temperatura di cutoff della comunità erbacea. Questo indice è stato suddiviso in tre sottocategorie:

- $AC7a$ : numero di giorni in cui la temperatura media è maggiore del 60% della temperatura di cutoff o soglia;
- $AC7b$ : numero di giorni in cui la temperatura media è maggiore dell'80% della temperatura di cutoff;
- $AC7c$ : numero di giorni in cui la temperatura media è maggiore della temperatura di cutoff;

Ogni specie ha la propria temperatura critica, per valutare il valore di cutoff della comunità è stata calcolata la media di  $T_{cutoff}$  delle specie presenti per fascia di quota.

## AC8 - *Indici di Biodiversità*

Come indici di biodiversità sono stati considerati l'indice di Shannon [55, 56] e l'indice di Simpson [57], indicati con *AC8a* e *AC8b*, riportati nelle equazioni 8.1 e 8.2 rispettivamente.

$$H_{Sh} = - \sum_{i=1}^{i=n} p_i \cdot \log_2 p_i \quad 0 \leq H_{Sh} \leq \log_2 n \quad (8.1)$$

$$H_{Si} = 1 - \sum_{i=1}^{i=n} p_i^2 \quad 0 \leq H_{Si} \leq 1 \quad (8.2)$$

Dove:

- $n$  è il numero totale di specie analizzate, in questo caso 2;
- $p_i$  è la presenza relativa della specie considerata.  $0 \leq p_i \leq 1$ .

Maggiore è il valore di questi indici, maggiore è il grado di biodiversità della comunità vegetale. In questo elaborato vengono analizzate due specie per fascia di quota, quindi la biodiversità è valutata solo in relazione della presenza relativa delle due specie presenti. Se fossero presenti in egual abbondanza, l'indicatore assumerebbe il suo valore massimo, quindi  $H_{Sh} = 1$  e  $H_{Si} = 0.5$ .

## AC9 - *Indici Agro-meteorologici*

Gli indici agrometeorologici forniscono indicazioni generali utili alla determinazione delle varietà di vite coltivabili in una certa area.

L'indice di Winkler, *AC9a*, è comunemente applicato nelle caratterizzazioni bioclimatiche dei territori viticoli e, sebbene poco correlato con le caratteristiche fisiologiche della vite, permette una grossolana identificazione delle aree coltivabili, nonché delle scelte varietali più opportune sotto il profilo della precocità di maturazione.

L'indice di Winkler, è originalmente calcolato nel periodo vegetativo della vite, ma per la mia analisi, incentrata sulle dinamiche pascolive, è stato fatto coincidere con la stagione di crescita del pascolo, dal 30 aprile al 30 Settembre: consiste in una somma termica (base 10 °C), ovvero per ogni giorno si determinano delle unità termiche utili alla crescita del pascolo e come differenza tra la temperatura media giornaliera e 10°C, dato quest'ultimo che rappresenta lo zero termico vegetativo per la coltura.

$$W = \sum_{30.04}^{30.09} \frac{T_{max} - 10}{2} \quad (8.3)$$

L'indice eliotermico di Huglin, *AC9b*, è calcolato, nel periodo compreso tra il 30 aprile ed il 30 settembre, sempre come somma termica (base 10 °C), corretta con un coefficiente latitudinale che tiene conto della lunghezza del giorno,  $K = 1.04$ . Oltre alle temperature medie, vengono prese in considerazione le temperature massime giornaliere, cosa che rende l'indice di Huglin più adatto a caratterizzare zone viticole con elevata escursione termica, dove le sole temperature medie tendono a sottostimare il contributo delle elevate temperature diurne alla fotosintesi. Nonostante solitamente si usi per la vite, ho calcolato questo indicatore per le aree pascolive.

Insieme all'indice di siccità ed all'indice di freschezza della notte, determina la classificazione climatica multicriteriale.

$$H = K \cdot \sum_{30.04}^{30.09} \frac{T_{media} + T_{max} - 20}{2} \quad (8.4)$$

Nella regione Valle d'Aosta vengono emessi i bollettini agrometeo, in dodici stazioni presenti sul territorio, per confrontare gli indici con gli anni precedenti [58].

<b>AC1</b>		
Anno	Bassa quota	Alta quota
2005	10	14
2006	14	17
2007	15	18
2008	15	22
2009	3	8
2010	9	15
2011	13	16
2012	10	13
2013	16	21
2014	10	12
2015	11	18
2016	9	11
2017	5	8
2018	13	13
2019	11	14
Media	11	15

Tabella 8.2: Numero di giorni di precipitazioni intense annue.

<b>AC2</b>		
Anno	Bassa quota	Alta quota
2005	384.97	475.48
2006	426.36	570.83
2007	327.19	544.86
2008	488.72	704.17
2009	207.14	312.43
2010	384.34	560.22
2011	431.45	552.52
2012	361.67	453.00
2013	542.35	725.34
2014	349.94	475.10
2015	357.46	519.68
2016	282.89	363.64
2017	235.83	331.84
2018	351.33	468.90
2019	360.06	491.01
Media	370.78	503.27

Tabella 8.3: Altezza di pioggia cumulata durante la stagione di crescita.

<b>AC3</b>		
Anno	Bassa quota	Alta quota
2005	0.31	0.35
2006	0.21	0.28
2007	0.33	0.31
2008	0.30	0.30
2009	0.39	0.53
2010	0.25	0.29
2011	0.27	0.30
2012	0.30	0.32
2013	0.29	0.28
2014	0.36	0.38
2015	0.30	0.29
2016	0.33	0.40
2017	0.35	0.40
2018	0.37	0.40
2019	0.37	0.39
Media	0.32	0.35

Tabella 8.4: Rapporto ET/P.

<b>AC4</b>		
Anno	Bassa quota	Alta quota
2005	17.05	19.35
2006	15.52	18.54
2007	16.46	20.49
2008	11.99	17.39
2009	17.11	18.54
2010	14.14	18.06
2011	17.60	20.76
2012	16.81	19.28
2013	14.73	16.45
2014	14.86	18.78
2015	16.92	19.90
2016	16.21	17.75
2017	17.86	19.01
2018	16.44	21.26
2019	14.92	18.26
Media	15.91	18.92

Tabella 8.5: Produttività valutata l'ultimo giorno della stagione di crescita.

<b>AC5</b>		
Anno	Bassa quota	Alta quota
2005	4.7E-02	5.7E-02
2006	3.9E-02	5.8E-02
2007	5.3E-02	5.5E-02
2008	8.2E-02	8.0E-02
2009	3.1E-02	6.0E-02
2010	4.6E-02	6.0E-02
2011	4.4E-02	5.3E-02
2012	4.3E-02	5.1E-02
2013	7.2E-02	8.3E-02
2014	5.7E-02	6.4E-02
2015	4.2E-02	5.1E-02
2016	3.8E-02	5.4E-02
2017	3.1E-02	4.7E-02
2018	5.3E-02	5.9E-02
2019	5.9E-02	7.0E-02
Media	4.9E-02	6.0E-02

Tabella 8.6: Rapporto ET/Y.

<b>AC6</b>		
Anno	Bassa quota	Alta quota
2005	0.21	0.27
2006	0.16	0.27
2007	0.20	0.27
2008	0.24	0.33
2009	0.15	0.27
2010	0.16	0.28
2011	0.19	0.26
2012	0.18	0.24
2013	0.26	0.36
2014	0.20	0.29
2015	0.18	0.24
2016	0.16	0.25
2017	0.13	0.21
2018	0.20	0.29
2019	0.22	0.31
Media	0.19	0.28

Tabella 8.7: Rapporto ET/ETP.

AC7						
Anno	Bassa quota			Alta quota		
	a	b	c	a	b	c
2005	2	0	0	0	0	0
2006	2	0	0	0	0	0
2007	1	0	0	0	0	0
2008	0	0	0	0	0	0
2009	1	0	0	0	0	0
2010	4	0	0	0	0	0
2011	2	0	0	0	0	0
2012	5	0	0	3	0	0
2013	1	0	0	0	0	0
2014	0	0	0	0	0	0
2015	14	0	0	4	0	0
2016	2	0	0	0	0	0
2017	10	0	0	4	0	0
2018	5	0	0	0	0	0
2019	16	0	0	0	0	0
Media	4.3	0	0	0.7	0	0

Tabella 8.8: Numero di giorni in cui la temperatura è maggiore del a)60% b)80% e c)100% di T cutoff.



<b>AC8</b>				
Anno	Bassa quota		Alta quota	
	a	b	a	b
2005	0.976	0.483	0.967	0.478
2006	0.947	0.464	0.926	0.450
2007	0.937	0.457	0.910	0.439
2008	0.933	0.454	0.901	0.433
2009	0.933	0.455	0.908	0.438
2010	0.934	0.455	0.909	0.438
2011	0.935	0.456	0.910	0.439
2012	0.931	0.453	0.916	0.443
2013	0.931	0.453	0.911	0.439
2014	0.932	0.454	0.896	0.430
2015	0.934	0.455	0.896	0.429
2016	0.927	0.451	0.899	0.432
2017	0.926	0.450	0.902	0.434
2018	0.934	0.456	0.916	0.443
2019	0.932	0.454	0.914	0.441
Media	0.936	0.457	0.912	0.440

Tabella 8.9: Indici di Biodiversità secondo a) Shannon b)Simpson.

<b>AC9</b>				
Anno	Bassa quota		Alta quota	
	a	b	a	b
2005	209.5	254.6	53.7	181.8
2006	281.8	333.7	91.1	247.1
2007	272.0	365.2	47.9	158.8
2008	207.1	254.8	50.7	170.7
2009	305.0	357.9	88.4	270.6
2010	262.2	308.6	79.9	214.9
2011	224.1	271.9	60.6	189.6
2012	300.2	353.3	96.0	260.9
2013	219.7	264.7	61.5	192.7
2014	162.4	199.9	26.2	114.5
2015	338.7	392.2	148.0	300.3
2016	316.0	370.5	105.5	283.2
2017	359.8	419.9	125.8	317.4
2018	384.5	449.3	104.3	312.8
2019	417.0	469.6	176.7	368.3
Media	284.0	337.7	87.8	238.9

Tabella 8.10: Indici Agrometeorologici di a) Winkler b)Huglin.

## 8.1 Mappe di Produttività

La simulazione della produttività  $Y[\text{tonha}^{-1}]$ , indicata con  $AC4$ , dipende dalla biomassa totale accumulata al raggiungimento della maturità fisiologica  $B_{PM}[\text{tonha}^{-1}]$  e l'*Harvest Index*  $HI$ , ovvero il rapporto tra la biomassa per il raccolto e la biomassa totale [17].

$$Y = B_{PM} \cdot HI \quad (8.5)$$

L'harvest index è determinato usando come base un  $HI$  in condizioni di assenza di stress, poi viene modificato in funzione dell'intensità di stress dovuto ad acqua e nitrogeno e della sensibilità della coltura in fase di fioritura e semina. Nella mappa qui di seguito riportata, si evidenzia il valore di produttività raggiunto a fine stagione nelle aree pascolive. Alcune zone risultano essere povere, caratterizzate da una produttività nulla, altre zone invece possono raggiungere picchi di  $25\text{tonha}^{-1}$  di produttività.

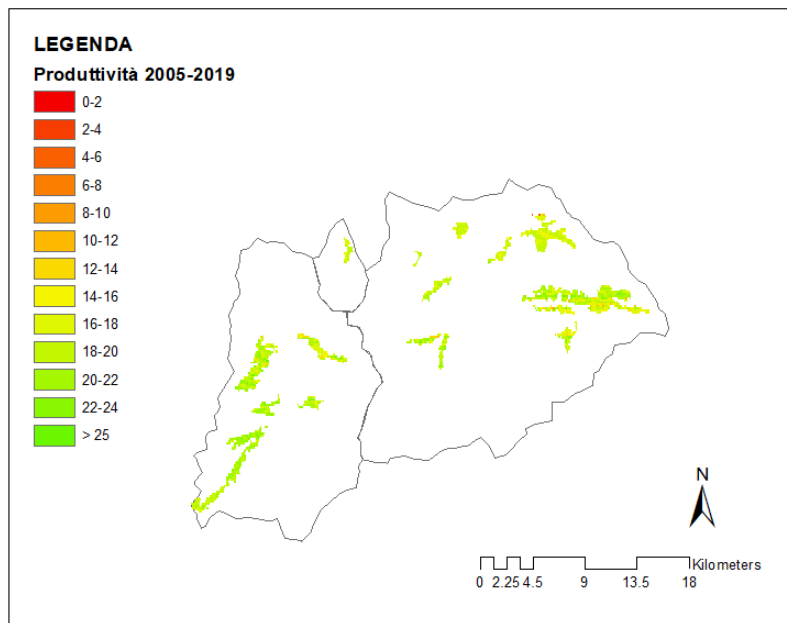


Figura 8.2: .  
Produttività media di fine stagione del periodo 2005-2019

### 8.1.1 Relazione tra produttività ed altitudine

Analizzando il valore di produttività e del DEM di ogni cella, si può costruire un legame tra altitudine e produttività. Dai risultati ottenuti non vi è una precisa dipendenza lineare tra l'altitudine e la crescita di biomassa, ma si può osservare una tendenza di diminuzione di produttività all'aumentare della quota.

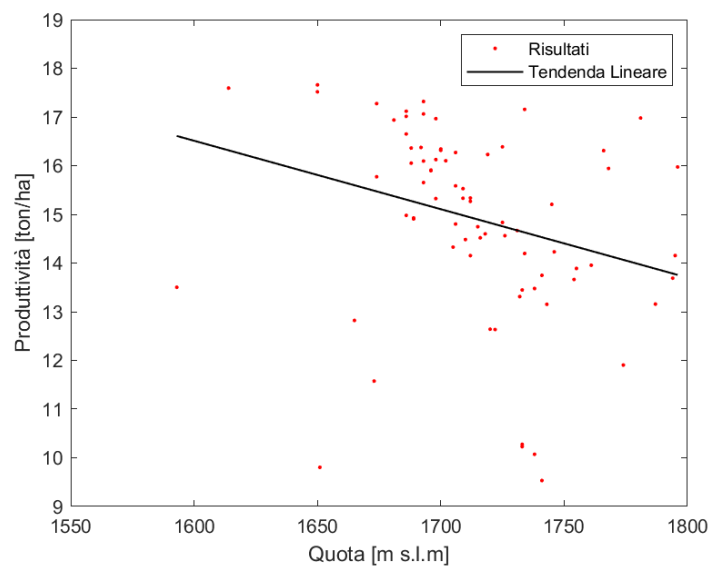


Figura 8.3: Produttività (ton/ha) in funzione dell'altitudine per i pascoli a bassa quota.

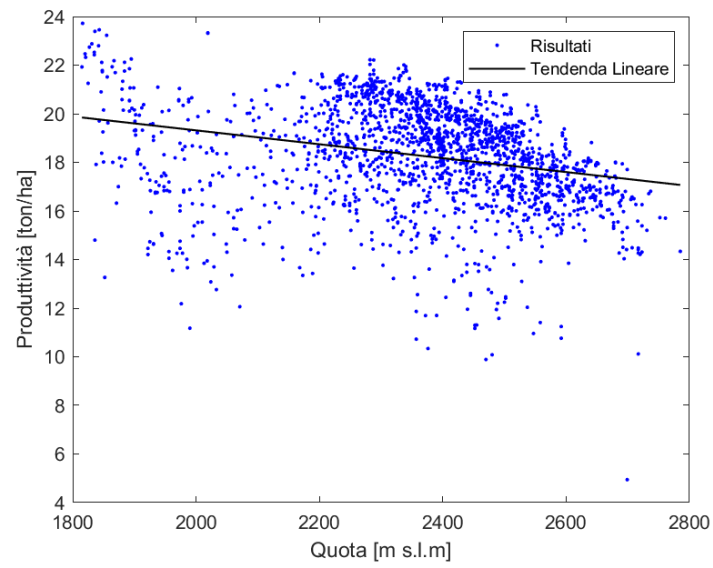


Figura 8.4: Produttività (ton/ha) in funzione dell'altitudine per i pascoli ad alta quota.

## 8.2 Competizione interspecifica

Come precedentemente introdotto, il modello *CoSMo* valuta la competizione interspecifica all'interno di una comunità erbacea. Nelle aree pascolive a bassa quota si sono analizzate le specie *Trifolium Alpinum* e *Dactylis Glomerata* e ad alta quota invece *Festuca Rubra* e *Nardus Stricta*. È stato assunto che, in condizioni iniziali, la presenza relativa di ogni specie per quota fosse 0.5, ovvero esse sono presenti in egual abbondanza.

La presenza relativa della specie 1,  $p_1$ , variabile nel tempo, è data dalla formula:

$$p_1(t + \Delta t) = \frac{I \cdot p_1(t) + RGR_1}{I + RGR} \quad (8.6)$$

Dove  $I$  è un fattore di inerzia, in genere pari a 100,  $RGR$  è il tasso di crescita della coltura erbacea e  $RGR_1$  è il tasso di crescita della specie 1. I tassi di crescita sono tempo varianti e vengono simulati ad ogni step temporale dal modello *CoSMo*, in funzione del tasso di biomassa e dei fattori di suitability.

Inizio stagione di crescita - 2005			
BASSA QUOTA		ALTA QUOTA	
Specie	Presenza relativa	Specie	Presenza relativa
<i>Trifolium Alpinum</i>	0.5	<i>Festuca Rubra</i>	0.5
<i>Dactylis Glomerata</i>	0.5	<i>Nardus Stricta</i>	0.5

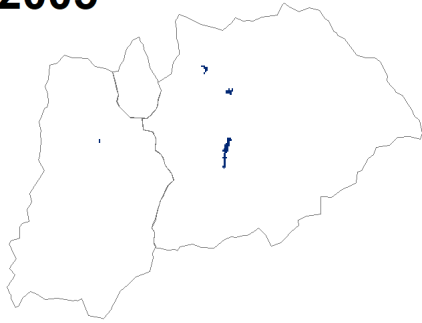
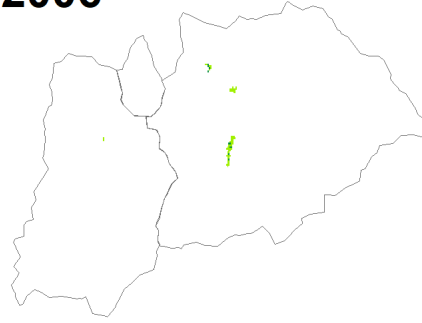
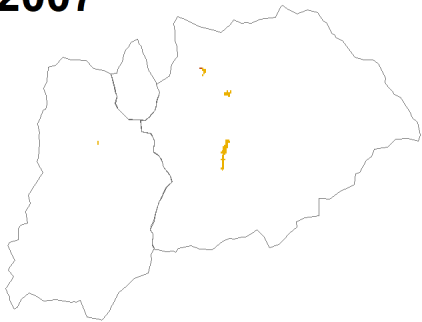
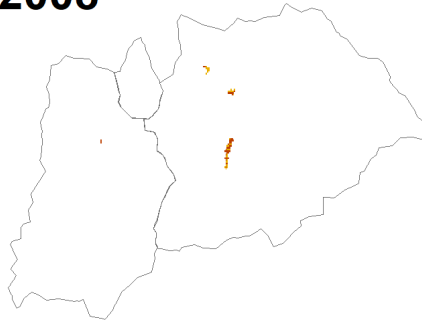
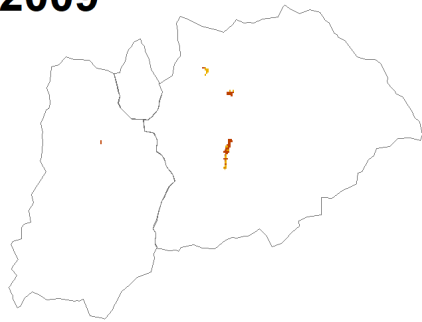
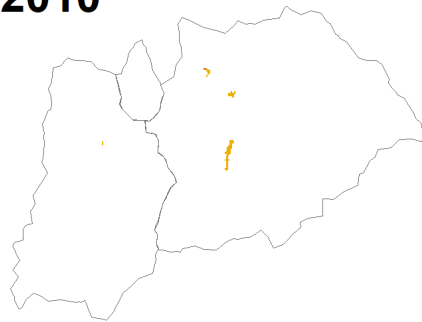
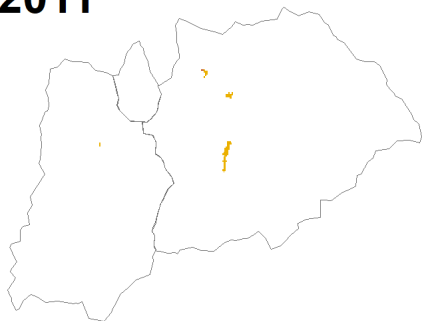
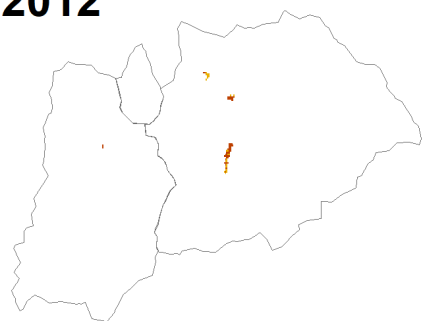
Tabella 8.11: Condizioni iniziali di presenza relativa.

Seguendo l'algoritmo del modello *CoSMo*, Fig. 4.7, valutando ad ogni intervallo di tempo i fattori di *suitability* di una specie, si aggiorna la presenza relativa delle due specie. Questo parametro, adimensionale, è compreso tra 0 e 1, dove 0 significa che la specie non è presente ed 1 indica che la specie è l'unica ad essere presente. Il modello calcola le due presenze relative indipendentemente. Trattandosi di solo due tipi di vegetazione, nota la presenza relativa di una specie  $p_1$ , è direttamente ricavabile la presenza relativa dell'altra specie in competizione  $p_2 = 1 - p_1$ , difatti nelle mappe riportate di seguito si raffigura l'abbondanza di una specie, l'abbondanza della specie competitiva è il complementare.

Si tenga a mente che questa variabile ha carattere relativo, misura in termini relativi la presenza di una specie rispetto all'altra in competizione. Non vuole dare una misura assoluta in termini quantitativi di una specie. Si sa, ad esempio, che rispetto a tutta la superficie disponibile, tra di loro, una specie

occuperà il 30% e l'altra il 70%, ma questo non dà indicazioni sulla loro estensione effettiva. Tale proporzione è indipendente dalla quantità di biomassa prodotta.

Mentre gli indicatori di biodiversità *AC8a* e *AC8b* forniscono una misura della varietà della comunità erbacea, le mappe di presenza relativa indicano quale delle due specie prevale sull'altra, in quale proporzione e in quale punto del dominio. Si riportano le mappe di presenza relativa di una specie nelle Figure 8.5-8.8.

**2005****2006****2007****2008****2009****2010****2011****2012**



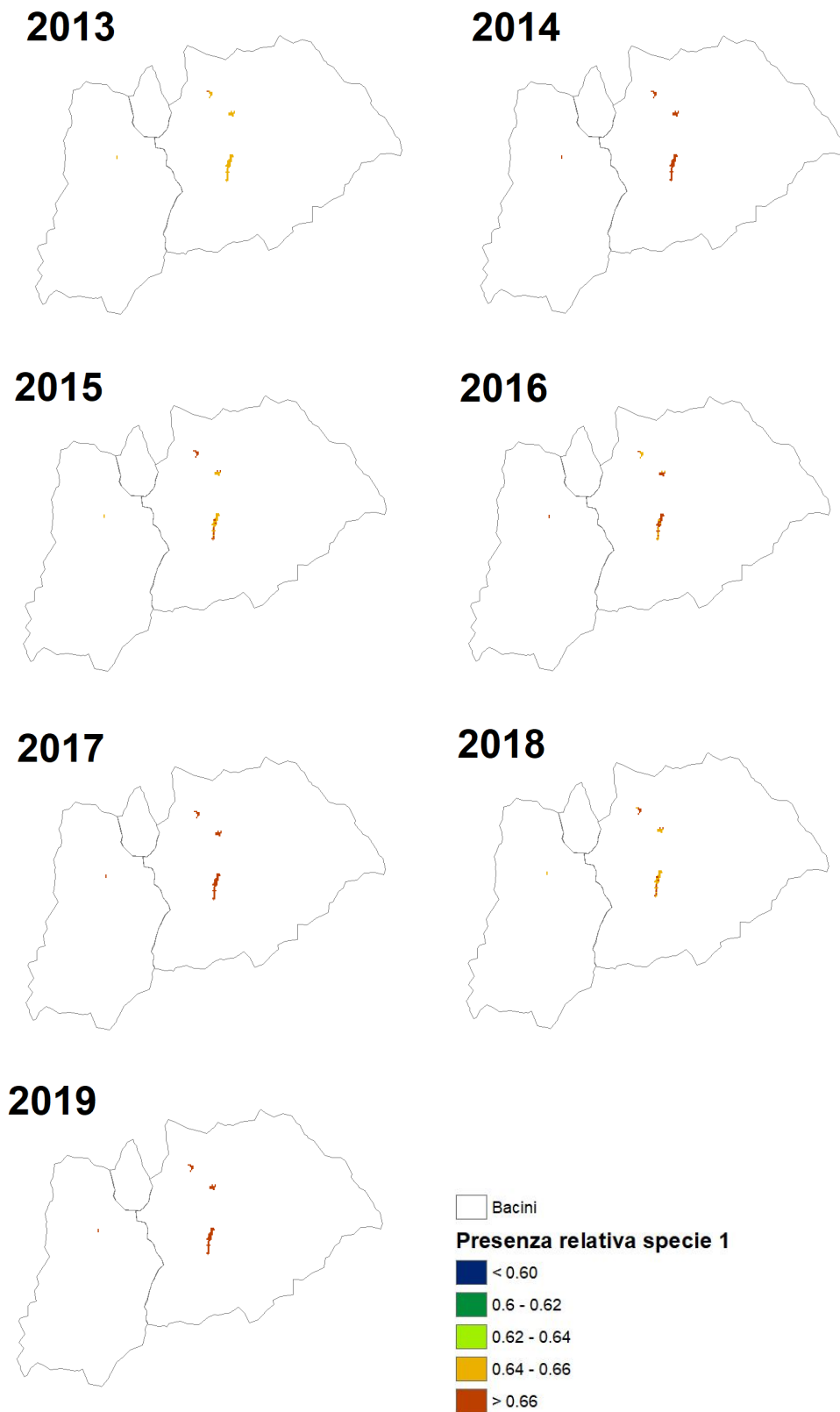
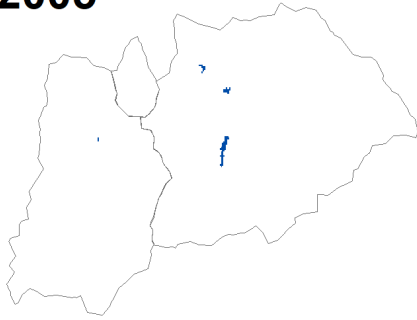
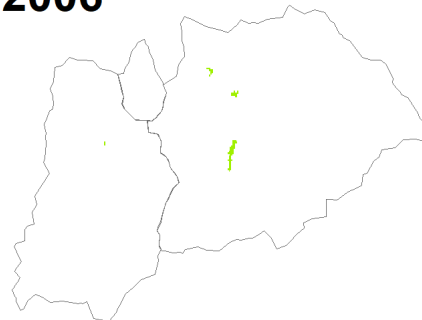
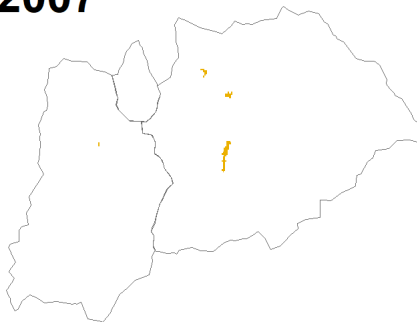
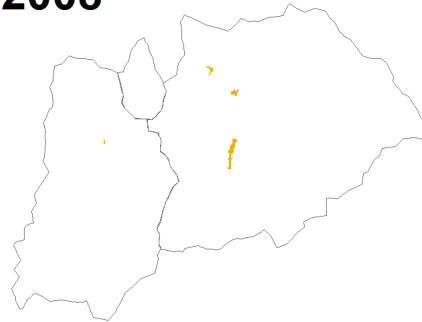
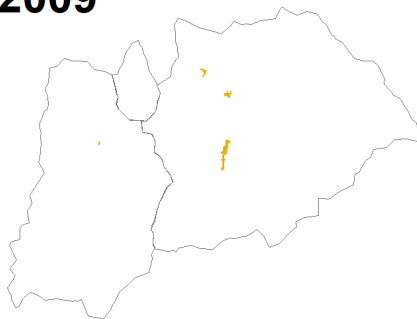
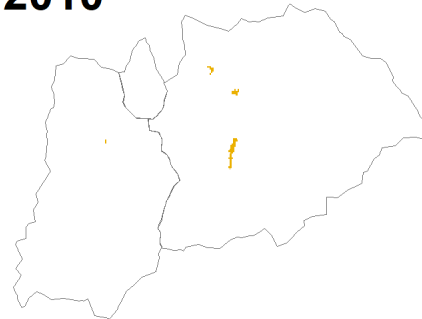
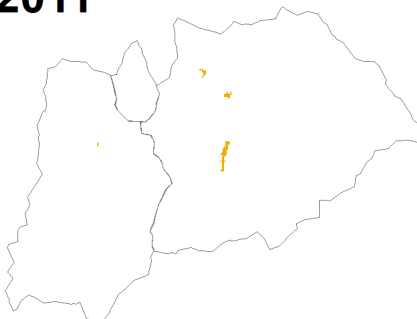
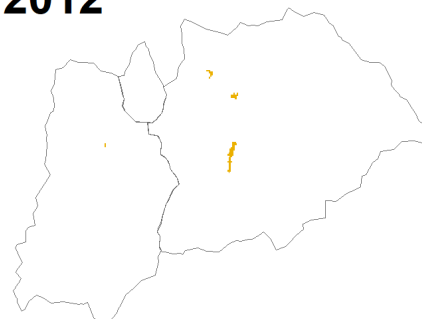


Figura 8.5: Variazione della presenza relativa della specie 1 (*Trifolium Alpinum*) rispetto alla specie "competitiva" (*Dactylis Glomerata*), ad alta quota, a inizio stagione, nel periodo 2005-2019.

**2005****2006****2007****2008****2009****2010****2011****2012**

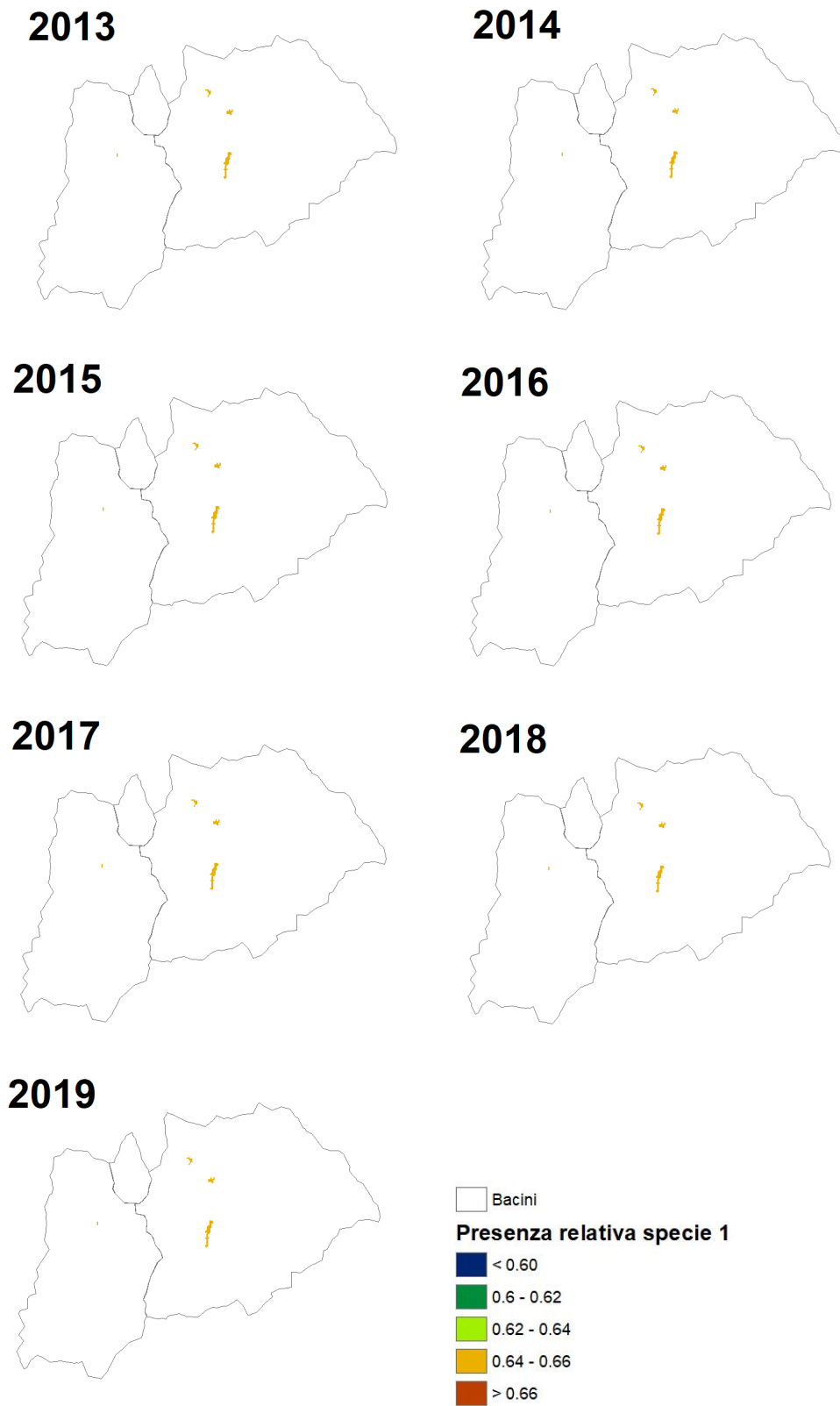
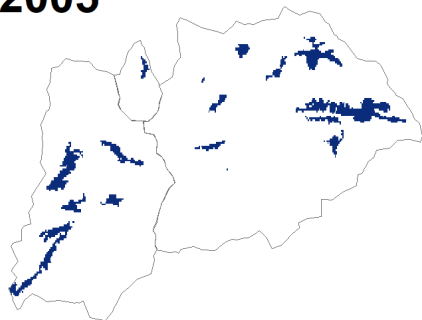
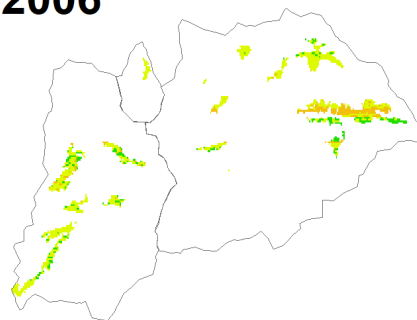
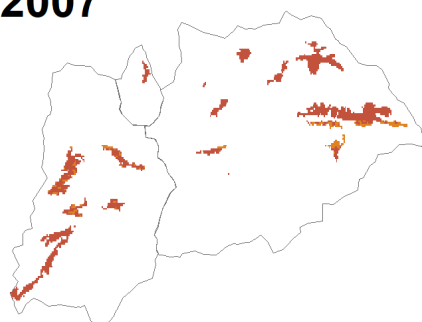
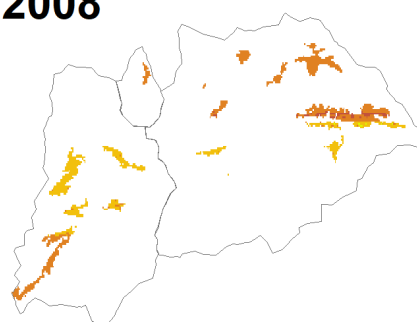
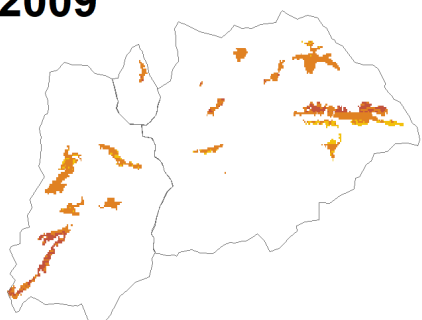
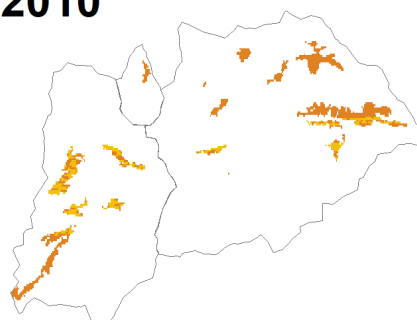
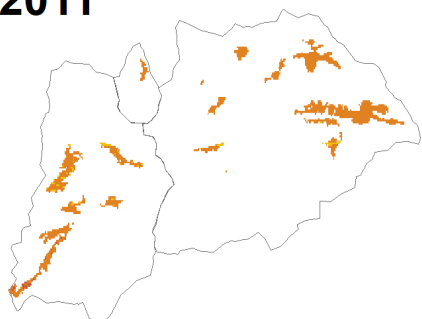
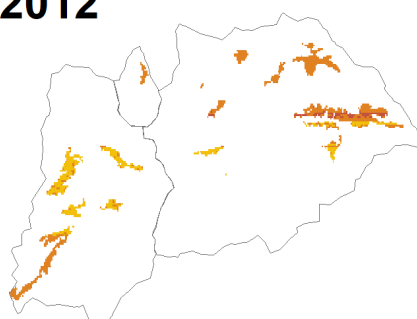


Figura 8.6: Variazione della presenza relativa della specie 1 (*Trifolium Alpinum*) rispetto alla specie "competitiva" (*Dactylis Glomerata*), ad alta quota, a fine stagione, nel periodo 2005-2019.

**2005****2006****2007****2008****2009****2010****2011****2012**

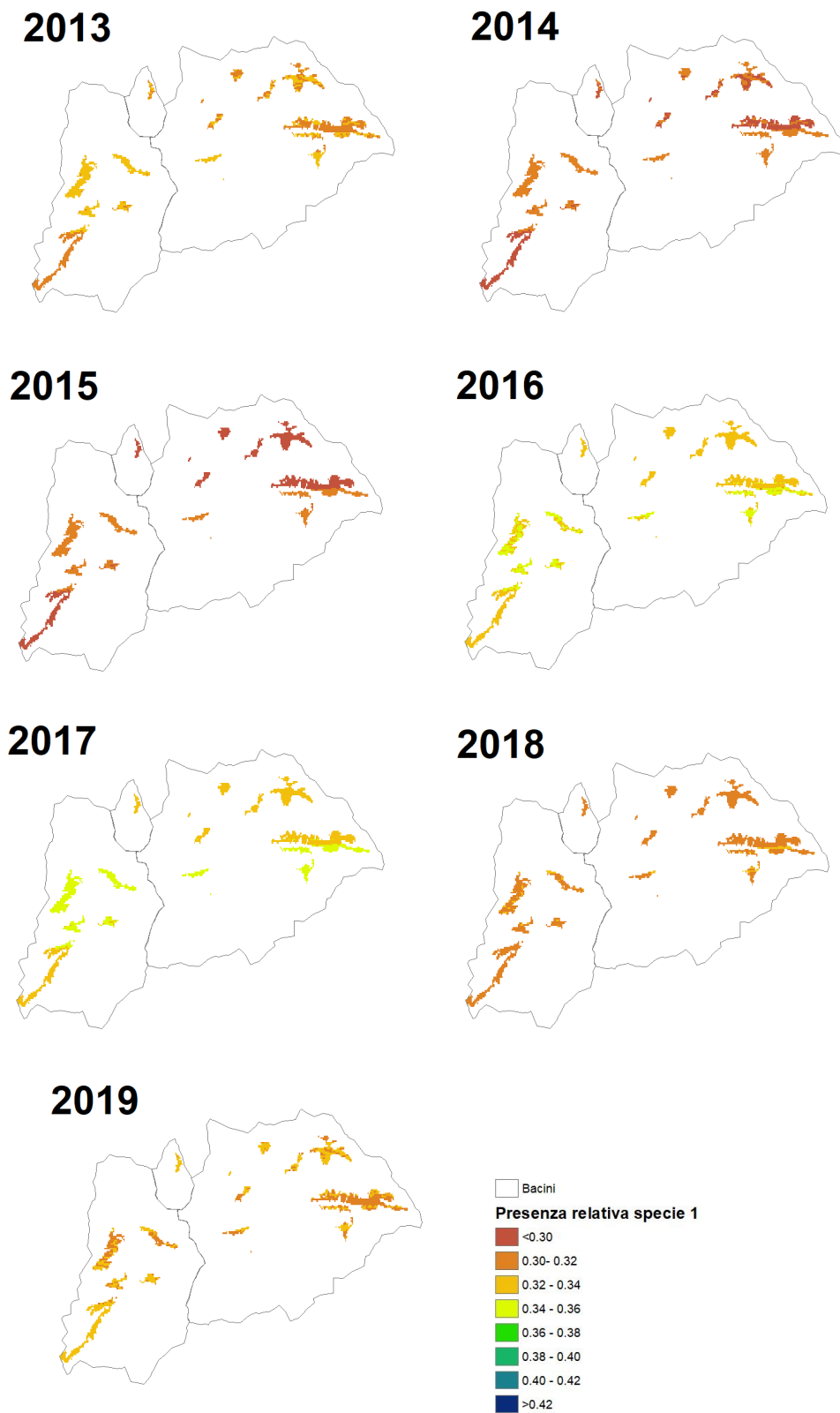
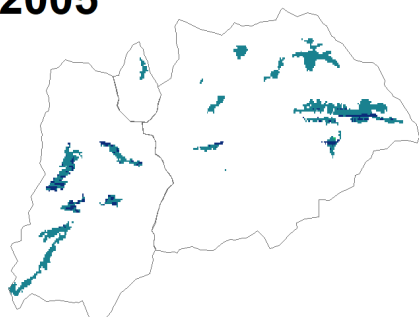
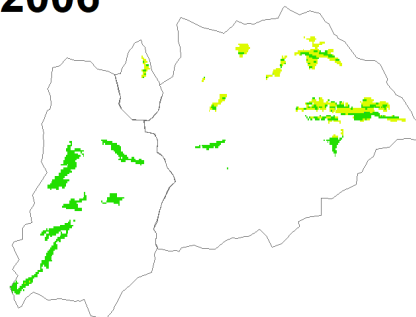
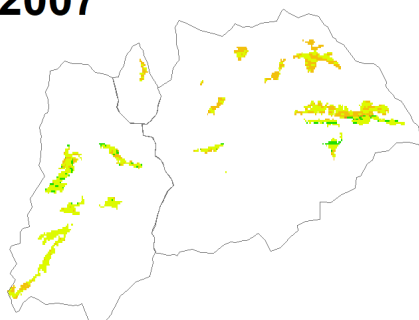
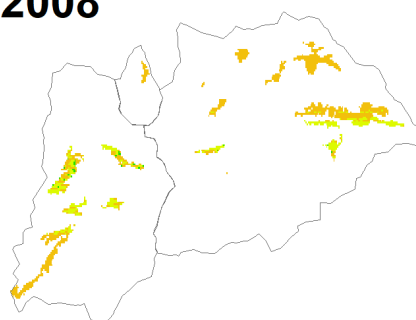
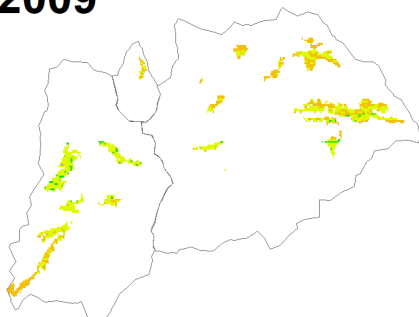
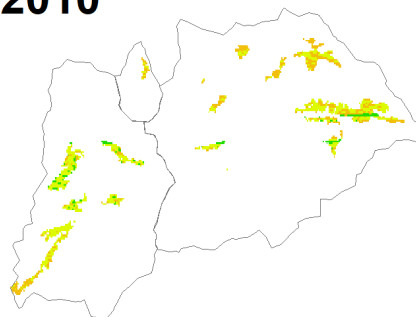
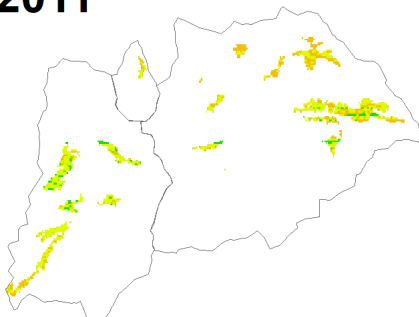
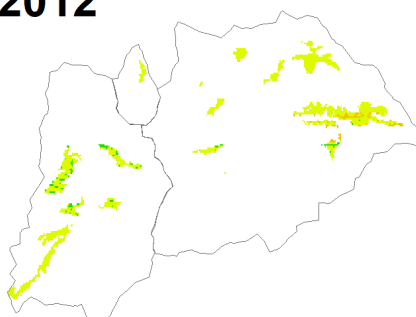


Figura 8.7: Variazione della presenza relativa della specie 1 (*Festuca Rubra*) rispetto alla specie "competitiva" (*Nardus Sstricta*), ad alta quota, a inizio stagione, nel periodo 2005-2019.

**2005****2006****2007****2008****2009****2010****2011****2012**

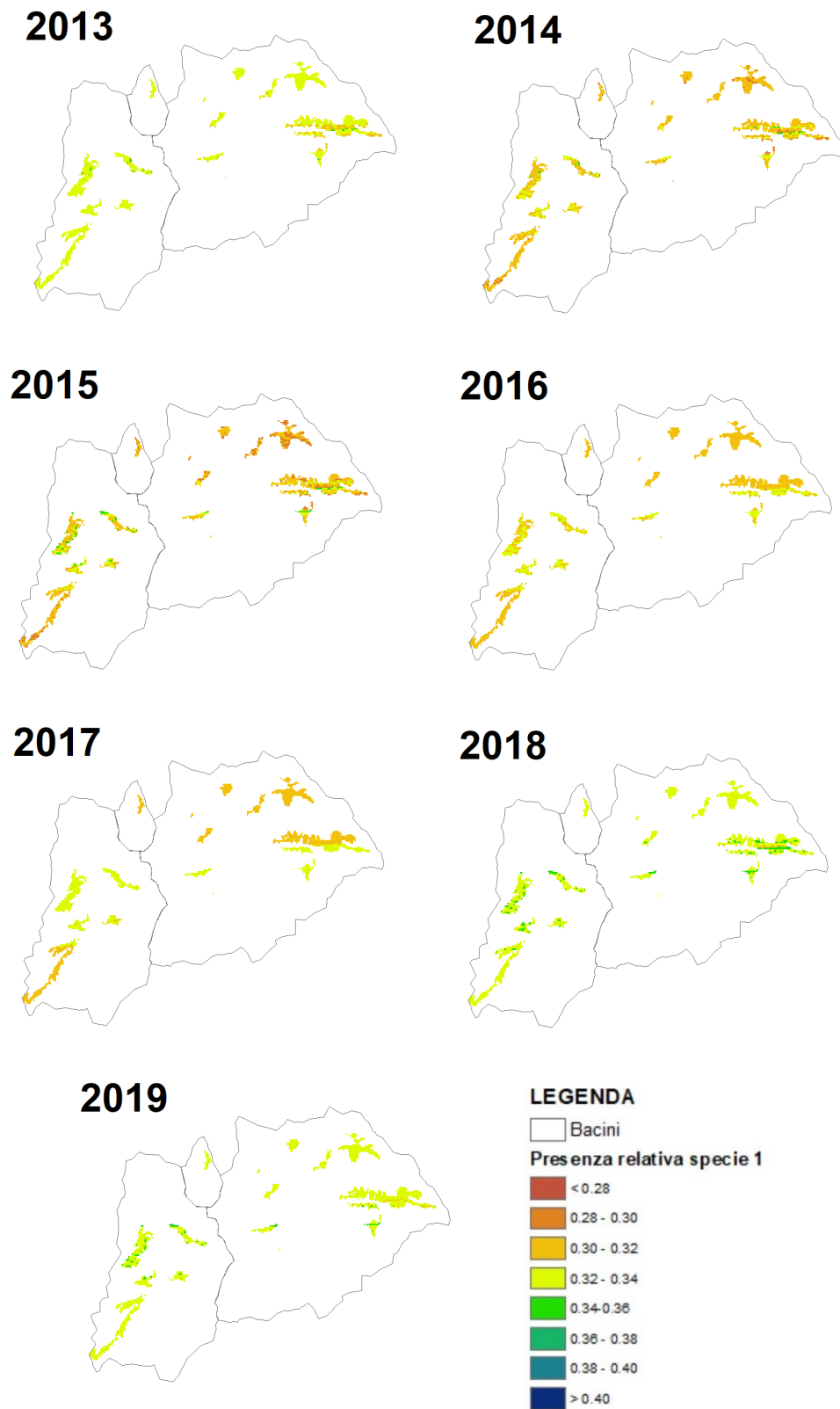


Figura 8.8: Variazione della presenza relativa della specie 1 (*Festuca Rubra*) rispetto alla specie "competitiva" (*Nardus Stricta*), ad alta quota, a fine stagione, nel periodo 2005-2019.

### 8.2.1 Presenza relativa e altitudine

Come precedentemente mostrato nelle mappe di Fig. 8.5-8.8, a fine stagione vi è una predominanza di una specie rispetto all'altra. A bassa quota, la partizione tra *Trifolium Alpinum* e *Dactylis Glomerata* è circa 65% e 35%, mentre ad alta quota, la ripartizione tra le specie *Festuca Rubra* e *Nardus Stricta* è circa 32% e 68%. Tali percentuali variano giornalmente, ma la loro variazione giornaliera non è apprezzabile, ha più valore vedere l'evoluzione durante tutta la stagione o rispetto a più anni.

Fissato un giorno di osservazione, coincidente con l'ultimo giorno della stagione, le ripartizioni tra specie ad alta e bassa quota non sono omogenee su tutto il dominio, ma variano nello spazio, da cella in cella. Nelle celle ad alta quota, si può notare che all'aumentare dell'altitudine, le due presenze relative tendono ad allontanarsi, cioè l'abbondanza della specie predominante aumenta e di conseguenza l'abbondanza della specie competitiva diminuisce. Questo gradiente di presenza relativa è maggiormente trascurabile nelle aree a bassa quota. Nelle Figure 8.9 e 8.10 è stata presa ad esempio la stagione 2019, ma il discorso è valido anche per tutte le altre stagioni osservate, comprese tra il 2005 e il 2019.

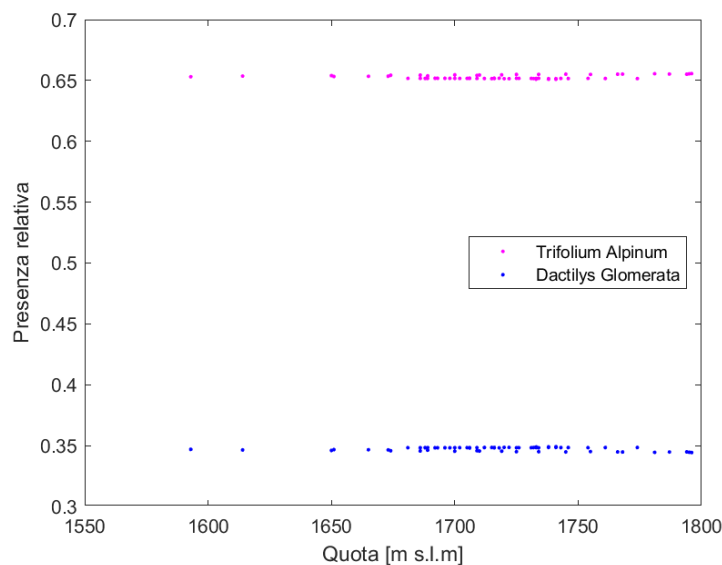


Figura 8.9: Gradiente altitudinale di presenza relativa a bassa quota. Valutato a fine stagione 2019.



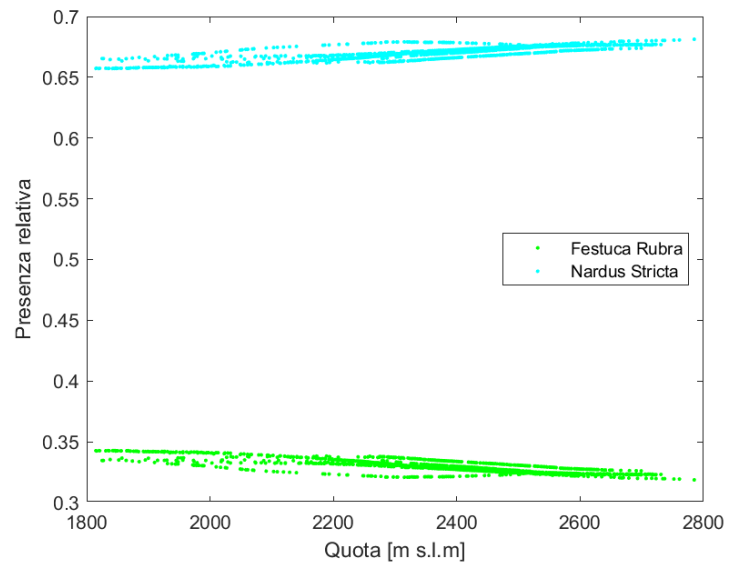


Figura 8.10: Gradiente altitudinale di presenza relativa ad alta quota. Valutato a fine stagione 2019.



# Capitolo 9

## Proiezioni Climatiche future

Effettuato il downscaling come descritto nel capitolo 7, ho stimato le variazioni di temperatura e precipitazione per i decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100, nelle aree di pascolo a bassa ed alta quota, a seconda dei modelli e degli scenari considerati.

### 9.1 Variazioni della temperatura

Le temperature medie durante la stagione di crescita aumentano rispetto alla media registrata nel periodo di osservazione 2005-2019, sia a bassa quota che ad alta quota. Le temperature medie del periodo di crescita registrate tra il 2005 e 2009 sono:

- $-0.36^{\circ}\text{C}$  a bassa quota;
- $-2^{\circ}\text{C}$  ad alta quota.

#### 9.1.1 Variazione della temperatura massima

Oltre alla valutazione delle temperature medie negli scenari futuri, si valutano anche i loro valori massimi proiettati. Le temperature massime verificatesi nel periodo di crescita, registrate tra il 2005 e 2009, sono:

- $17.32^{\circ}\text{C}$  a bassa quota;
- $16.32^{\circ}\text{C}$  ad alta quota.

A seconda del modello, il comportamento della temperatura massima differisce. Ci sono infatti modelli secondo i quali si prevedono valori di temperatura superiori anche di  $9^{\circ}\text{C}$  rispetto al massimo registrato tra il 2005-2019.

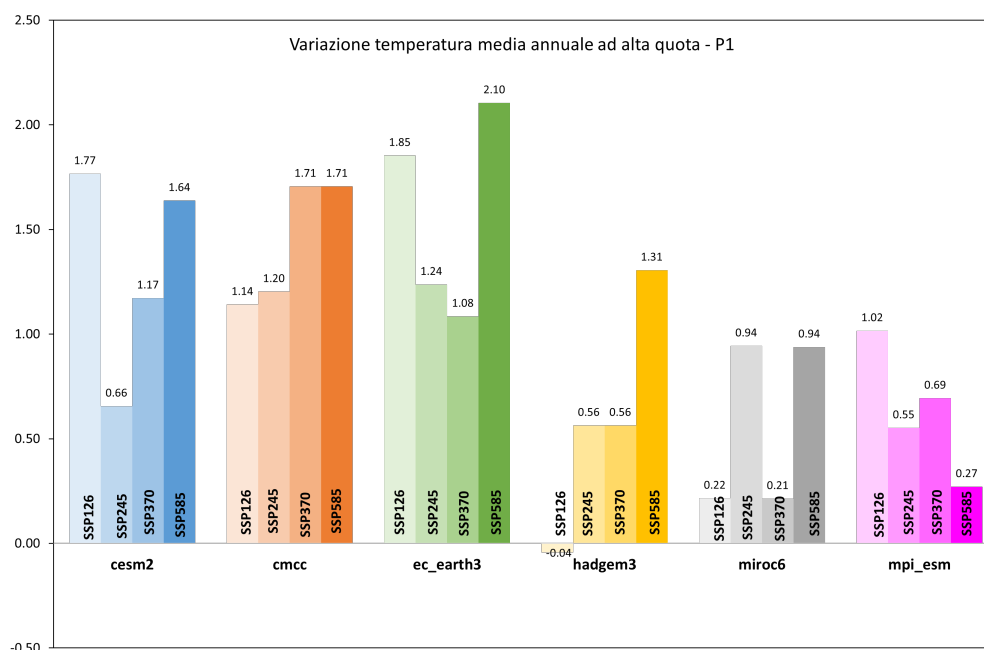


Figura 9.1: Variazione della temperatura media nel decennio P1:2041-2050 nelle fasce ad alta quota secondo i diversi scenari dei GCM.

Il modello EC-EARTH3 SSP 370 stima un incremento del valore massimo di temperatura di  $+9.34^{\circ}\text{C}$  a bassa quota a  $+8.42^{\circ}\text{C}$  ad alta quota entro il 2100. Nel primo decennio di controllo, le temperature massime simulate dagli scenari di HADGEM3 sono comunque inferiori rispetto alla temperatura massima registrata tra il 2005 e il 2019 nelle aree pascolive ad alta quota, sebbene il confronto tra i valori medi riportati il contrario.

Ciò non è infondato. Nel corso del quindicennio di riferimento si sono verificati eventi estremi nei quali la temperatura ha raggiunto elevate temperature. Tuttavia, si tratta di casi isolati, al di fuori dal trend delle temperature che normalmente si registrano. I modelli, per come sono costruiti, riportano un'incertezza intrinseca. Essi ricreano proiezioni di temperature e precipitazioni future medie con annesso intervallo di confidenza, ma appunto si rifanno a valori medi proiettati, non simulano eventi estremi. Complessivamente infatti, secondo le proiezioni future si registrano giornate più calde rispetto alla temperatura media attuale, ma con meno picchi di calore molto sopra la media.

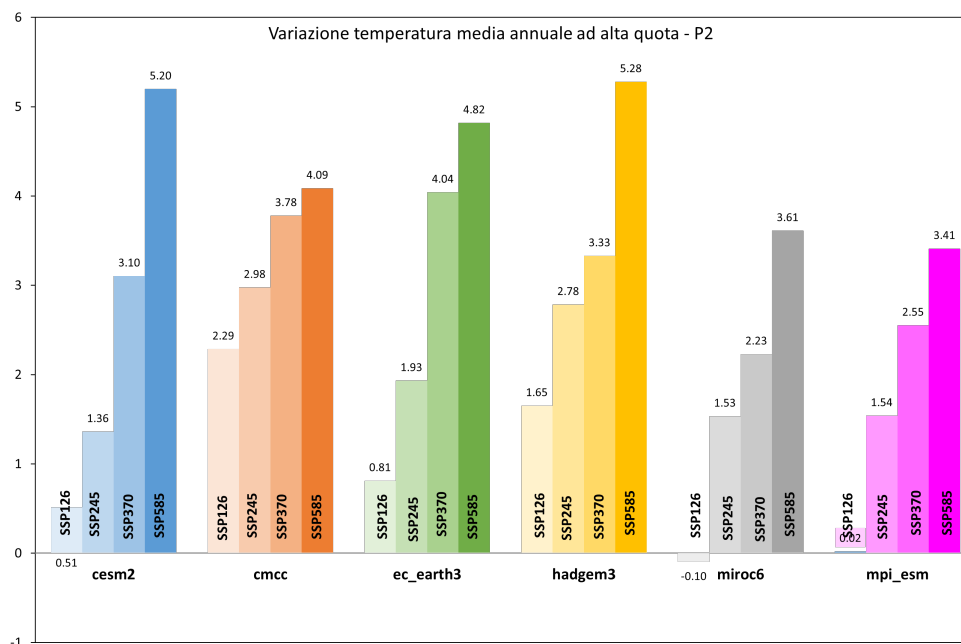


Figura 9.2: Variazione della temperatura media nel decennio P2:2091-2100 nelle fasce ad alta quota secondo i diversi scenari dei GCM.

## 9.2 Variazioni della precipitazione

Per le variazioni di precipitazione, si rimanda al capitolo 11. Tra gli indicatori agro-climatici considerati, *AC1* e *AC2* riguardano la precipitazione, rispettivamente il numero di giorni durante la stagione in cui si verificano eventi di precipitazione intensa e la precipitazione cumulata su tutta la stagione di crescita, considerata quest'ultima costante. Tali valori inerenti alla precipitazione, verranno combinati ad altri parametri per la creazione di nuovi indicatori agro-climatici.

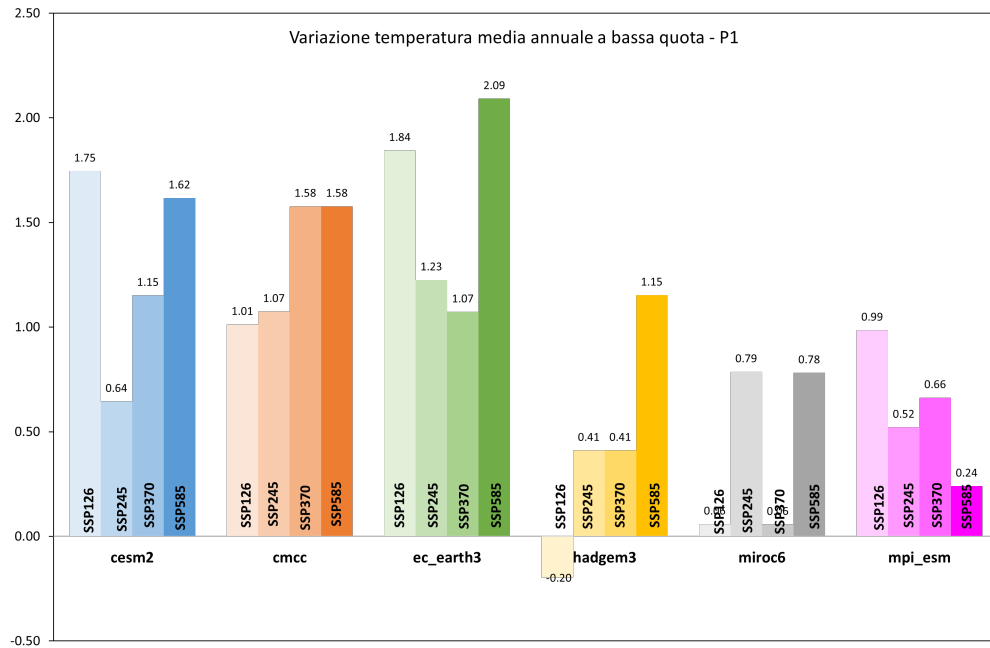


Figura 9.3: Variazione della temperatura media nel decennio P1:2041-2050 nelle fasce a bassa quota secondo i diversi scenari dei GCM.

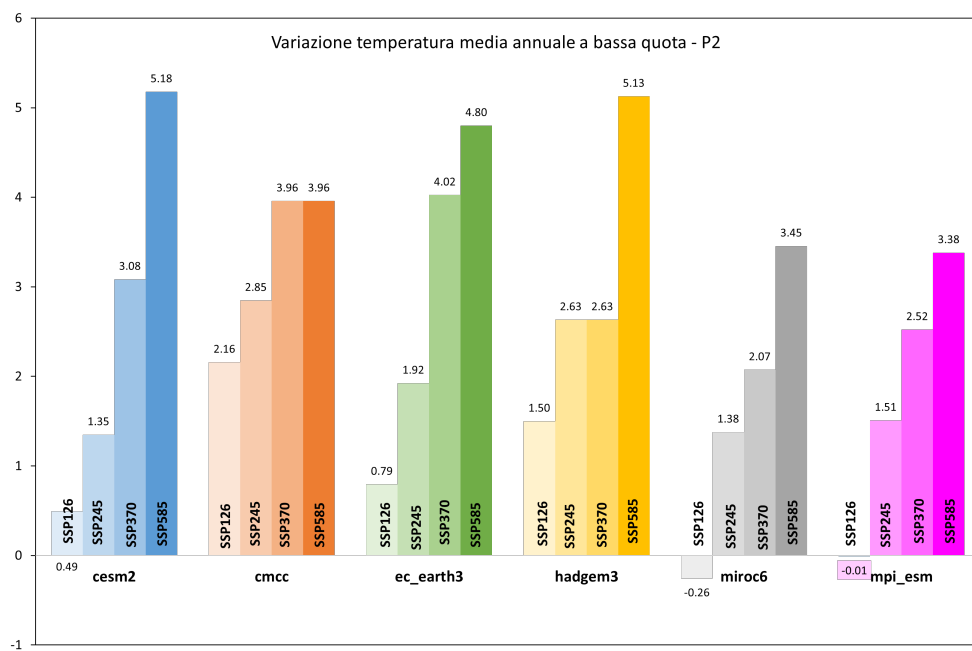


Figura 9.4: Variazione della temperatura media nel decennio P2:2091-2100 nelle fasce a bassa quota secondo i diversi scenari dei GCM.

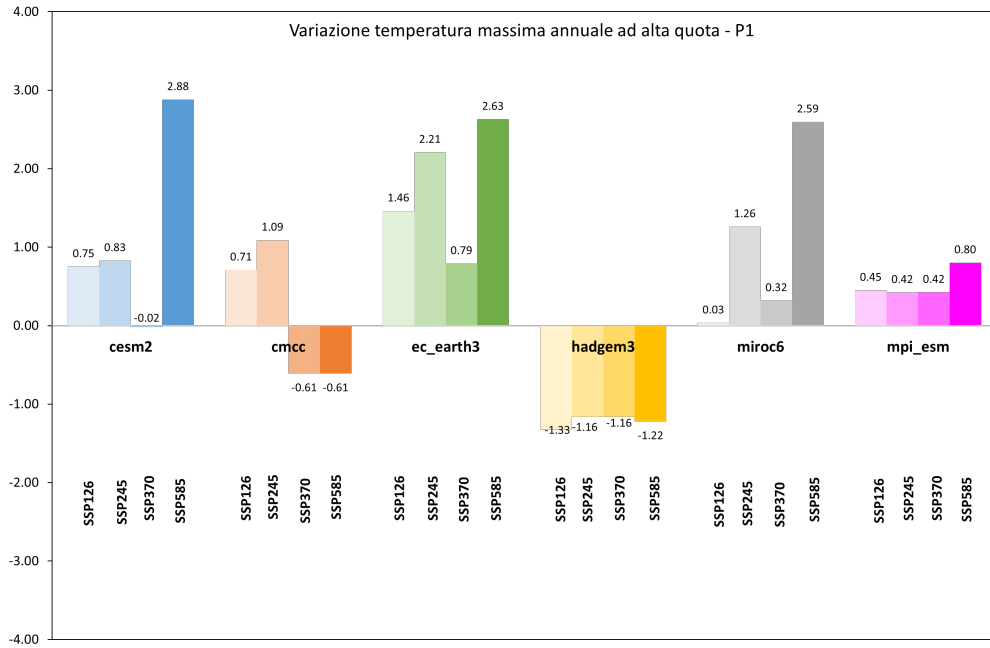


Figura 9.5: Variazione della temperatura massima nel decennio P1:2041-2050 nelle fasce ad alta quota secondo i diversi scenari dei GCM.

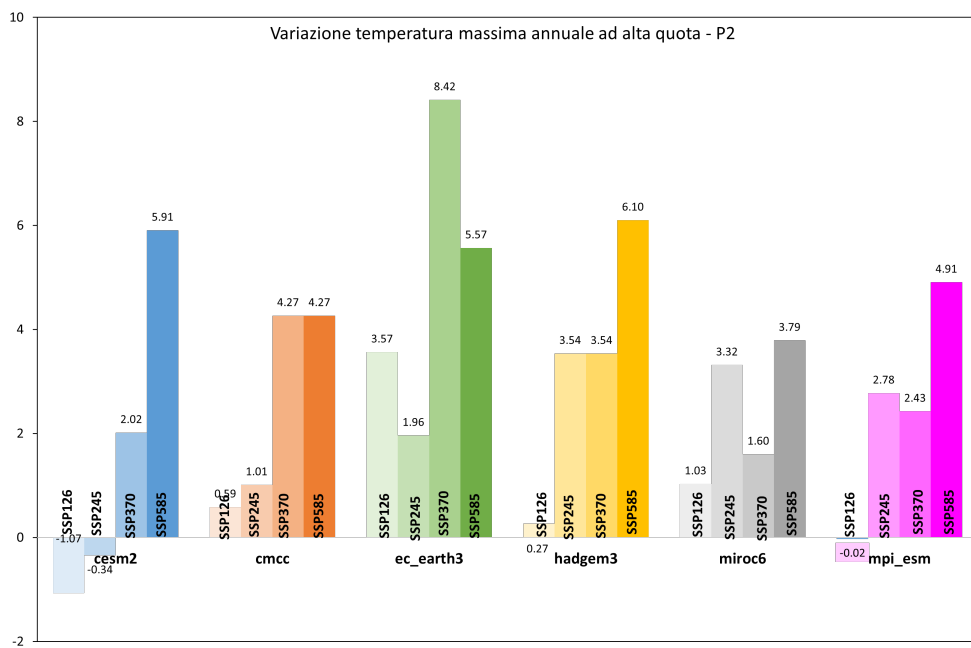


Figura 9.6: Variazione della temperatura massima nel decennio P2:2091-2100 nelle fasce ad alta quota secondo i diversi scenari dei GCM.

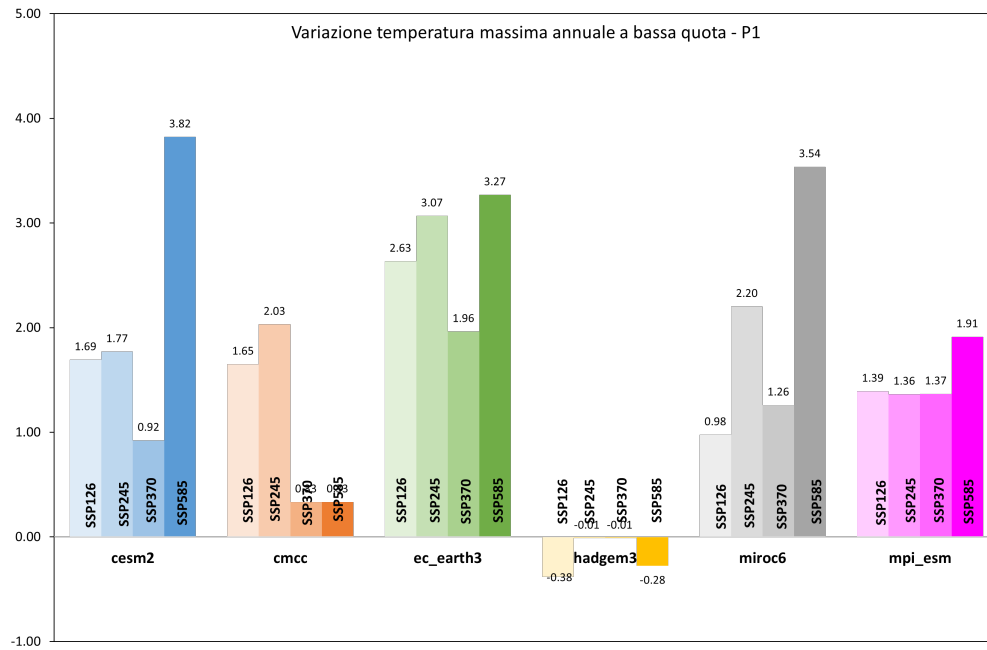


Figura 9.7: Variazione della temperatura massima nel decennio P1:2041-2050 nelle fasce a bassa quota secondo i diversi scenari dei GCM.

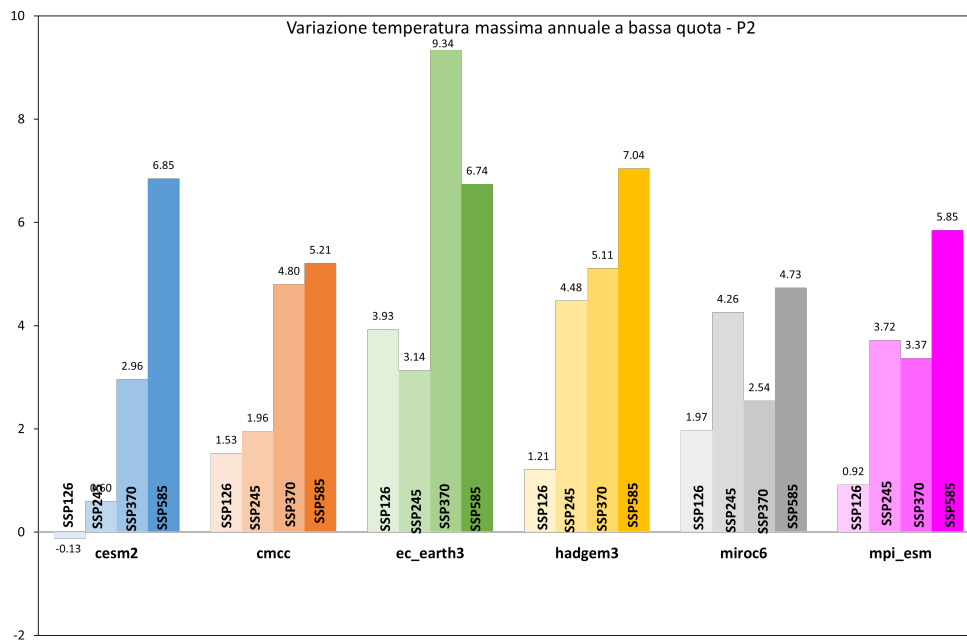


Figura 9.8: Variazione della temperatura massima nel decennio P2:2091-2100 nelle fasce a bassa quota secondo i diversi scenari dei GCM.



# Capitolo 10

## Dinamiche pascolive future

Si riportano in questo capitolo i risultati finali di produttività, LAI e biomassa simulati dai modelli climatici, durante la stagione di crescita (30 Aprile-30 Settembre) assumendo quest'ultima costante, per fascia di quota, nei decenni P1:2041-250 e P2:2091-2100.

### 10.1 Proiezioni di Produttività

Le proiezioni di produttività nei decenni 2041-2050 e 2091-2100 dipendono dallo scenario e dalla fascia di quota considerata. Questo incremento è maggiormente apprezzabile nelle zone ad alta quota, A bassa quota invece, secondo tre modelli (CMCC, HadGEM3 e MIROC6) per ognuno dei suoi scenari si registra un drastico decremento di produttività già da metà secolo. L'aumento delle temperature non colpisce negativamente la produzione di biomassa, in quanto le specie in analisi hanno un'elevata temperatura di cutoff e una forte resistenza allo stress idrico.

La produttività stimata per la fine della stagione è direttamente ricavabile dalla biomassa cumulata (Equazione 8.5), sono dunque indicatori interscambiabili. Le considerazioni sulla biomassa cumulata verranno delucidate nel paragrafo 10.2.3 e sono quindi valide anche per la produttività.

Di seguito si riportano le mappe di produttività secondo i GCM analizzati.



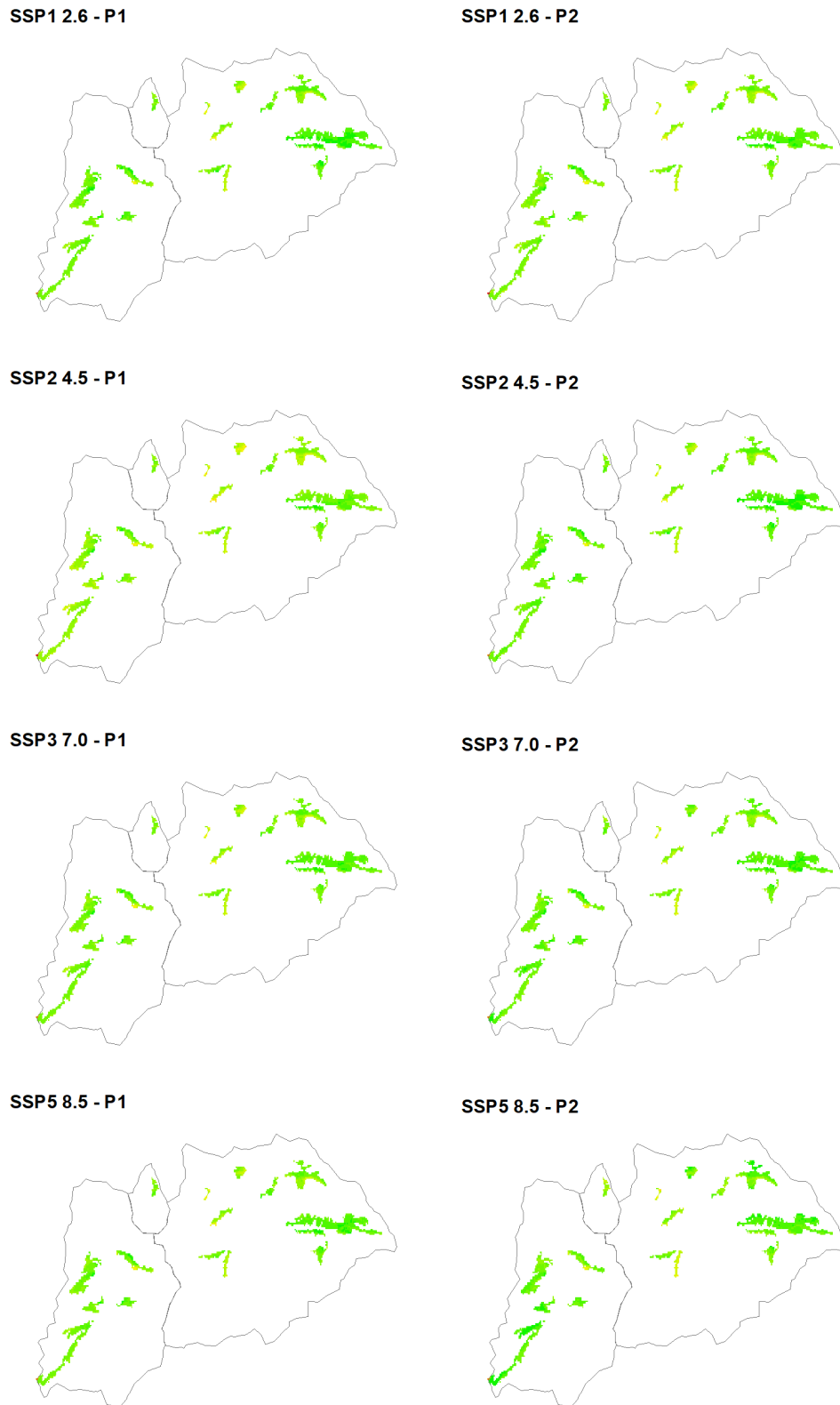


Figura 10.1: Proiezioni future di Produttività ( $tonha^{-1}$ ) nelle aree pascolive secondo il modello **CESM2** nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP.

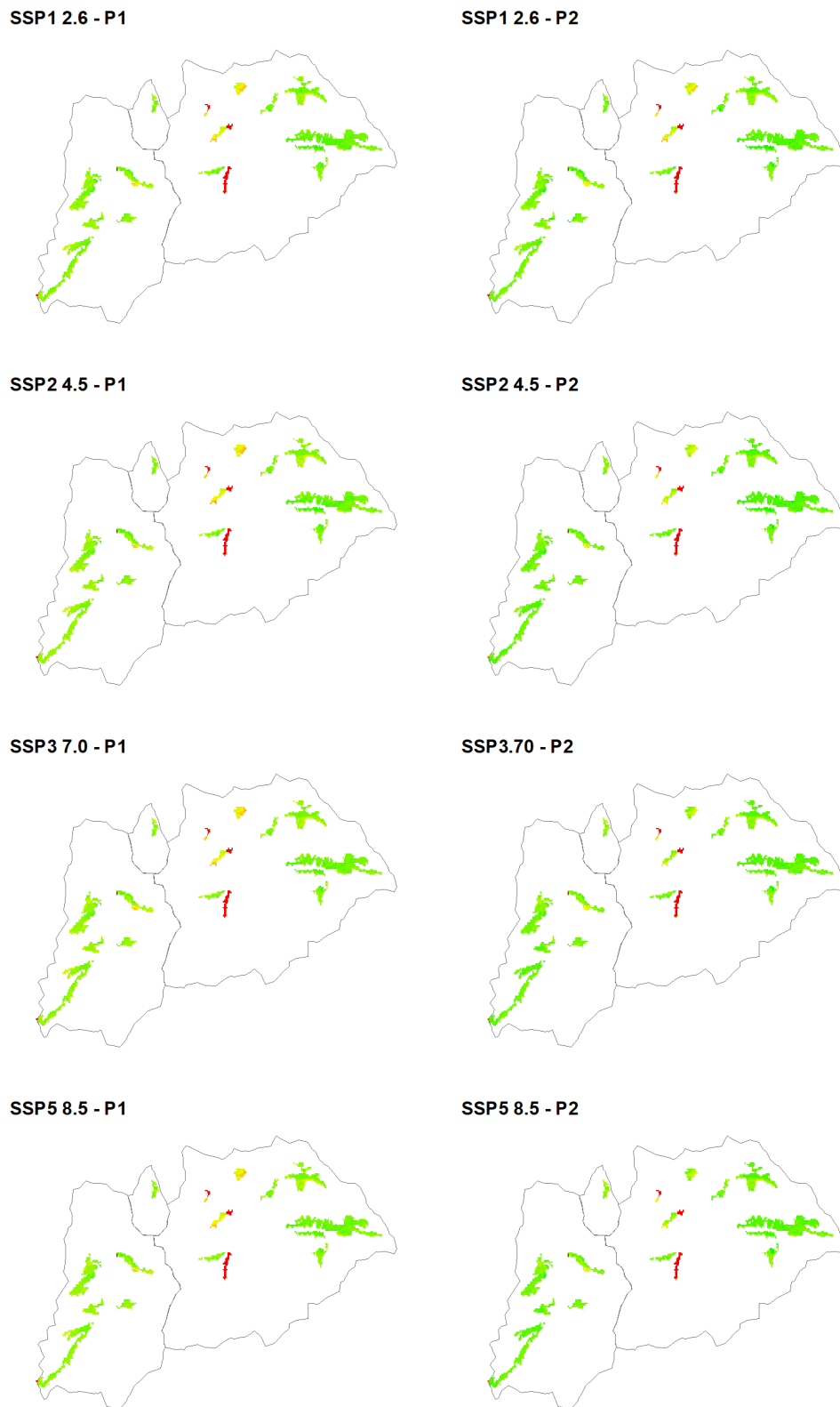


Figura 10.2: Proiezioni future di Produttività ( $tonha^{-1}$ ) nelle aree pascolive secondo il modello CMCC nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP.

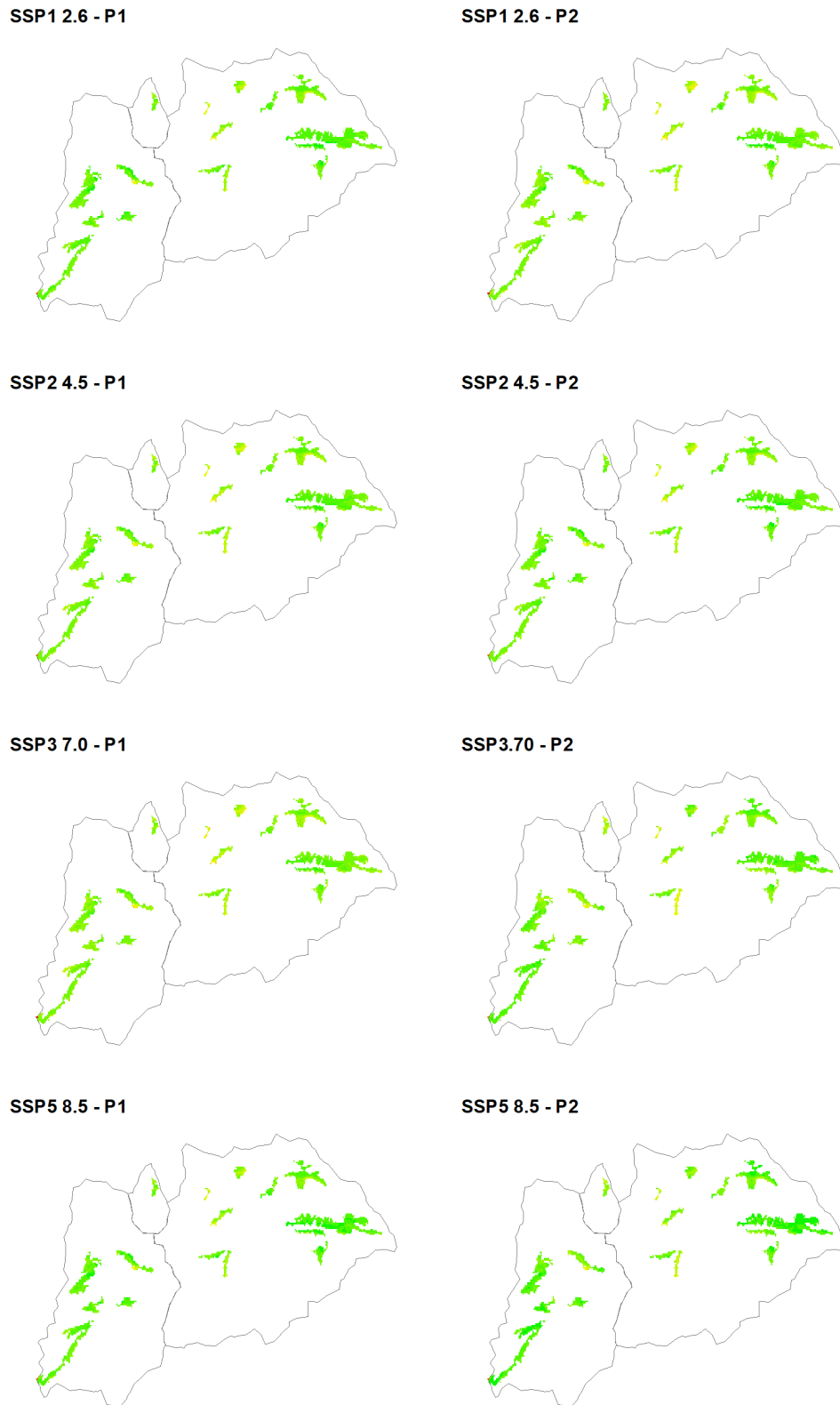
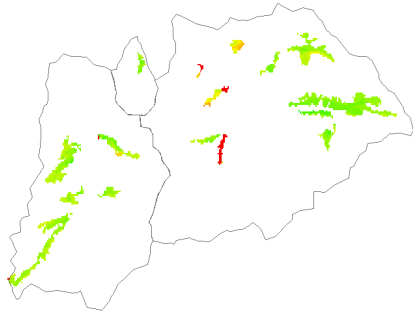
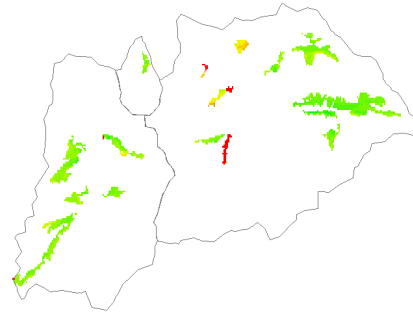


Figura 10.3: Proiezioni future di Produttività ( $tonha^{-1}$ ) nelle aree pascolive secondo il modello **EC-EARTH3** nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP.

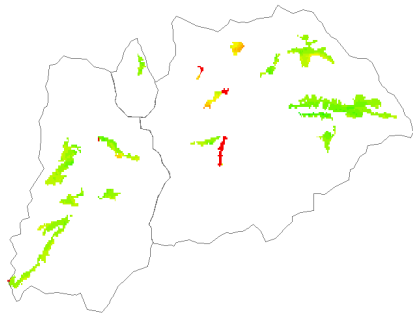
SSP1 2.6 - P1



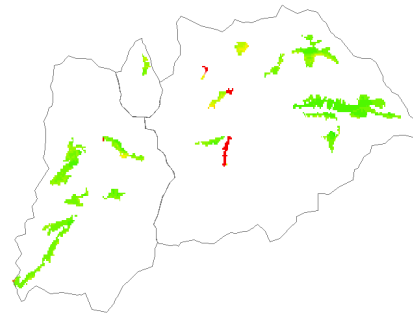
SSP1 2.6 - P2



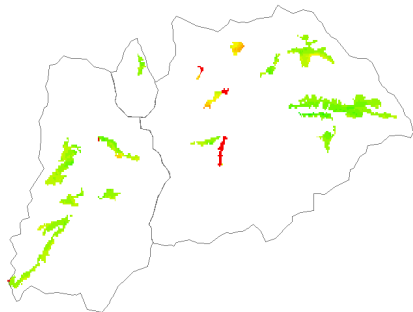
SSP2 4.5 - P1



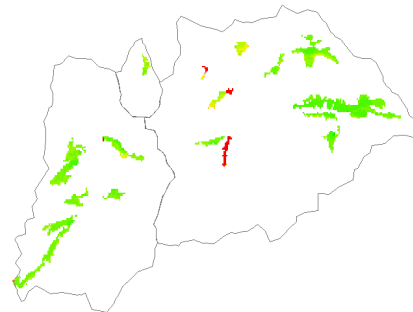
SSP2 4.5 - P2



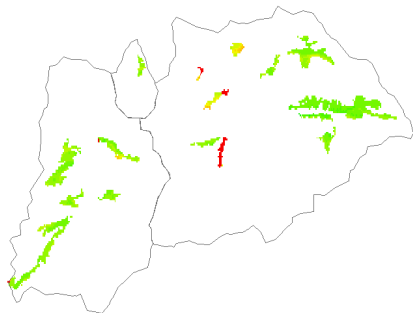
SSP3 7.0 - P1



SSP3 7.0 - P2



SSP5 8.5 - P1



SSP5 8.5 - P2

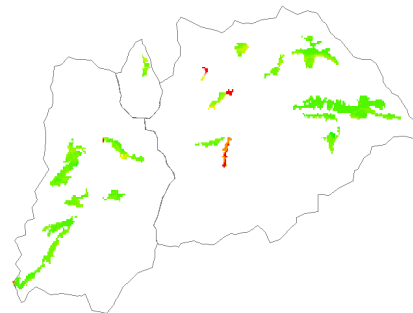


Figura 10.4: Proiezioni future di Produttività ( $tonha^{-1}$ ) nelle aree pascolive secondo il modello **HADGEM3** nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP.

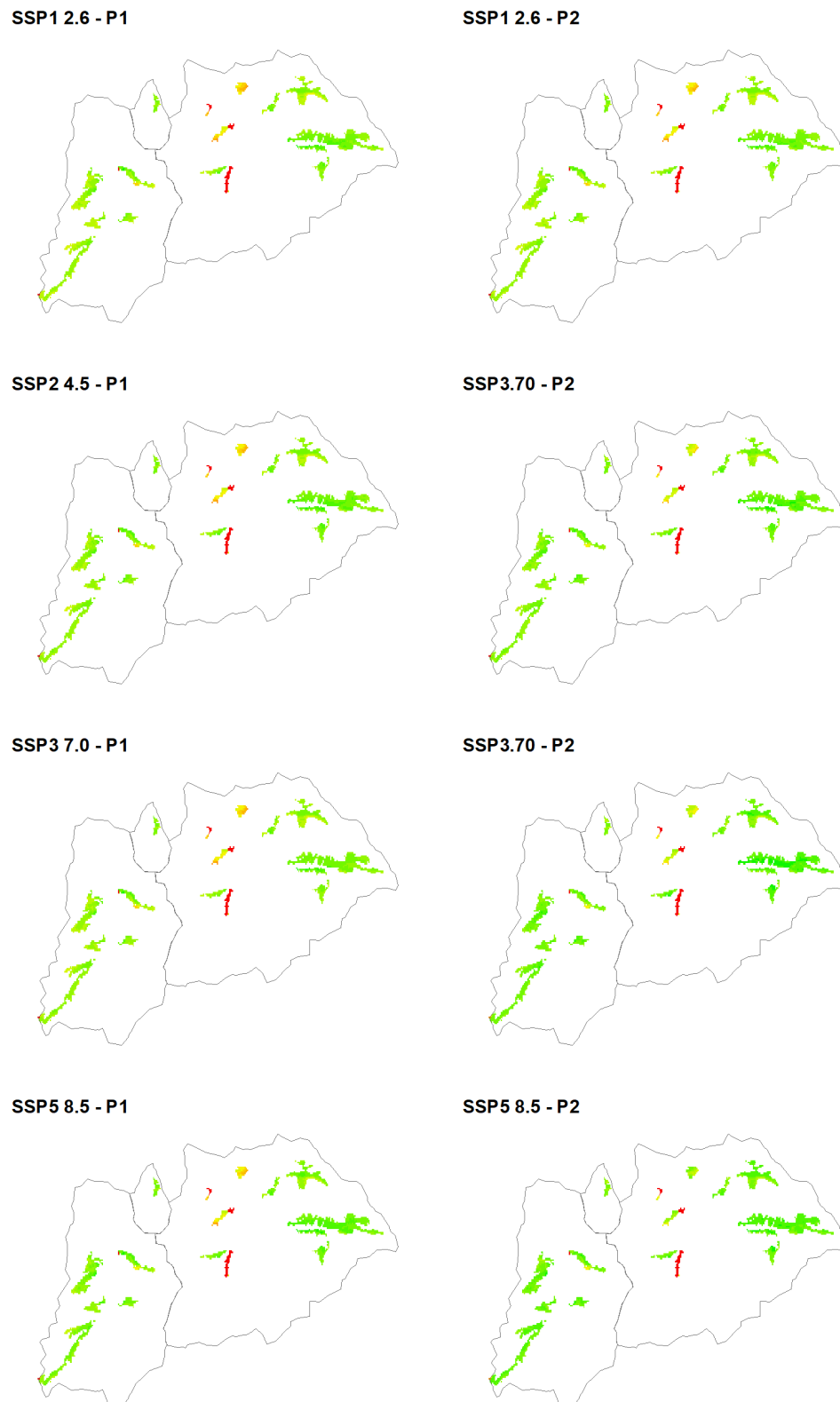


Figura 10.5: Proiezioni future di Produttività ( $tonha^{-1}$ ) nelle aree pascolive secondo il modello **MIROC6** nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto a 4 scenari SSP.

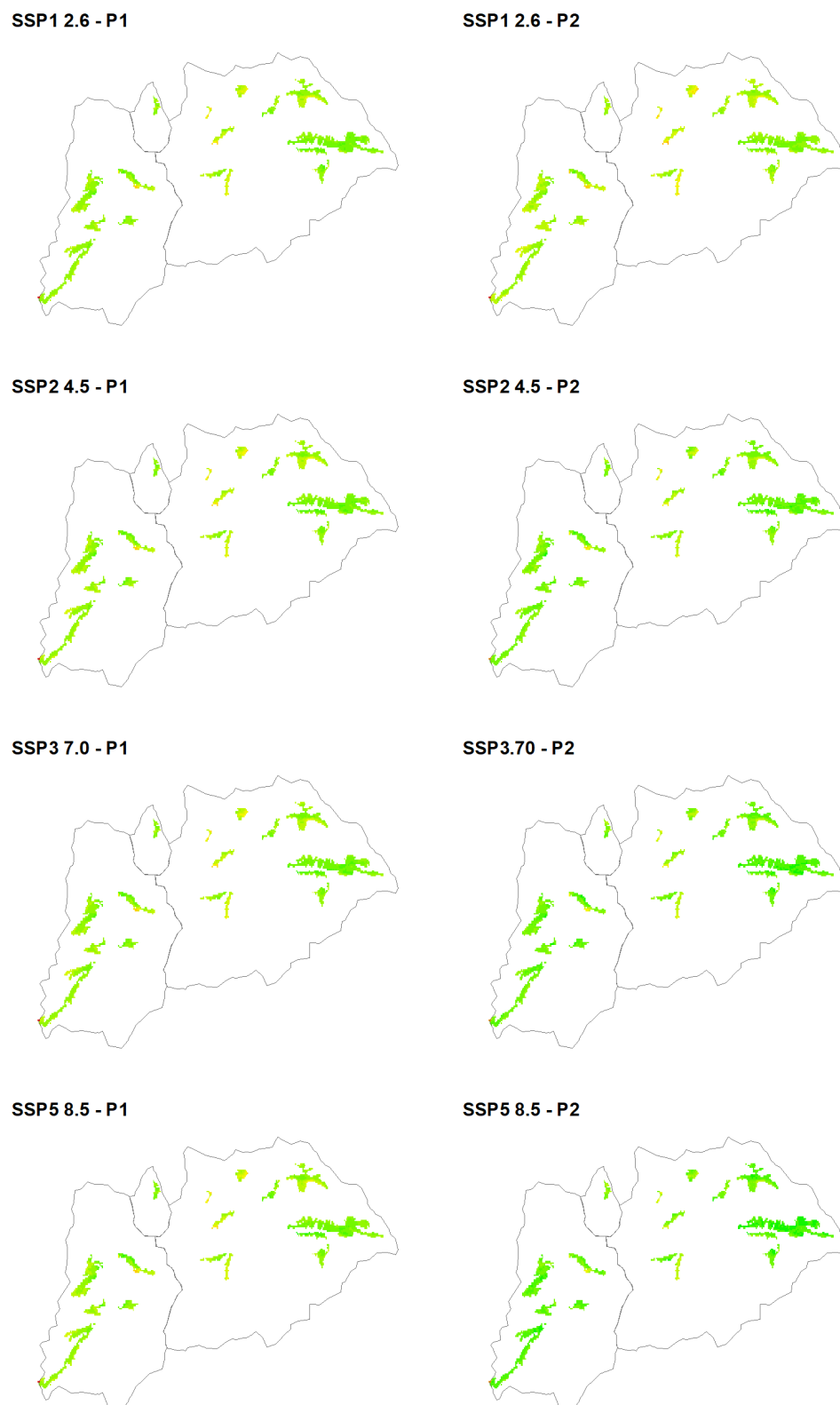


Figura 10.6: Proiezioni future di Produttività ( $tonha^{-1}$ ) nelle aree pascolive secondo il modello **MPI-ESM** nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2100 rispetto 4 scenari SSP.

### 10.1.1 Relazione tra produttività futura ed altitudine

Nel paragrafo 8.1.1 viene mostrato l'andamento della produttività in relazione all'elevazione della cella in cui essa viene calcolata. Sia a bassa che ad alta quota, ho constatato che il valore di produttività tende a diminuire all'aumentare della quota. Questo comportamento è mantenuto anche negli scenari futuri, secondo i risultati di produttività ottenuti dalle proiezioni. La maggior parte delle produttività future difatti, mantengono la tendenza di diminuire con l'altitudine. Questo trend non viene seguito solo da pochi scenari, come i due riportati in esempio in Figura 10.8: CMCC SSP5 8.5 in P1 e EC-EARTH3 SSP5 8.5 in P2.

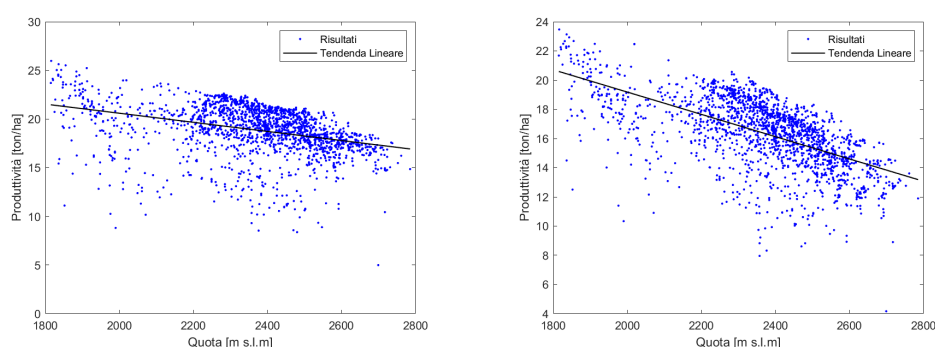


Figura 10.7: Produttività ad alta quota vs altitudine, secondo gli scenari: MIROC6 SSP3 7.0 nel decennio P1 e MPI-ESM SSP1 2.6 in P2.

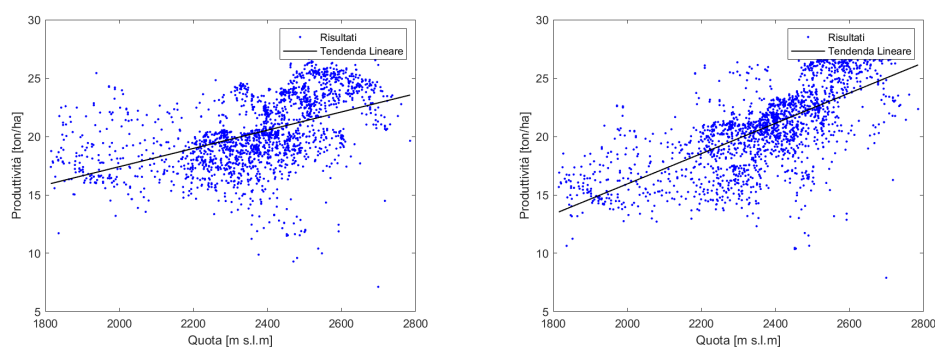


Figura 10.8: Produttività ad alta quota vs altitudine, secondo gli scenari: CMCC SSP5 8.5 nel decennio P1 e EC-EARTH3 SSP5 8.5 in P2.

A bassa quota, avendo a disposizione meno celle, è difficile ricreare un andamento, in quanto vi è maggior dispersione. Non vi è una relazione ap-



prezzabile tra altitudine e produttività. Inoltre, alcuni scenari futuri prevedono una drastica riduzione di produttività. È sufficiente constatare l'enorme perdita di produttività nei decenni futuri, piuttosto che riportare osservazioni sull'andamento in funzione della quota.

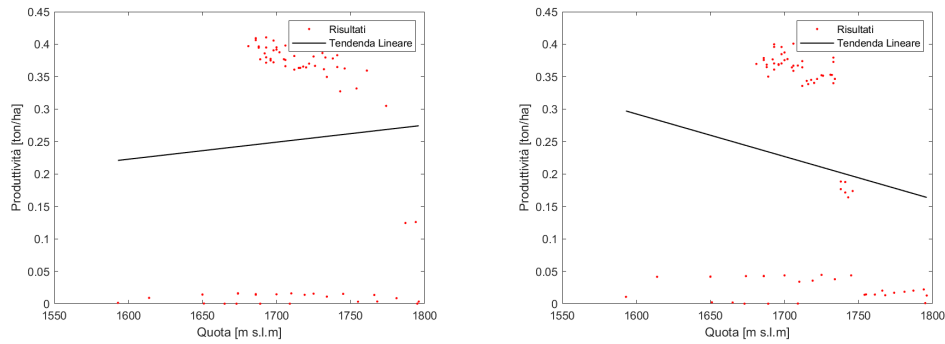


Figura 10.9: Produttività a bassa quota vs altitudine, secondo gli scenari: HADGEM3 SSP2 4.5 nel decennio P1 e HADGEM3 SSP1 2.6 in P2.

## 10.2 Proiezioni di LAI

Il LAI varia dalla primavera all'autunno, raggiunge picchi nei periodi più caldi. Si considera il valore medio stagionale, tenendo conto dei minimi di inizio e fine stagione e dei picchi dei mesi di Luglio e Agosto. Nelle Tabelle 10.1 e 10.2 vengono riportate le variazioni in percentuale del LAI rispetto al LAI medio attuale in corrispondenza degli scenari SSP considerati.

Secondo la maggior parte delle proiezioni future derivanti dai GCM, l'area fogliare è in perdita. Il decremento del LAI preannuncia la perdita del tasso di crescita  $B_r$ .

### 10.2.1 Proiezioni LAI a bassa quota

A bassa quota si registra una più notevole riduzione dell'indice LAI. È difatti in queste zone che gli scenari disegnano una perdita di biodiversità, un drastico decremento di produttività e crescita culturale. Il peggioramento delle condizioni ideali per la crescita di vegetazione autoctona a favore della crescita di piante infestanti, rende l'ambiente sempre più oligotrofico, andando a minacciare la biodiversità [?]. Sebbene il LAI a bassa quota risulti essere quasi ovunque in decrescita, vi sono scenari che prevedono un comportamento più gravoso rispetto ad altri. Si tratta dei modelli CMCC HADGEM3 e MIROC6 in ognuno dei loro scenari SSP per entrambi i decenni futuri in analisi (eccetto HADGEM3 SSP126-SSP245 per P2). Infatti in questi scenari la biomassa cumulata stimata a fine stagione è drasticamente ridotta, soprattutto nel decennio P1, per poi avere una leggera ripresa in P2.

### 10.2.2 Proiezioni LAI ad alta quota

Anche ad alta quota, si stima una riduzione in termini di area fogliare, ma meno evidente, si tratta infatti di percentuali di riduzione di LAI inferiori rispetto a quelle stimate a bassa quota. A differenza delle zone a bassa altitudine, qua non vi è perdita di produttività a fine stagione nè perdita di biodiversità. A fine stagione, secondo ogni scenario analizzato, si apprezzano valori di produttività superiori a quelli osservati in questo periodo, ma ciò porta ugualmente ad una riduzione di LAI cumulato. La correlazione tra biomassa e LAI non è lineare e non è sufficiente a spiegare l'andamento di una variabile rispetto all'altra.

Nell'Equazione 3.2, la biomassa è espressa sia a tasso giornaliero sia come biomassa cumulata. Sebbene la biomassa cumulata a fine stagione, ad alta quota, secondo le proiezioni climatiche, aumenti, la sua crescita non è costante. Vi sono infatti giornate in cui la temperatura stimata supererebbe la temperatura di cutoff, interrompendo la crescita culturale.

Modello	Scenario	Bassa quota	Alta quota	Totale
CESM2	SSP1 2.6	-2.22	-2.13	-2.18
	SSP2 4.5	+12.92	+0.51	+1.07
	SSP3 7.0	-4.11	+2.32	+1.97
	SSP5 8.5	+11.79	-9.25	-8.27
CMCC	SSP1 2.6	-31.67	+6.66	+4.74
	SSP2 4.5	-41.45	-2.49	-4.42
	SSP3 7.0	-36.64	+2.55	+0.6
	SSP5 8.5	-36.67	+4.42	+2.38
EC-EARTH3	SSP1 2.6	+12.20	-23.25	-21.56
	SSP2 4.5	-10.69	-19.15	-18.77
	SSP3 7.0	-16.86	-23.93	-21.25
	SSP5 8.5	+14.97	-12.17	-10.90
HADGEM3	SSP1 2.6	-13.39	-8.99	-9.25
	SSP2 4.5	-29.82	-10.08	-11.08
	SSP3 7.0	-29.87	-10.06	-11.07
	SSP5 8.5	-32.76	+15.33	+12.97
MIROC6	SSP1 2.6	-29.71	-4.00	-5.29
	SSP2 4.5	-36.41	+1.42	-0.47
	SSP3 7.0	-39.07	-12.78	-14.10
	SSP5 8.5	-43.15	-8.67	-10.39
MPI-ESM	SSP1 2.6	-10.37	-9.93	-10.00
	SSP2 4.5	+1.98	+2.96	+2.86
	SSP3 7.0	-2.88	+18.29	+17.21
	SSP5 8.5	+15.96	+23.81	+23.37

Tabella 10.1: Variazioni di LAI espresse in percentuale % rispetto ai valori medi attuali nel decennio P1.

Modello	Scenario	Bassa quota	Alta quota	Totale
CESM2	SSP1 2.6	+13.95	+19.58	+19.25
	SSP2 4.5	+27.20	+14.96	+15.50
	SSP3 7.0	-13.25	-6.14	-6.53
	SSP5 8.5	-17.25	-12.24	-12.54
CMCC	SSP1 2.6	-39.99	-19.55	+4.74
	SSP2 4.5	-42.62	-12.17	-13.69
	SSP3 7.0	-61.84	-32.83	-34.27
	SSP5 8.5	-61.68	-32.22	-33.68
EC-EARTH3	SSP1 2.6	+12.93	-3.97	-21.56
	SSP2 4.5	+18.43	-20.04	-18.21
	SSP3 7.0	-18.39	-26.12	-25.78
	SSP5 8.5	12.56	-19.09	-18.81
HADGEM3	SSP1 2.6	+13.95	-11.42	-9.25
	SSP2 4.5	+27.20	-10.19	-11.32
	SSP3 7.0	-13.25	-10.04	-11.17
	SSP5 8.5	-17.44	-16.69	-18.79
MIROC6	SSP1 2.6	-32.52	+0.23	-1.4
	SSP2 4.5	-22.72	-4.11	-5.06
	SSP3 7.0	-49.54	-6.25	-8.39
	SSP5 8.5	-47.27	-16.93	-18.45
MPI-ESM	SSP1 2.6	-9.00	-9.93	-9.76
	SSP2 4.5	-11.08	-2.46	-2.93
	SSP3 7.0	+13.40	+21.68	+21.22
	SSP5 8.5	+0.97	+11.57	+11.00

Tabella 10.2: Variazioni di LAI espresse in percentuale % rispetto ai valori medi attuali nel decennio P2.

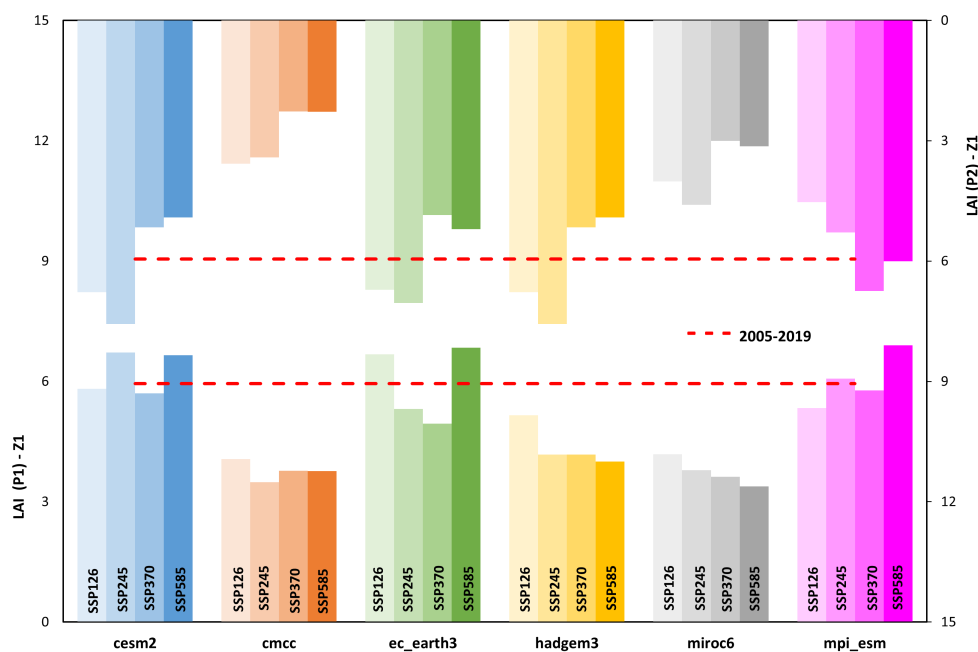


Figura 10.10: LAI medio stimato dai GCM nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2050 a bassa quota rispetto al LAI medio attuale.

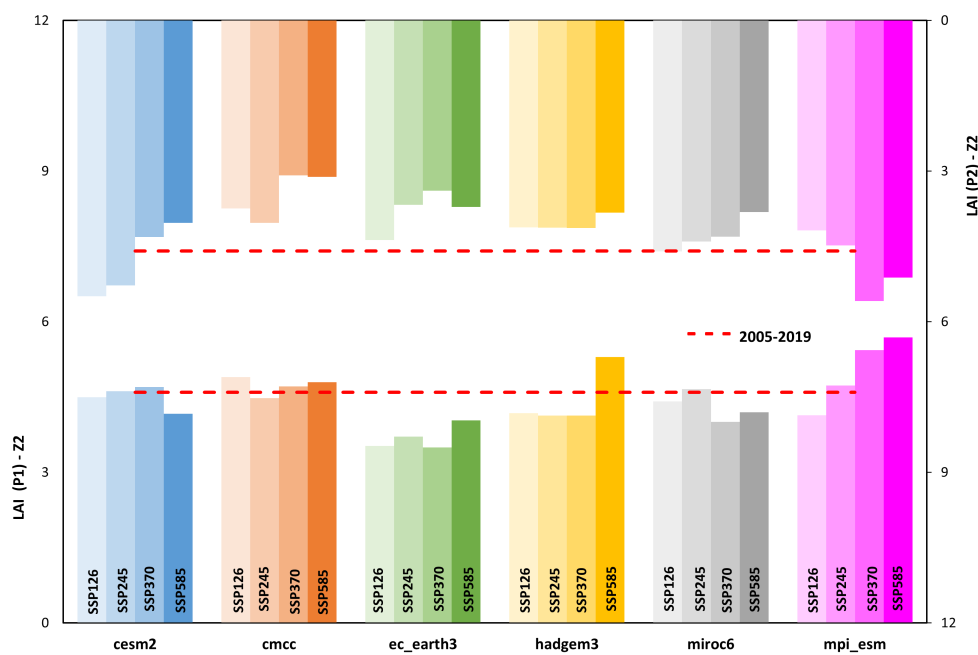


Figura 10.11: LAI medio stimato dai GCM nei decenni P1:2041-2050 e P2:2091-2050 ad alta quota rispetto al LAI medio attuale.

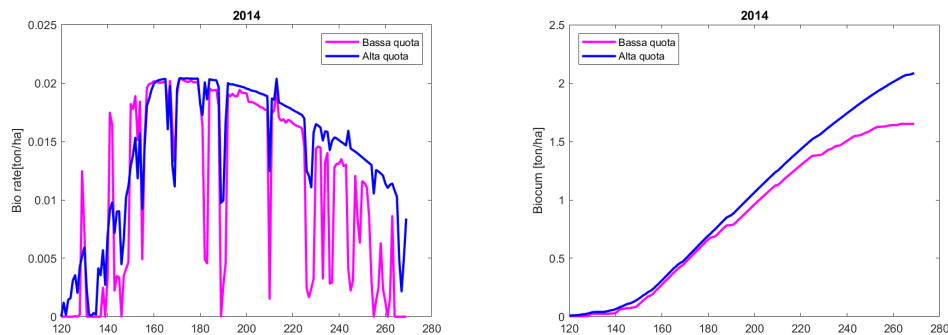


Figura 10.12: Tasso giornaliero di biomassa e biomassa cumulata durante la stagione di crescita dell'anno 2014.

### 10.2.3 Relazione con la Biomassa

Il LAI dipende strettamente dalla biomassa, è quindi necessario analizzare entrambi i comportamenti per farne una valutazione complessiva. Come riportato nel paragrafo 4.4.2, sebbene esista una correlazione tra biomassa e LAI questa non è di facile interpretazione, ed il loro legame è legato ad altri parametri. A partire dai dati di input del periodo di osservazione si calcolano il tasso di biomassa e la biomassa cumulata nella stagione di crescita. In Figura 10.12 sono riportati i valori di biomassa nel 2014.

Il tasso di biomassa preso ad esempio mostrato in Figura 10.12 è quasi sempre positivo, ha pochi valori nulli, ciò significa che la crescita di biomassa è costante. Negli scenari futuri, si apprezza un aumento della biomassa totale, ma essa non cresce giornalmente in modo costante, vi sono difatti giorni in cui la crescita di biomassa è nulla. Si riportano a titolo esemplificativo gli andamenti di biomassa ed il suo valore cumulato secondo il modello MPI-ESM SSP1 2.6 nell'anno 2050 (Figura 10.13) e secondo il modello HADGEM3 SSP 5 8.5 nell'anno 2100 (Figura 10.14).

Secondo alcuni scenari, per alcuni anni di simulazione, la crescita di biomassa a bassa quota è del tutto assente. È il caso, ad esempio, dello scenario SSP2 4.5 modello CMCC nell'anno 2050, come si apprezza in Figura 10.15.

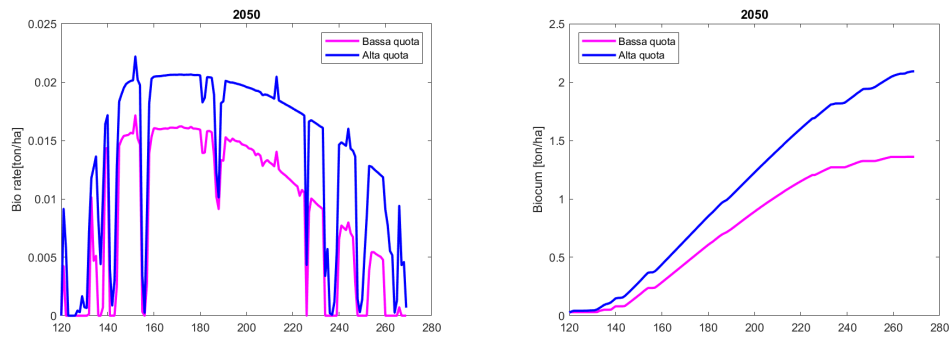


Figura 10.13: Tasso giornaliero di biomassa e biomassa cumulata durante la stagione di crescita dell'anno 2050 simulato da MPI-ESM SSP1 2.6.

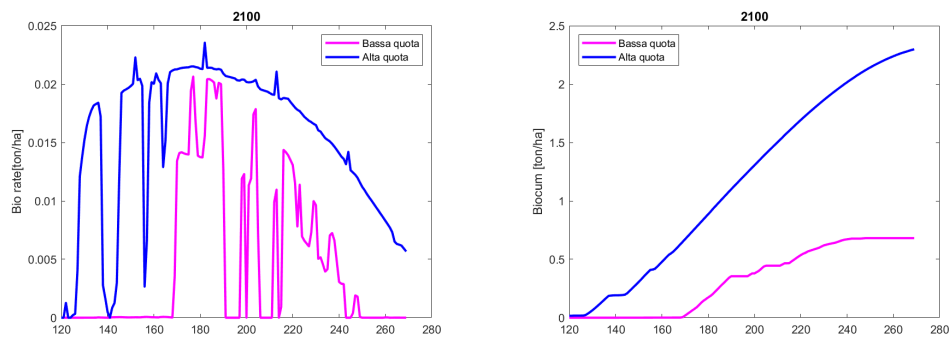


Figura 10.14: Tasso giornaliero di biomassa e biomassa cumulata durante la stagione di crescita dell'anno 2100 simulato da HADGEM3 SSP5 8.5.

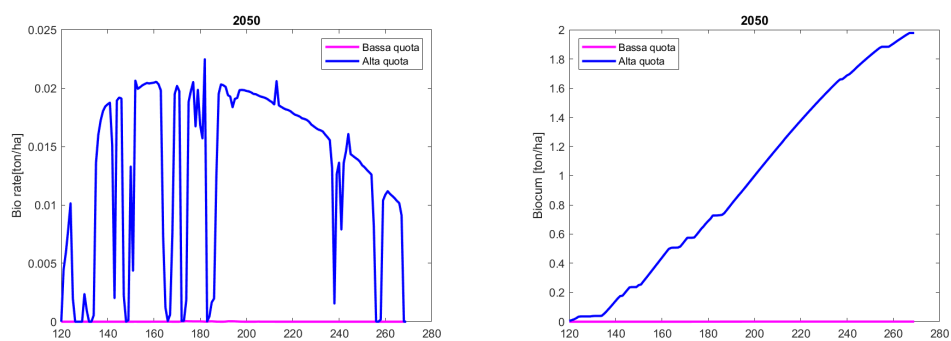


Figura 10.15: Tasso giornaliero di biomassa e biomassa cumulata durante la stagione di crescita dell'anno 2050 simulato da CMCC SSP2 4.5.





# Capitolo 11

## Proiezioni degli indicatori Agro-Climatici

In questo capitolo vengono riportati i nuovi indicatori agro-climatici, introdotti nel Paragrafo 8, descritti in Tabella 8.1, secondo le proiezioni climatiche fornite dai modelli GCM. Non tutti gli indicatori mostrano cambiamenti apprezzabili nel tempo. Gli indicatori più sensibili ai cambiamenti climatici sono quelli legati alla temperatura, quindi *AC7* ed *AC9*, mentre gli indicatori di biodiversità, *AC8* sono pressoché invariati rispetto al presente.

Gli indicatori *AC1* [precipitazioni intense] ed *AC2* [precipitazioni cumulate] tendono a decrescere nel corso degli anni secondo la maggior parte degli scenari analizzati. Durante la stagione di crescita, i giorni di precipitazione intensa sono inferiori rispetto al presente e la precipitazione cumulata decresce. Si passa da 370 mm di altezza di pioggia cumulata a bassa quota e 503 mm ad alta quota a valori molto inferiori, soprattutto nel decennio P2, dove la precipitazione cumulata media simulata è al di sotto di 200 mm/stagione a bassa quota e 300 mm/stagione ad alta quota. Il regime pluviometrico è sub-litorale (2.2), caratterizzato dunque da picchi di precipitazione nelle stagioni primaverili e autunnali, ed estati meno piovose. Secondo le future proiezioni climatiche, questo comportamento tende ad accentuarsi.

L'indicatore *AC3*, ovvero il rapporto tra evapotraspirazione e precipitazione cumulate durante la stagione [ET/P], aumenta a bassa quota e decresce ad alta quota. Ciò è giustificato dal calo delle precipitazioni soprattutto a bassa quota ed anche dall'aumentare dell'evapotraspirazione potenziale legata alla temperatura. La vegetazione presente a bassa quota è costretta a sfruttare più acqua piovana possibile per la traspirazione, la quale è presente in minor disponibilità. Le precipitazioni ad alta quota invece rimangono abbastanza

elevate, seppur in decrescita rispetto al presente.

L'indicatore *AC4* rappresenta la produttività [Y]. Come mostrato nelle Figure 10.1-10.6, si verifica un netto calo di produttività nelle aree pascolive a bassa quota, a causa della perdita di biomassa, mentre ad alta quota si stimano notevoli incrementi di biomassa disponibile per il raccolto, quindi produttività. Questo indicatore è l'unico che segna risultati discordi a seconda del modello GCM considerato. Secondo i modelli CMCC, HADGEM3 e MIROC6, per qualsiasi scenario, la produttività sperimenterà una perdita sostanziale, dirigendosi verso le aree di maggior altitudine. Invece, secondo gli altri modelli (quindi CESM2, EC-EARTH3 e MPI-ESM) anche a bassa quota, la produttività si mantiene pressoché invariata. Questa discrepanza tra proiezioni è causata dalle diverse ipotesi di partenza alla base dei modelli di circolazione. Verosimilmente, tutti i modelli eccetto HADGEM3 concordano sulle proiezioni di produttività ad alta quota: è prevista crescita di biomassa ovunque, fino al 15% di più rispetto al presente. Tuttavia, il calo di produttività ad alta quota nel decennio P1, proiettato da HADGEM3, non superiore al 2%.

L'aumento di produttività, comporta una riduzione dell'indicatore *AC5*, ovvero rapporto tra evapotraspirazione e produttività [ET/Y]. Questo indicatore non è valutabile in quegli scenari dove si verifica la quasi totale perdita di produttività, ovvero gli scenari dei modelli CMCC, HADGEM3 e MIROC6 valutati a bassa quota.

L'indicatore *AC6*, rapporto tra evapotraspirazione effettiva e potenziale [ET/ETP], secondo la maggior parte degli scenari, diminuisce. L'indica-

re *AC7* [onde di calore] fornisce indicazioni sull'aumento delle temperature. Questo indicatore è sempre in crescita, tutt'al più costante, segno che sono ovunque stimate temperature superiori rispetto al presente. La proiezione del modello HADGEM SSP5 8.5 prevede il superamento della temperatura di cutoff in media 3 volte a stagione, sia a bassa che ad alta quota. Tali temperature (superiori a 28 °C) non sono mai state sperimentate fino ad ora a tali altitudini. Gli indici biodiversità di Shannon e Simpson, indicati con *AC8a* [Sh] e *AC8b*

[Si] diminuiscono sempre a bassa quota e aumentano ad alta quota. Tuttavia, le variazioni di biodiversità simulate sono impercettibili, trascurabili. La presenza relativa delle due specie rimane approssimativamente la stessa media attuale: 34% *Dactylis Glomerata* e 66% *Trifolium Alpinum* a bassa quota; 32% *Festuca Rubra* e 68% *Nardus Stricta* ad alta quota. Nel paragrafo 8.2.1, è stato riportato il grafico dell'andamento della presenza relativa delle due specie

in competizione per fascia di quota in funzione dell'altitudine. Si riportano due scenario come esempio in Figura 11.1. Per le aree ad alta quota, vi è divergenza tra le presenze delle due specie al salir di quota, mentre per le aree a bassa quota, non c'è un gradiente altitudinale apprezzabile. In ogni caso, non si tratta di importanti predominanze di una specie sull'altra, c'è sempre la stessa marcata distinzione tra le due specie, qualsiasi sia il periodo e lo scenario analizzato.

Gli indicatori agrometeo *AC9* crescono notevolmente secondo ogni proiezione simulata. Essendo un parametro dipendente unicamente dalle temperature medie e massime era sicuramente previsto un aumento di questi indicatori. Dato che l'aumento di *AC9b* [Huglin] è ancora maggiore dell'aumento di *ACa* [Winkler], ci si aspetta un incremento delle temperature massime più significativo rispetto all'aumento delle temperature medie, come verificato nel Capitolo 9. Secondo le proiezioni di CESM2 SSP2 4.5, CMCC1 2.6 e MIROC6 SSP2 4.5 ad esempio, i valori dell'indicatore *AC9a* ad alta quota appartiene si avvicinano molto all'*AC9a* medio presente a bassa quota. Ciò significa che le condizioni climatiche favorevoli per la crescita di pascolo, attualmente riscontrabili a bassa quota, potrebbero scomparire all'attuale posizione e verificarsi solo ad altitudini superiori, quindi si può pensare ad un ricollocamento dei pascoli. Il discorso può essere esteso alla viticoltura, dato che gli indicatori Winkler e Huglin sono stati in origine introdotti a tale scopo.

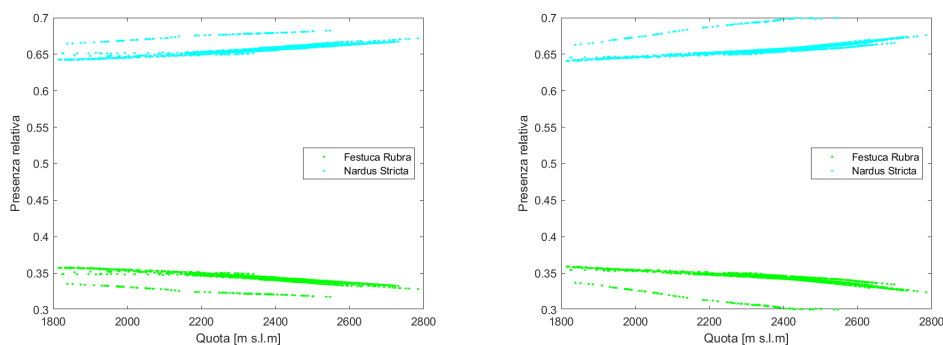


Figura 11.1: Presenza relativa delle due specie vs altitudine, secondo gli scenari: MIROC6 SSP2 4.5 nel decennio P1 e HADGEM SSP1 2.6 in P2.

<b>AC1-Giorni con <math>P &gt; 10</math> mm</b>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	-4.88	-27.74	-3.86	-9.32
	SSP2 4.5	-27.74	-19.51	-22.95	-22.95
	SSP3 7.0	-25.00	-56.10	-26.36	-49.55
	SSP5 8.5	-33.23	-53.35	-36.59	-50.23
CMCC	SSP1 2.6	-20.43	17.99	2.95	14.55
	SSP2 4.5	-4.88	0.61	-3.86	15.23
	SSP3 7.0	-11.28	-7.62	-0.45	-1.82
	SSP5 8.5	-14.02	-21.34	-10.68	-7.27
EC-EARTH3	SSP1 2.6	-14.02	-8.54	-18.18	0.23
	SSP2 4.5	1.52	-14.02	-9.32	-10.68
	SSP3 7.0	-6.71	-24.09	-3.86	-24.32
	SSP5 8.5	-10.37	-16.77	-10.00	-11.36
HADGEM3	SSP1 2.6	-6.71	-17.68	-7.27	-4.55
	SSP2 4.5	0.61	-25.91	7.73	-24.32
	SSP3 7.0	5.18	-29.57	5.00	-14.09
	SSP5 8.5	-14.02	-50.61	-7.27	-44.77
MIROC6	SSP1 2.6	-23.17	-18.60	-3.86	-12.05
	SSP2 4.5	-11.28	-30.49	-3.86	-26.36
	SSP3 7.0	-9.45	-21.34	-7.27	-14.09
	SSP5 8.5	-24.09	-26.83	-23.64	-27.05
MPI-ESM	SSP1 2.6	-13.11	-20.43	-3.18	-19.55
	SSP2 4.5	-20.43	-22.26	-26.36	-24.32
	SSP3 7.0	-3.96	-29.57	-0.45	-17.50
	SSP5 8.5	1.52	-13.11	0.23	-14.09

Tabella 11.1: Variazione in percentuale % dell'indicatore **AC1** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

<i>AC2-P cumulata</i>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	-5.85	-19.19	-6.04	-18.69
	SSP2 4.5	-16.11	-22.14	-15.58	-22.52
	SSP3 7.0	-17.03	-44.70	-16.00	-44.40
	SSP5 8.5	-27.15	-42.49	-26.78	-43.18
CMCC	SSP1 2.6	-4.20	13.00	-4.06	13.06
	SSP2 4.5	-7.23	4.44	-6.97	5.87
	SSP3 7.0	-9.61	-11.14	-9.86	-10.87
	SSP5 8.5	-6.06	-10.19	-5.66	-10.75
EC-EARTH3	SSP1 2.6	-13.40	-0.68	-13.31	-0.68
	SSP2 4.5	-5.05	-10.75	-5.47	-10.36
	SSP3 7.0	-2.35	-18.79	-1.99	-18.07
	SSP5 8.5	-12.00	-10.52	-10.71	-12.34
HADGEM3	SSP1 2.6	-11.64	-9.89	-12.19	-8.60
	SSP2 4.5	-3.52	-20.58	-5.50	-20.86
	SSP3 7.0	-4.13	-22.26	-5.42	-21.05
	SSP5 8.5	-9.11	-39.53	-8.74	-39.62
MIROC6	SSP1 2.6	-10.20	-11.52	-10.10	-13.37
	SSP2 4.5	-5.47	-21.71	-4.71	-21.75
	SSP3 7.0	-11.90	-17.55	-10.86	-18.05
	SSP5 8.5	-23.17	-24.22	-23.92	-21.74
MPI-ESM	SSP1 2.6	-9.02	-14.06	-11.50	-13.51
	SSP2 4.5	-19.81	-22.02	-20.77	-22.03
	SSP3 7.0	-3.33	-24.51	-4.42	-23.60
	SSP5 8.5	-0.85	-23.26	-0.52	-22.99

Tabella 11.2: Variazione in percentuale % dell'indicatore **AC2** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

<b>AC3-ET/P</b>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	4.19	8.58	-3.76	7.57
	SSP2 4.5	6.44	2.96	5.01	0.63
	SSP3 7.0	3.65	-4.15	1.94	-3.92
	SSP5 8.5	3.89	-7.39	0.89	-12.33
CMCC	SSP1 2.6	1.23	6.97	0.00	-4.39
	SSP2 4.5	1.09	4.14	-3.79	-5.44
	SSP3 7.0	1.88	2.95	-1.21	-8.16
	SSP5 8.5	2.62	6.31	-6.63	-3.16
EC-EARTH3	SSP1 2.6	5.30	7.76	-1.33	-0.77
	SSP2 4.5	5.14	6.39	4.48	3.53
	SSP3 7.0	1.80	-4.54	-2.29	-9.22
	SSP5 8.5	-2.62	-1.91	-2.80	-12.02
HADGEM3	SSP1 2.6	3.73	2.39	-0.18	-8.17
	SSP2 4.5	1.07	-1.76	-2.31	-7.39
	SSP3 7.0	1.34	2.80	-1.08	-6.23
	SSP5 8.5	-2.38	-7.64	-7.60	-18.19
MIROC6	SSP1 2.6	5.34	-1.40	2.95	-2.09
	SSP2 4.5	-1.95	4.21	-5.19	3.82
	SSP3 7.0	5.36	0.30	5.28	-2.76
	SSP5 8.5	1.60	-2.38	6.88	-12.53
MPI-ESM	SSP1 2.6	0.26	3.52	10.73	15.05
	SSP2 4.5	2.98	-6.82	2.63	-1.25
	SSP3 7.0	-6.43	-5.31	-7.91	-10.54
	SSP5 8.5	0.74	-4.51	-9.07	-14.63

Tabella 11.3: Variazione in percentuale % dell'indicatore **AC3** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

<b>AC4 - Y</b>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	13.14	8.97	13.90	9.39
	SSP2 4.5	7.32	12.77	4.08	14.29
	SSP3 7.0	9.85	8.21	10.31	13.79
	SSP5 8.5	14.17	0.23	11.50	15.21
CMCC	SSP1 2.6	-97.44	-98.23	4.34	8.97
	SSP2 4.5	-99.02	-95.92	2.84	12.75
	SSP3 7.0	-98.02	-91.33	1.82	10.50
	SSP5 8.5	-98.03	-91.27	2.00	10.82
EC-EARTH3	SSP1 2.6	16.54	7.96	13.59	7.99
	SSP2 4.5	10.61	14.28	9.39	11.58
	SSP3 7.0	11.03	-1.38	6.57	12.37
	SSP5 8.5	18.58	9.76	15.81	18.36
HADGEM3	SSP1 2.6	-96.88	-97.65	-3.01	3.65
	SSP2 4.5	-96.05	-93.48	-2.59	8.40
	SSP3 7.0	-96.06	-93.48	-2.63	8.57
	SSP5 8.5	-97.78	-65.67	2.71	12.23
MIROC6	SSP1 2.6	-99.94	-99.37	-1.73	0.13
	SSP2 4.5	-99.86	-98.41	1.67	6.72
	SSP3 7.0	-99.49	-96.73	-0.28	11.85
	SSP5 8.5	-99.42	-85.98	5.63	13.22
MPI-ESM	SSP1 2.6	-2.16	-9.92	0.08	-4.11
	SSP2 4.5	-0.66	5.14	0.00	7.55
	SSP3 7.0	-2.50	6.04	1.28	12.34
	SSP5 8.5	1.18	10.09	0.27	16.47

Tabella 11.4: Variazione in percentuale % dell'indicatore **AC4** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

<b>AC5-ET/Y</b>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	-13.66	-19.27	-18.63	-19.75
	SSP2 4.5	-16.46	-27.16	-12.10	-31.39
	SSP3 7.0	-21.08	-50.81	-21.78	-52.61
	SSP5 8.5	-33.71	-42.94	-32.24	-54.82
CMCC	SSP1 2.6	-	-	-7.79	1.38
	SSP2 4.5	-	-	-11.75	-10.25
	SSP3 7.0	-	-	-11.46	-24.33
	SSP5 8.5	-	-	-11.19	-18.68
EC-EARTH3	SSP1 2.6	-20.85	-1.34	-21.62	-5.75
	SSP2 4.5	-10.12	-17.46	-8.12	-14.77
	SSP3 7.0	-11.10	-20.94	-8.16	-32.78
	SSP5 8.5	-27.10	-19.45	-24.66	-32.68
HADGEM3	SSP1 2.6	-	-	-5.25	-15.53
	SSP2 4.5	-	-	-4.13	-30.53
	SSP3 7.0	-	-	-2.92	-29.93
	SSP5 8.5	-	-	-14.76	-53.75
MIROC6	SSP1 2.6	-	-	-6.20	-12.92
	SSP2 4.5	-	-	-9.99	-24.59
	SSP3 7.0	-	-	-4.38	-25.96
	SSP5 8.5	-	-	-21.85	-37.47
MPI-ESM	SSP1 2.6	-7.64	-0.96	-8.03	-1.97
	SSP2 4.5	-16.72	-31.19	-17.91	-30.61
	SSP3 7.0	-8.17	-32.80	-10.21	-38.96
	SSP5 8.5	0.30	-33.51	-6.21	-40.96

Tabella 11.5: Variazione in percentuale % dell'indicatore **AC5** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM



<b>AC6-ET/ETP</b>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	-6.80	-16.34	-13.67	-18.25
	SSP2 4.5	-12.85	-26.40	-12.96	-30.32
	SSP3 7.0	-20.40	-52.47	-22.13	-53.09
	SSP5 8.5	-29.67	-53.84	-30.86	-58.78
CMCC	SSP1 2.6	-6.93	10.66	-11.28	-3.90
	SSP2 4.5	-11.66	0.35	-15.24	-10.75
	SSP3 7.0	-11.16	-18.65	-15.60	-29.89
	SSP5 8.5	-8.34	-17.58	-17.47	-28.29
EC-EARTH3	SSP1 2.6	-11.91	3.60	-17.66	-3.96
	SSP2 4.5	-1.81	-9.84	-5.57	-13.48
	SSP3 7.0	-2.83	-28.17	-8.11	-34.53
	SSP5 8.5	-18.02	-19.93	-20.29	-32.71
HADGEM3	SSP1 2.6	-6.33	-9.64	-11.01	-18.45
	SSP2 4.5	-1.38	-26.95	-8.74	-33.70
	SSP3 7.0	-2.18	-26.25	-7.84	-33.13
	SSP5 8.5	-10.92	-51.20	-16.54	-58.74
MIROC6	SSP1 2.6	-5.02	-9.15	-10.34	-14.55
	SSP2 4.5	-9.80	-21.75	-13.67	-25.82
	SSP3 7.0	-4.19	-20.06	-6.65	-25.17
	SSP5 8.5	-21.94	-34.06	-22.54	-40.75
MPI-ESM	SSP1 2.6	-11.03	-6.77	-10.74	-5.45
	SSP2 4.5	-18.29	-28.66	-18.62	-28.84
	SSP3 7.0	-6.94	-31.07	-8.91	-35.52
	SSP5 8.5	3.59	-32.67	-4.04	-39.70

Tabella 11.6: Variazione in percentuale % dell'indicatore **AC6** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

<b>AC7a - <math>T &gt; 60\% T_{cutoff}</math></b>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	10.37	13.77	3.37	6.67
	SSP2 4.5	4.07	22.17	1.57	10.67
	SSP3 7.0	13.97	55.07	6.57	41.17
	SSP5 8.5	25.17	94.97	14.57	80.87
CMCC	SSP1 2.6	13.67	15.77	11.77	13.07
	SSP2 4.5	11.37	27.47	9.07	23.47
	SSP3 7.0	16.77	53.47	14.87	47.67
	SSP5 8.5	16.77	53.47	14.87	47.67
EC-EARTH3	SSP1 2.6	21.87	8.37	11.97	4.67
	SSP2 4.5	12.37	32.27	7.27	20.17
	SSP3 7.0	17.57	78.77	10.57	65.37
	SSP5 8.5	30.17	86.07	18.87	74.77
HADGEM3	SSP1 2.6	16.27	14.87	13.57	11.67
	SSP2 4.5	14.47	36.27	12.17	31.07
	SSP3 7.0	14.47	36.27	12.17	31.07
	SSP5 8.5	19.07	93.37	14.37	89.17
MIROC6	SSP1 2.6	4.67	12.47	3.07	7.97
	SSP2 4.5	9.37	20.77	5.27	14.47
	SSP3 7.0	8.47	39.07	5.67	30.37
	SSP5 8.5	14.37	64.17	10.97	55.77
MPI-ESM	SSP1 2.6	11.17	3.97	6.07	1.87
	SSP2 4.5	12.87	32.67	4.47	18.87
	SSP3 7.0	13.37	44.07	5.87	32.27
	SSP5 8.5	13.07	66.47	5.97	56.17

Tabella 11.7: Variazione assoluta dell'indicatore **AC7a** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

<b>AC7b - <math>T &gt; 80\% T_{cutoff}</math></b>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	0	0	0	0
	SSP2 4.5	0	0	0	0
	SSP3 7.0	0	6.5	0	3.9
	SSP5 8.5	0	29	0	19.8
CMCC	SSP1 2.6	1	0	1	0
	SSP2 4.5	0.20	1.10	0.10	1.00
	SSP3 7.0	0.10	6.10	0	5.50
	SSP5 8.5	0.10	6.10	0	5.50
EC-EARTH3	SSP1 2.6	0	0	0	0
	SSP2 4.5	0	1.20	0	0.50
	SSP3 7.0	0.10	17.80	0	11.50
	SSP5 8.5	1.20	26.70	0	21.40
HADGEM3	SSP1 2.6	0.40	0.30	0.20	0
	SSP2 4.5	0.10	1.90	0.10	1.20
	SSP3 7.0	0.10	1.90	0.10	1.20
	SSP5 8.5	0	39.50	0	35.50
MIROC6	SSP1 2.6	0	0	0	0
	SSP2 4.5	0	0	0	0
	SSP3 7.0	0.20	0	0.10	0
	SSP5 8.5	0	4.80	0	3.60
MPI-ESM	SSP1 2.6	0.20	0	0.10	0
	SSP2 4.5	0	0	0	0
	SSP3 7.0	0	2.60	0	1.60
	SSP5 8.5	0	8.40	0	5

Tabella 11.8: Variazione assoluta dell'indicatore **AC7b** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

<b>AC7c - <math>T &gt; T_{cutoff}</math></b>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	0	0	0	0
	SSP2 4.5	0	0	0	0
	SSP3 7.0	0	0	0	0
	SSP5 8.5	0	0	0	0
CMCC	SSP1 2.6	0	0	0	0
	SSP2 4.5	0	0	0	0
	SSP3 7.0	0	0	0	0
	SSP5 8.5	0	0	0	0
EC-EARTH3	SSP1 2.6	0	0	0	0
	SSP2 4.5	0	0	0	0
	SSP3 7.0	0	0	0	0
	SSP5 8.5	0	2	0	2
HADGEM3	SSP1 2.6	0	0	0	0
	SSP2 4.5	0	0	0	0
	SSP3 7.0	0	0	0	0
	SSP5 8.5	0	3	0	3
MIROC6	SSP1 2.6	0	0	0	0
	SSP2 4.5	0	0	0	0
	SSP3 7.0	0	0	0	0
	SSP5 8.5	0	0	0	0
MPI-ESM	SSP1 2.6	0	0	0	0
	SSP2 4.5	0	0	0	0
	SSP3 7.0	0	0	0	0
	SSP5 8.5	0	0	0	0

Tabella 11.9: Variazione assoluta dell'indicatore **AC7c** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

<i>AC8a-Indice di Shannon</i>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	-0.40	-0.22	0.99	1.09
	SSP2 4.5	-0.48	-0.40	0.23	1.40
	SSP3 7.0	-0.52	-0.68	1.38	1.74
	SSP5 8.5	-0.58	-0.88	1.16	1.65
CMCC	SSP1 2.6	-0.42	-0.47	1.16	1.45
	SSP2 4.5	-0.55	-0.59	0.80	1.63
	SSP3 7.0	-0.51	-0.69	1.05	1.96
	SSP5 8.5	-0.51	-0.69	1.05	1.95
EC-EARTH3	SSP1 2.6	-0.40	-0.28	1.72	0.81
	SSP2 4.5	-0.24	-0.47	1.13	1.37
	SSP3 7.0	-0.45	-0.69	1.21	2.10
	SSP5 8.5	-0.57	-0.76	1.66	2.16
HADGEM3	SSP1 2.6	-0.51	-0.79	1.08	0.32
	SSP2 4.5	-0.60	-0.87	0.60	1.29
	SSP3 7.0	-0.60	-0.87	0.60	1.29
	SSP5 8.5	-0.85	-1.31	0.85	1.42
MIROC6	SSP1 2.6	-0.57	-0.62	0.37	0.40
	SSP2 4.5	-0.69	-0.87	0.23	0.86
	SSP3 7.0	-0.59	-0.70	0.77	1.34
	SSP5 8.5	-0.57	-0.82	0.65	1.76
MPI-ESM	SSP1 2.6	-0.59	-0.55	0.83	0.46
	SSP2 4.5	-0.77	-0.29	0.14	1.37
	SSP3 7.0	-0.72	-0.70	0.35	1.15
	SSP5 8.5	-0.57	-0.82	0.33	1.47

Tabella 11.10: Variazione in percentuale % dell'indicatore **AC8a** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

<i>AC8b - Indice di Simpson</i>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	-0.33	0.56	1.36	1.50
	SSP2 4.5	-0.43	0.25	0.31	1.92
	SSP3 7.0	-0.68	-0.44	1.90	2.40
	SSP5 8.5	-0.58	-0.72	1.59	2.27
CMCC	SSP1 2.6	-0.44	-0.04	1.59	2.00
	SSP2 4.5	-0.57	-0.60	1.09	2.24
	SSP3 7.0	-0.45	-0.69	1.44	2.69
	SSP5 8.5	-0.45	-0.69	1.44	2.69
EC-EARTH3	SSP1 2.6	-0.35	0.44	2.36	1.11
	SSP2 4.5	-0.12	-0.10	1.54	1.88
	SSP3 7.0	-0.39	-0.17	1.66	2.90
	SSP5 8.5	-0.61	-0.83	2.28	2.98
HADGEM3	SSP1 2.6	-0.54	-0.82	1.49	0.44
	SSP2 4.5	-0.72	-1.04	0.82	1.77
	SSP3 7.0	-0.72	-1.04	0.82	1.77
	SSP5 8.5	-0.94	-1.97	1.16	1.96
MIROC6	SSP1 2.6	-0.77	-0.39	0.51	0.54
	SSP2 4.5	-0.76	-0.98	0.32	1.19
	SSP3 7.0	-0.61	-1.01	1.05	1.84
	SSP5 8.5	-0.65	-1.15	0.88	2.43
MPI-ESM	SSP1 2.6	-0.60	-0.10	1.13	0.63
	SSP2 4.5	-0.80	0.47	0.18	1.88
	SSP3 7.0	-0.74	-0.30	0.47	1.58
	SSP5 8.5	-0.58	-1.12	0.45	2.02

Tabella 11.11: Variazione in percentuale % dell'indicatore **AC8a** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

<b>AC9a - Indice di Winkler</b>					
Modello	Scenario	<b>AC8b</b>			
		Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	49.56	58.63	83.68	126.40
	SSP2 4.5	23.73	89.31	45.42	184.71
	SSP3 7.0	66.66	196.07	132.01	468.77
	SSP5 8.5	103.82	335.77	220.74	862.97
CMCC	SSP1 2.6	55.98	71.33	165.95	192.33
	SSP2 4.5	49.09	110.34	147.56	287.84
	SSP3 7.0	58.55	193.57	179.44	531.12
	SSP5 8.5	58.55	193.57	179.44	531.12
EC-EARTH3	SSP1 2.6	89.29	32.98	185.34	66.34
	SSP2 4.5	56.21	114.65	111.61	263.08
	SSP3 7.0	70.57	279.85	153.34	705.89
	SSP5 8.5	124.75	325.85	259.50	829.80
HADGEM3	SSP1 2.6	52.10	52.12	158.57	155.29
	SSP2 4.5	41.69	132.72	137.82	358.99
	SSP3 7.0	41.69	132.72	137.82	358.99
	SSP5 8.5	70.48	358.49	196.86	1027.32
MIROC6	SSP1 2.6	18.17	42.78	75.68	140.51
	SSP2 4.5	31.40	85.11	106.78	225.38
	SSP3 7.0	32.32	126.71	102.49	343.47
	SSP5 8.5	49.17	212.70	147.05	583.93
MPI-ESM	SSP1 2.6	54.78	18.76	111.74	42.82
	SSP2 4.5	46.73	108.81	102.16	251.50
	SSP3 7.0	54.18	151.72	120.18	362.03
	SSP5 8.5	37.46	231.70	94.46	574.11

Tabella 11.12: Variazione in percentuale % dell'indicatore **AC9a** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM

Tabella 11.13: AC9b

<b>AC9b - Indice di Huglin</b>					
Modello	Scenario	Bassa quota		Alta quota	
		P1	P2	P1	P2
CESM2	SSP1 2.6	44.68	51.86	50.74	65.33
	SSP2 4.5	20.27	80.11	23.77	98.09
	SSP3 7.0	59.71	175.21	72.70	225.85
	SSP5 8.5	92.74	298.64	116.61	392.45
CMCC	SSP1 2.6	58.73	74.20	86.15	104.56
	SSP2 4.5	52.83	110.47	78.03	151.65
	SSP3 7.0	60.94	184.62	90.07	253.79
	SSP5 8.5	60.94	184.62	90.07	253.79
EC-EARTH3	SSP1 2.6	82.77	31.10	93.00	31.79
	SSP2 4.5	52.69	105.90	56.33	124.84
	SSP3 7.0	65.68	253.69	73.67	319.35
	SSP5 8.5	115.41	293.55	132.88	375.70
HADGEM3	SSP1 2.6	56.09	56.34	83.09	83.01
	SSP2 4.5	46.39	131.03	70.05	180.91
	SSP3 7.0	46.39	131.03	70.05	180.91
	SSP5 8.5	73.58	332.36	105.39	457.95
MIROC6	SSP1 2.6	24.97	46.92	42.29	72.27
	SSP2 4.5	37.21	87.75	58.27	122.55
	SSP3 7.0	38.26	125.40	58.41	174.01
	SSP5 8.5	54.59	203.44	78.88	279.26
MPI-ESM	SSP1 2.6	48.22	15.40	58.98	20.77
	SSP2 4.5	40.67	97.00	51.88	124.53
	SSP3 7.0	47.44	135.11	61.98	175.50
	SSP5 8.5	32.04	206.22	44.08	269.71

Tabella 11.14: Variazione in percentuale % dell'indicatore **AC9b** medio simulato per i decenni P1 e P2 rispetto al valore medio attuale secondo i diversi modelli GCM



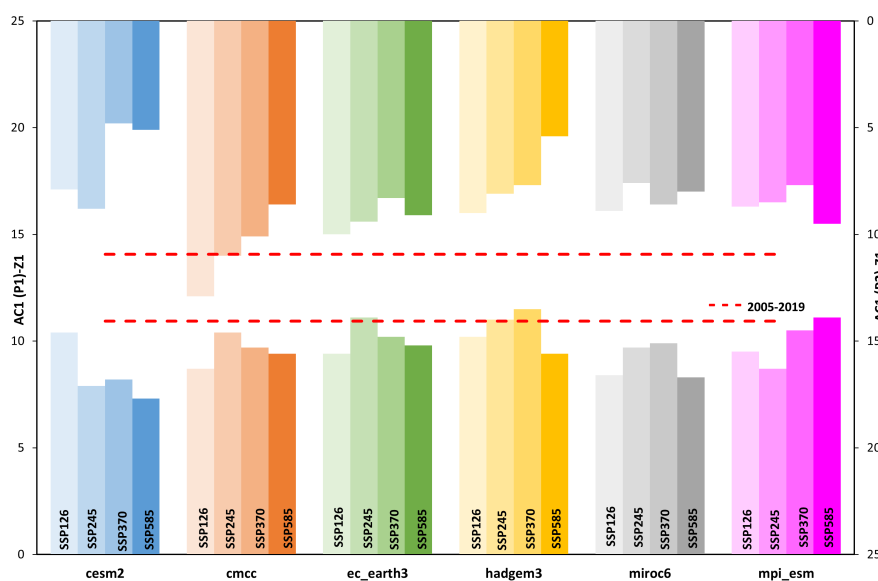


Figura 11.2: Confronto tra l'indicatore AC1 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

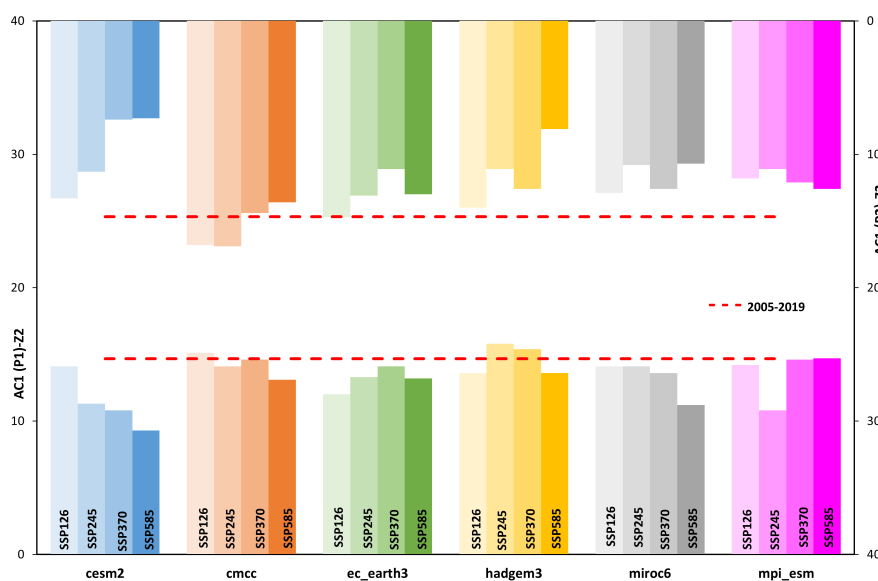


Figura 11.3: Confronto tra l'indicatore AC1 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

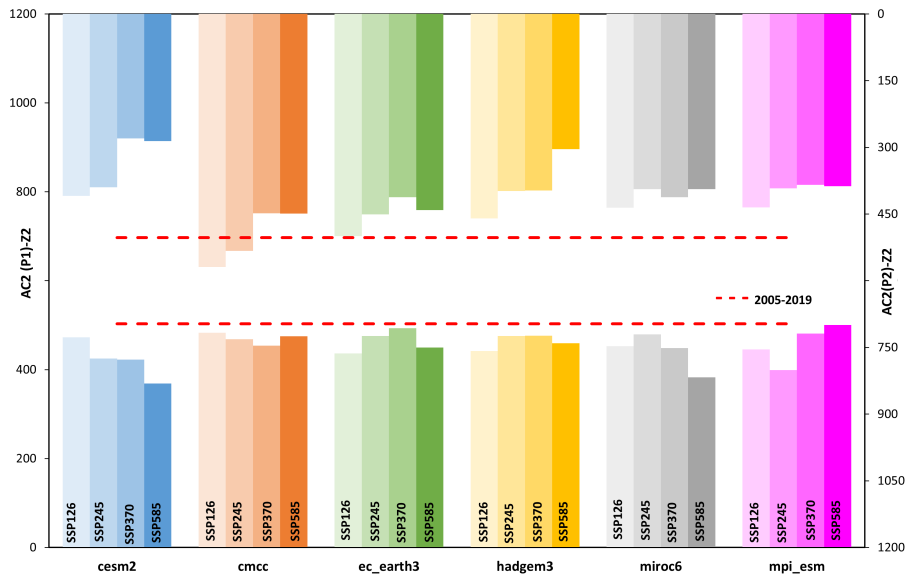


Figura 11.5: Confronto tra l'indicatore AC2 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

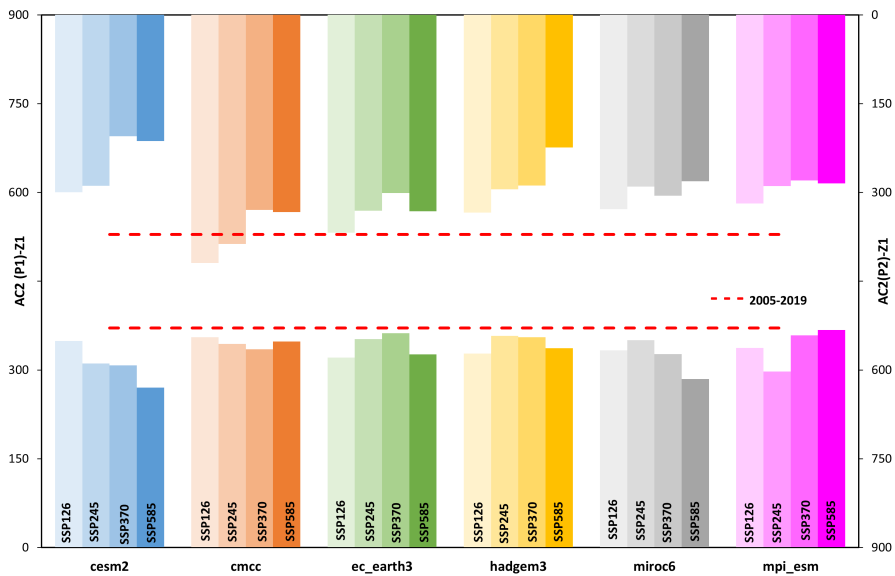


Figura 11.4: Confronto tra l'indicatore AC2 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

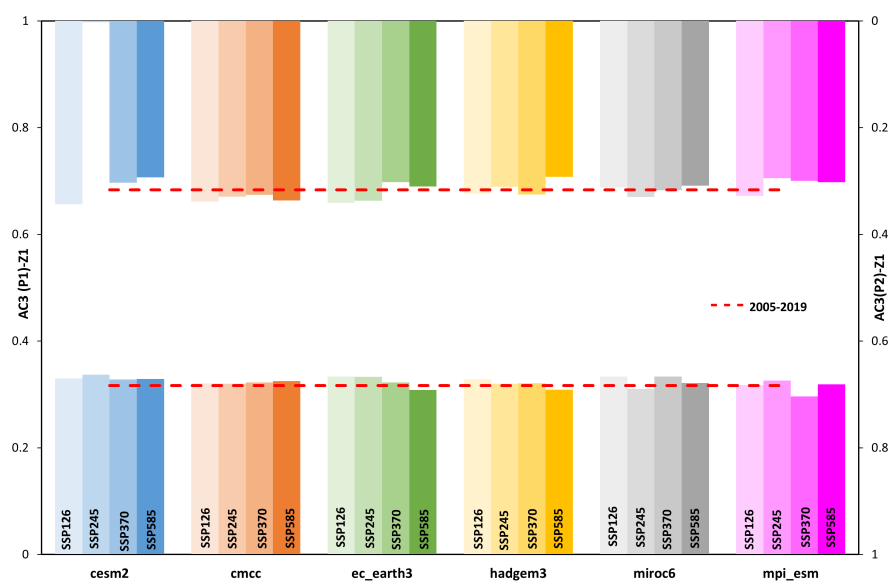


Figura 11.6: Confronto tra l'indicatore AC3 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

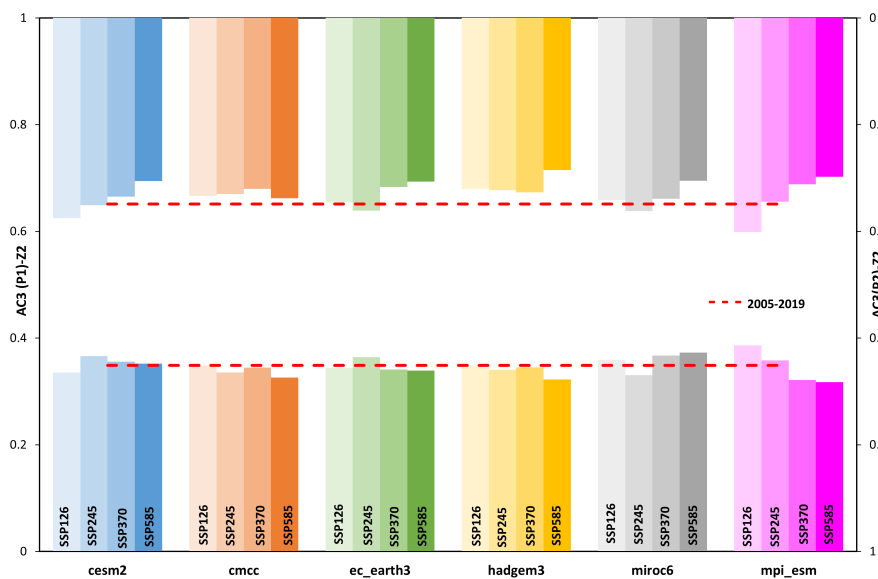


Figura 11.7: Confronto tra l'indicatore AC3 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

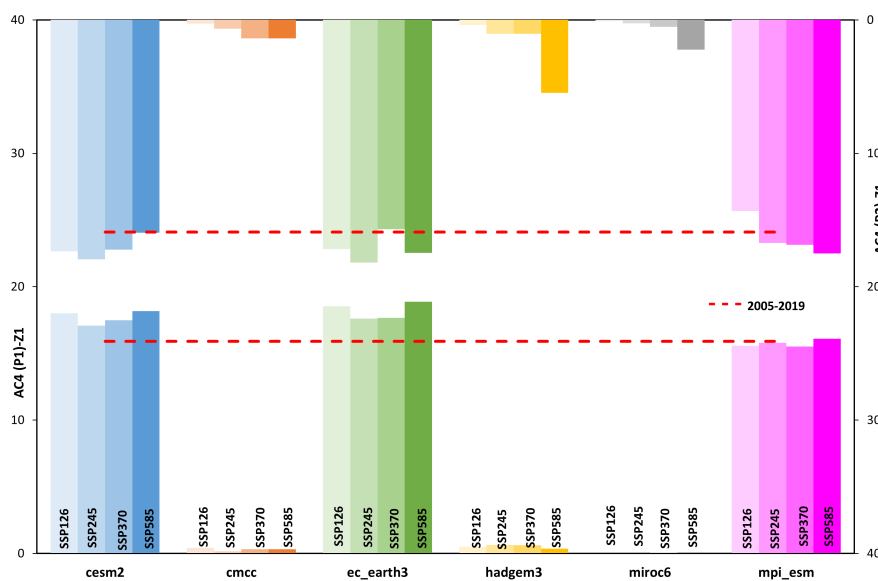


Figura 11.8: Confronto tra l'indicatore AC4 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

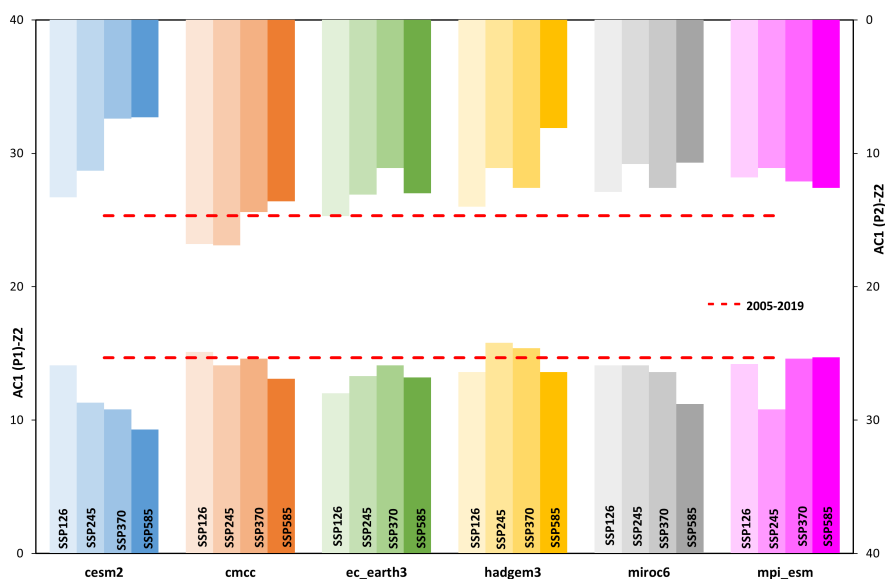


Figura 11.9: Confronto tra l'indicatore AC4 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

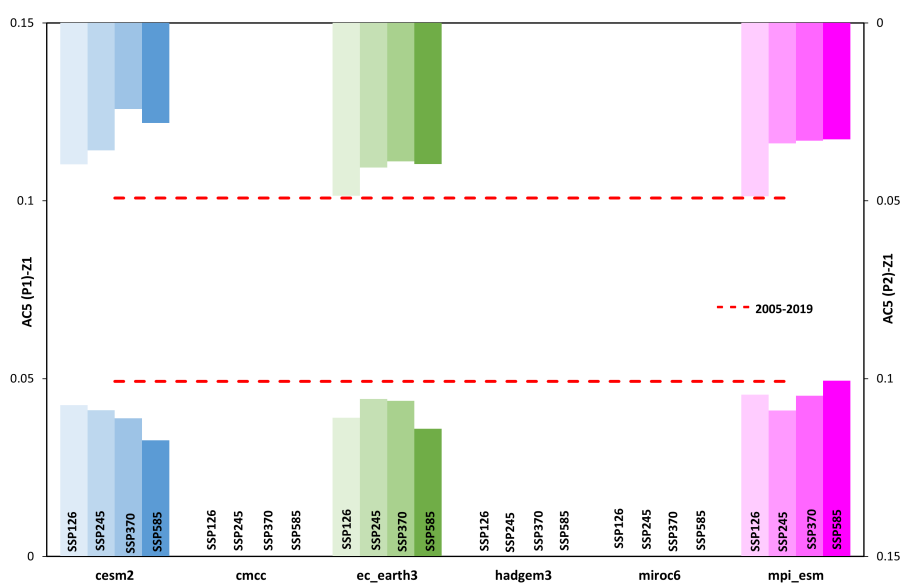


Figura 11.10: Confronto tra l'indicatore AC5 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

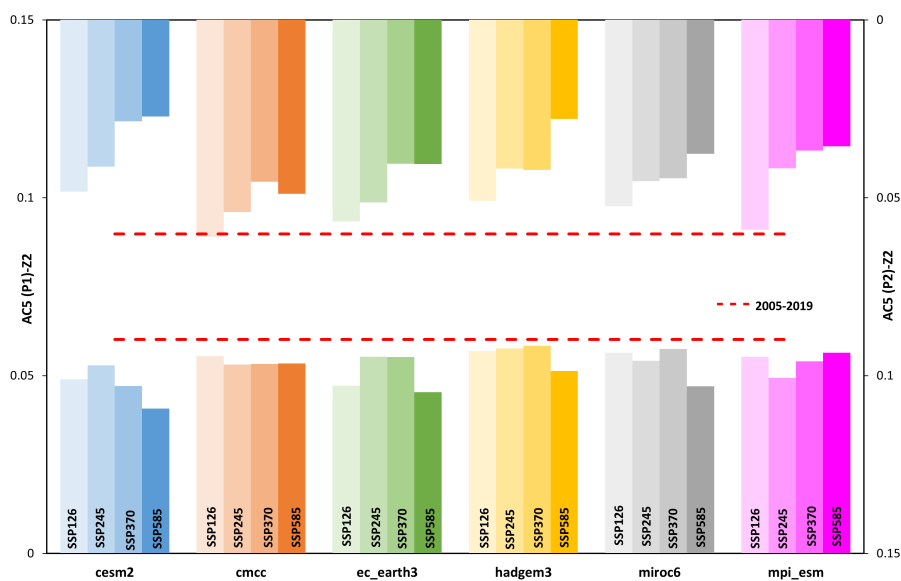


Figura 11.11: Confronto tra l'indicatore AC5 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

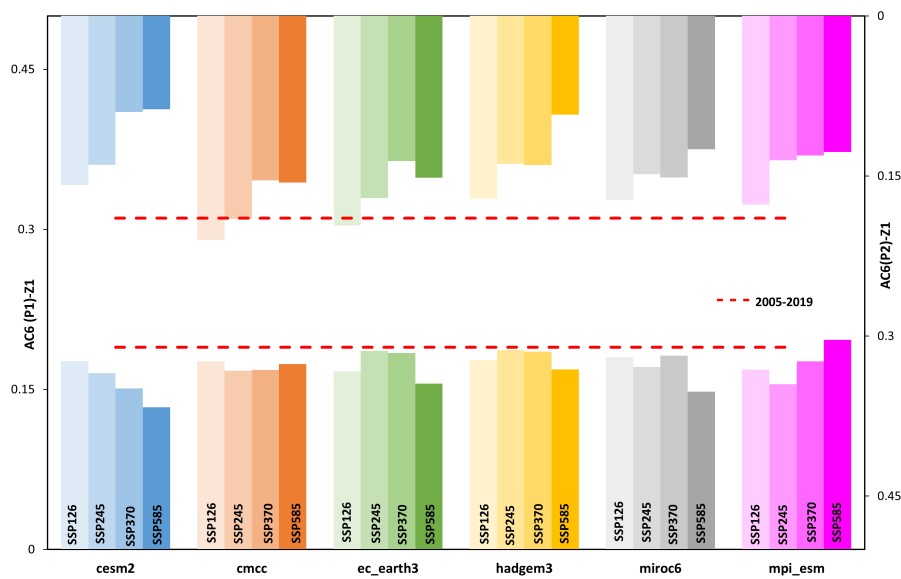


Figura 11.12: Confronto tra l'indicatore AC6 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

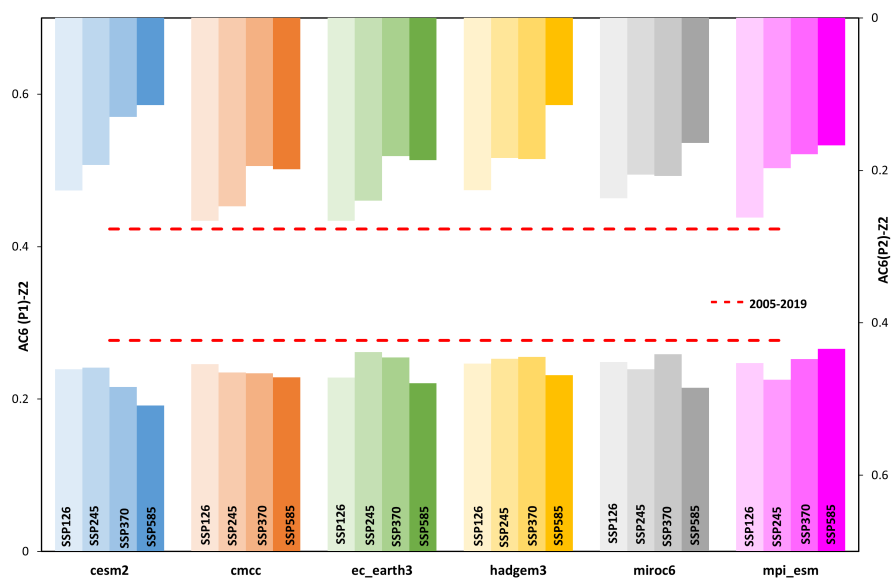


Figura 11.13: Confronto tra l'indicatore AC6 simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

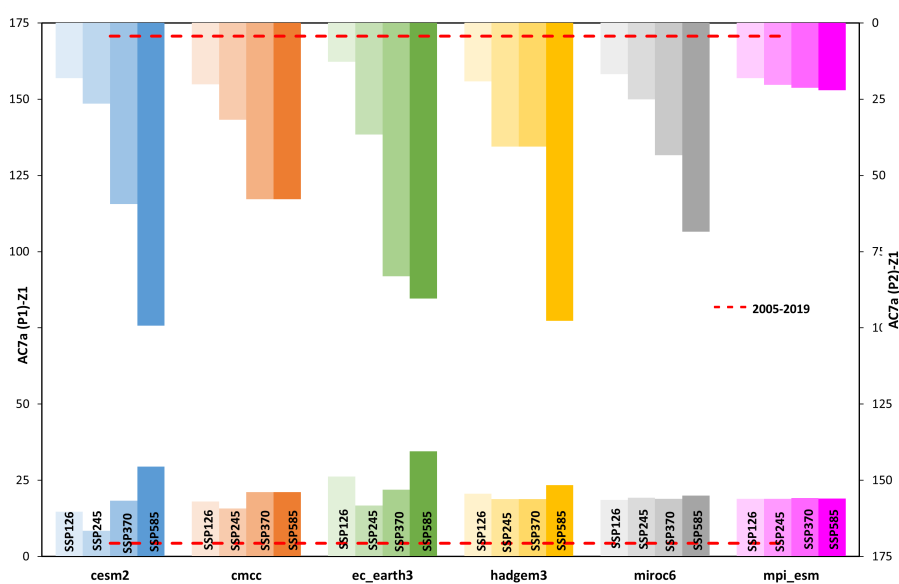


Figura 11.14: Confronto tra l'indicatore AC7a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

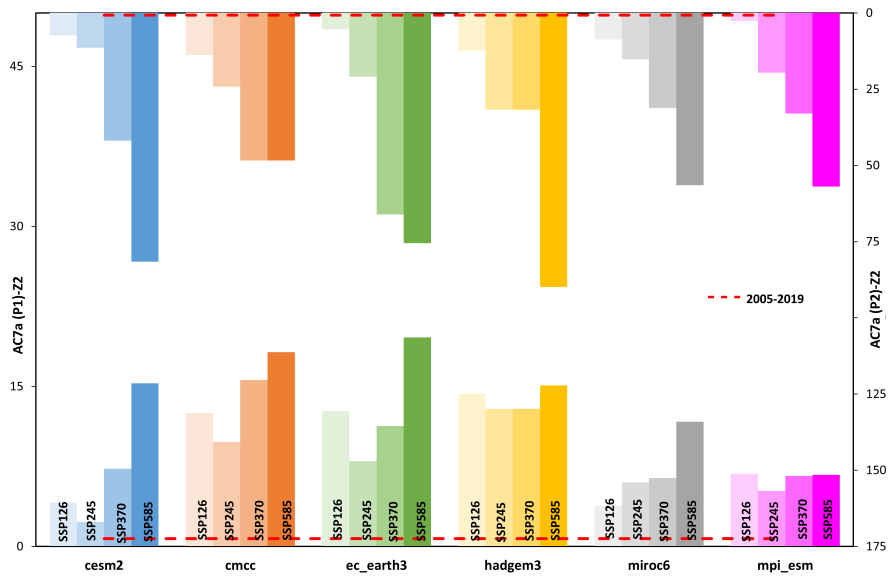


Figura 11.15: Confronto tra l'indicatore AC7a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

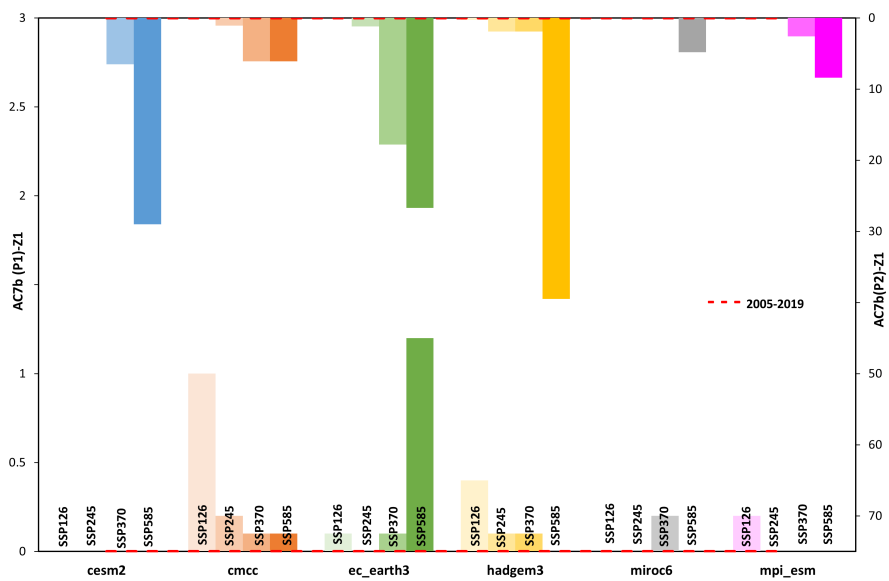


Figura 11.16: Confronto tra l'indicatore AC7b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.



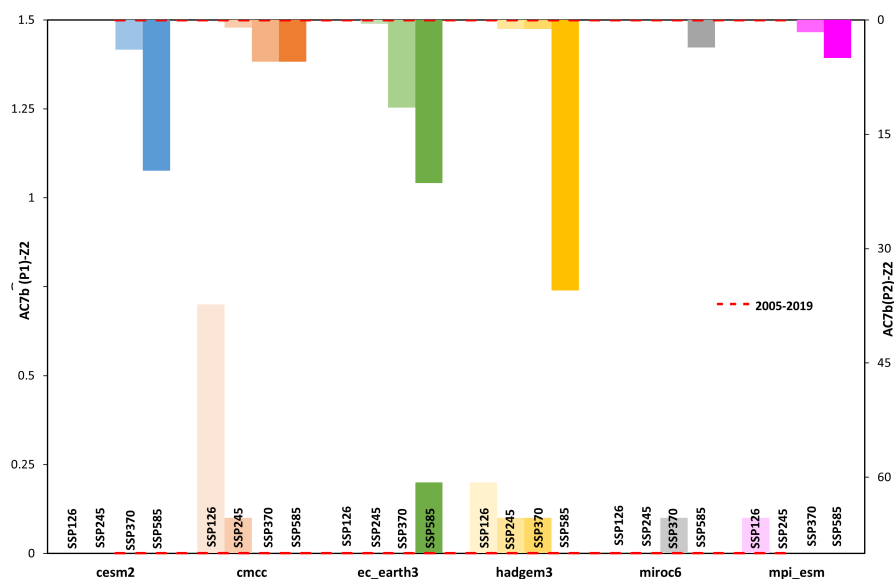


Figura 11.17: Confronto tra l'indicatore AC7b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

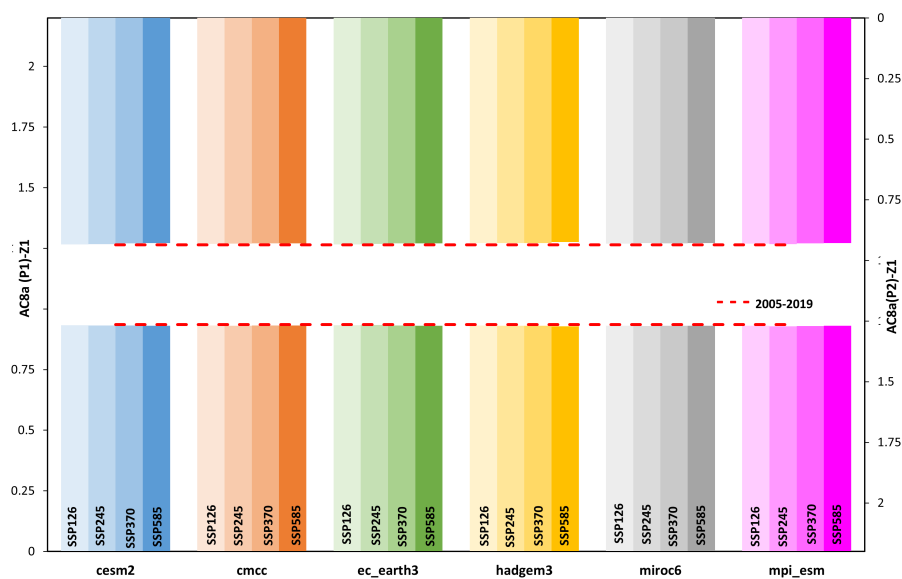


Figura 11.18: Confronto tra l'indicatore AC8a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

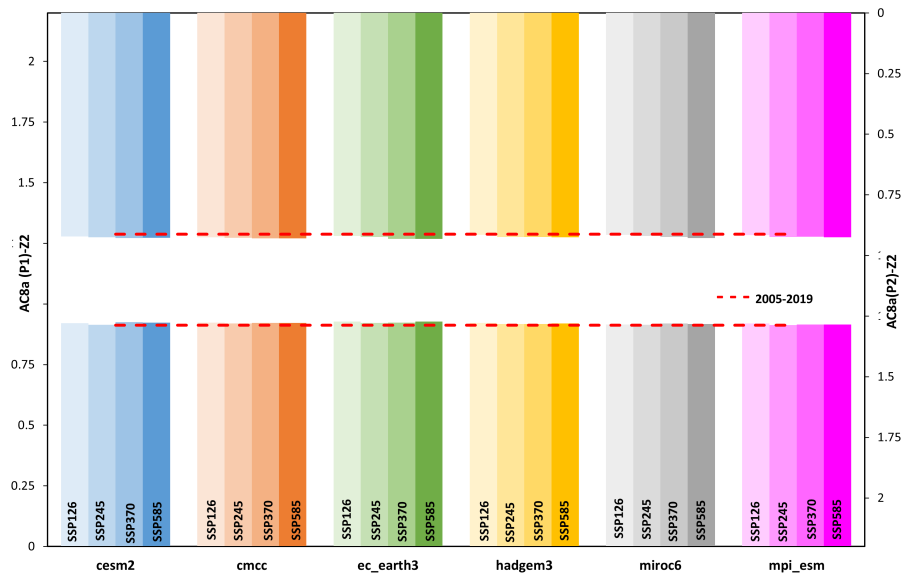


Figura 11.19: Confronto tra l'indicatore AC8a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

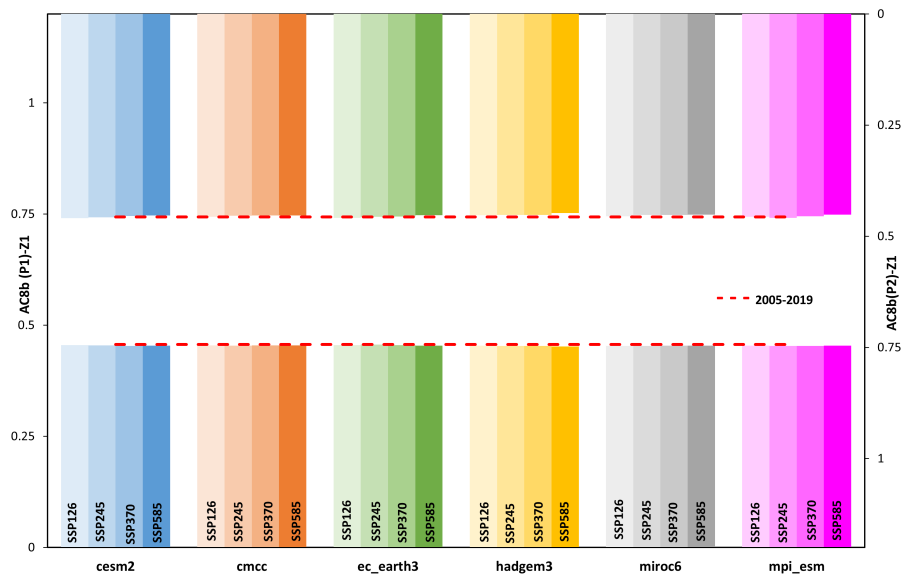


Figura 11.20: Confronto tra l'indicatore AC8b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

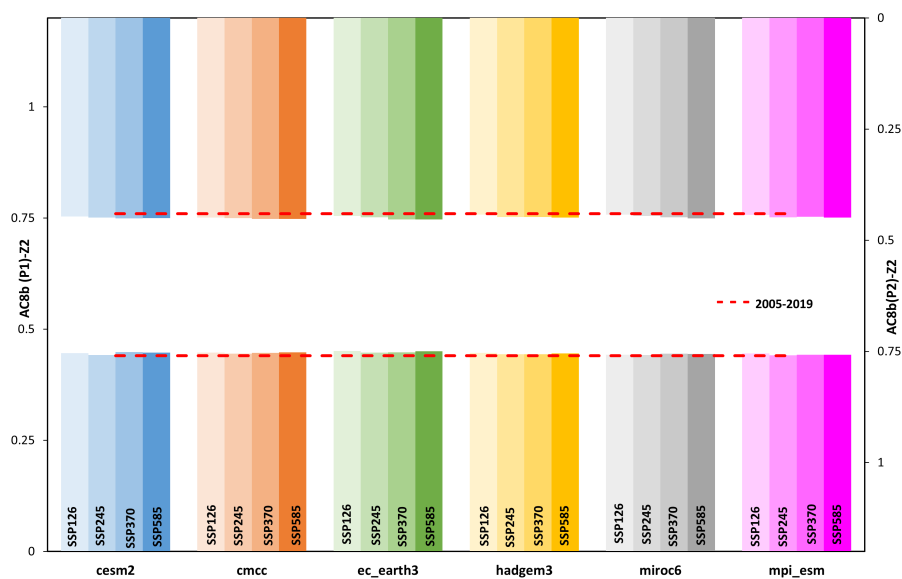


Figura 11.21: Confronto tra l'indicatore AC8b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

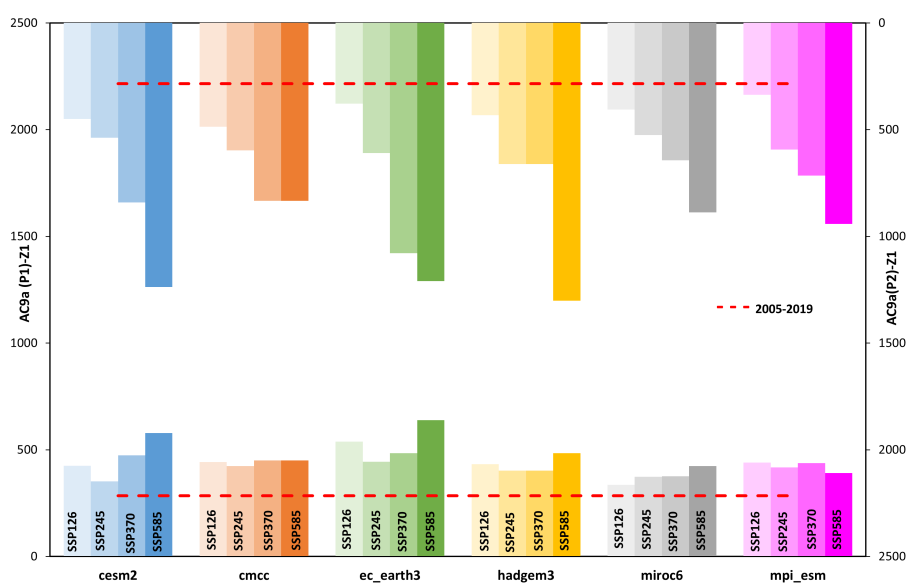


Figura 11.22: Confronto tra l'indicatore AC9a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

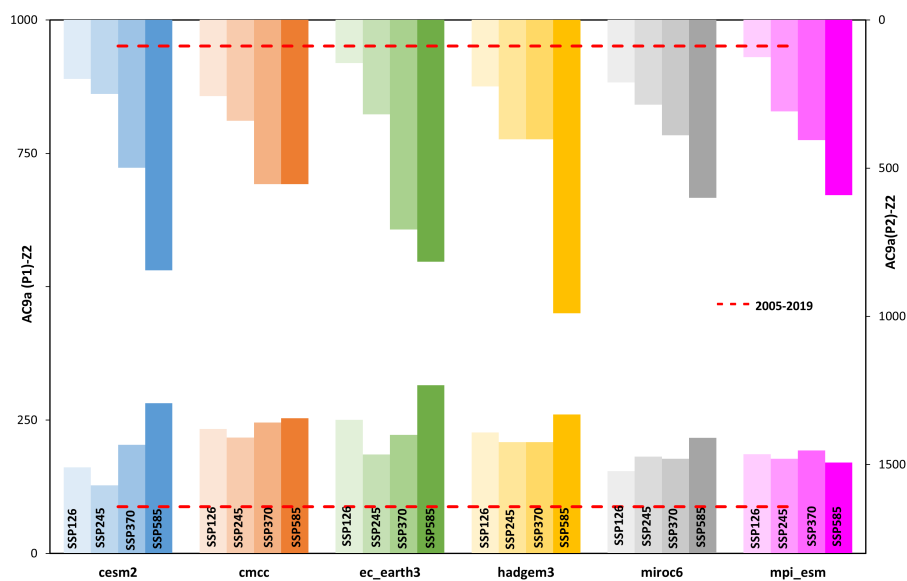


Figura 11.23: Confronto tra l'indicatore AC9a simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

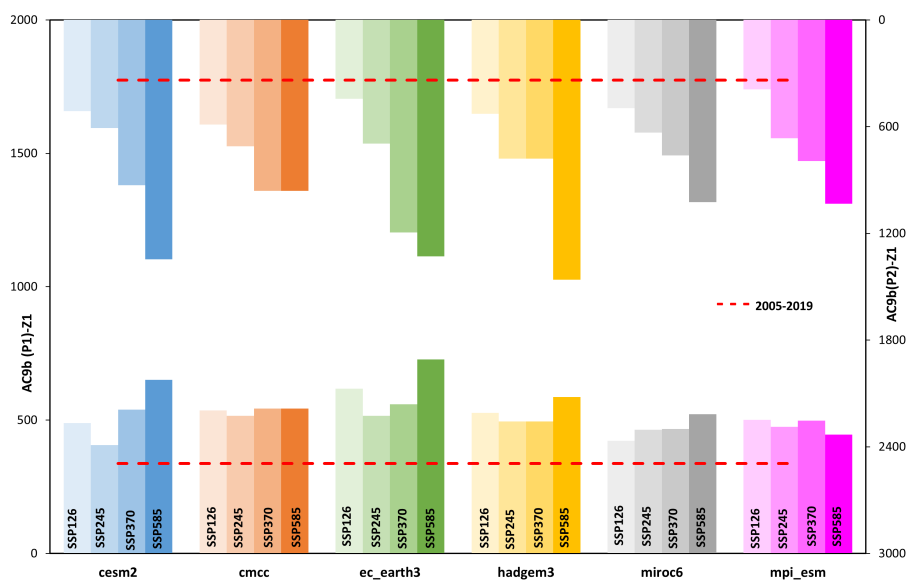


Figura 11.24: Confronto tra l'indicatore AC9b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, a bassa quota Z1, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.

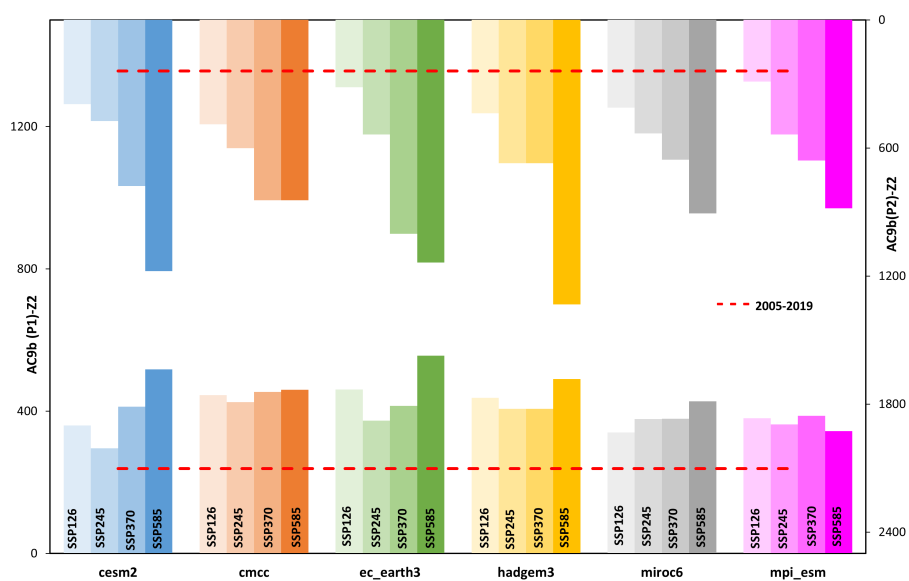


Figura 11.25: Confronto tra l'indicatore AC9b simulato dai vari modelli di circolazione rispetto al valore medio corrente, ad alta quota Z2, nei decenni P1:2041-2050 in basso e P2:2091-2100 in alto.



# Capitolo 12

## Conclusioni

Nel lavoro fin qui svolto, si sono valutati gli effetti dei cambiamenti climatici sui sistemi pascolivi, a seconda della fascia di quota. Il periodo preso in considerazione è compreso tra il 2005 e il 2100. Il periodo 2005-2019 è stato impiegato per la calibrazione del modello colturale e idrologico, mentre per la valutazione degli scenari futuri sono stati considerati i decenni 2041-2050 e 2091-2100, sinteticamente indicati con P1 e P2.

Attraverso il modello colturale sviluppato dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA) del Politecnico di Milano in collaborazione col Dipartimento di Scienza dei Raccolti, Sezione Agronomia, dell'Università statale di Milano, che è un modello semi-distribuito, di risoluzione  $100m \times 100m$ , si è valutato il contributo delle aree di pascolo nella traspirazione, che governa il regime idrologico. La traspirazione offerta dalle aree verdi pascolive, è sì un importante contributo nel bilancio idrologico, ma serve anche per la valutazione degli , rappresentati da Biomassa, LAI ed altri indicatori Agro-Climatici (ACi).

Il modello idrologico e colturale è stato calibrato e validato avendo a disposizione dati di portata, di estensione glaciale, di uso del suolo, dei dati meteorologici e della copertura vegetativa. Dati e parametri sono reperibili da articoli scientifici, dal Piano di Governo del Territorio, dalle immagini satellitari e dalle registrazioni delle stazioni di monitoraggio. Tutti i dati forniti sono stati trattati in modo tale da rendere la loro scala temporale pari a quella giornaliera.

### 12.1 Riepilogo delle analisi

Ricevuti i dati in ingresso, il modello calcola, per ogni giorno del periodo di simulazione e per ogni cella del dominio, il deflusso, con le sue componenti, alla

sezione di chiusura di ogni bacino. Confrontando i valori osservati e simulati di LAI il modello è stato calibrato, attraverso la minimizzazione dell'errore, rappresentato da *Bias*, *NSE* e *RMSE*. Per validare la parte prettamente idrologica, è stato fatto un ulteriore confronto tra portate simulate e registrate nel periodo 2005-2019.

Una volta calibrato e validato il modello, per poter simulare gli eventi futuri fino al 2100, è necessario disporre delle variabili meteorologiche. Esse sono state ricavate mediante l'impiego di quattro scenari socio-economici: SSP1 2.6, SSP2 4.5, SSP3 7.0 e SSP5 8.5 su tre GCM: CESM2, CMCC, EC-EARTH3, HADGEM3, MIROC6 e MPI-ESM, per un totale di 24 scenari.

A partire dai dati meteorologici ottenuti, si effettua la procedura di downscaling per poterli applicare al modello idrologico. Dal downscaling è stato possibile analizzare le variazioni di temperatura e precipitazione nei decenni 2041-2050 e 2091-2100.

Ogni scenario applicato ad alta quota segna un notevole incremento delle temperature medie durante la stagione di crescita, ovvero il periodo dal 30 Aprile al 30 Settembre, mentre a bassa quota vi sono tre scenari che segnano una leggera decrescita. Complessivamente, gli aumenti di temperatura interessano entrambi i decenni e entrambe le fasce di quota analizzati. Anche le temperature massime tendono ad aumentare secondo la maggior parte degli scenari, anche di 8/9 °C in più rispetto alla temperatura massima registrata nel quindicennio 2005-2019.

Le precipitazioni complessivamente tendono a diminuire, sia in intensità che in quantità, stando alle proiezioni climatiche di almeno 20 scenari su 24 per fascia di quota per decennio. Gli scenari analizzati stimano una stagione di crescita più secca ed arida rispetto ad oggi.

Gli scenari in analisi sono discordi sulla variazione di biomassa a bassa quota. Secondo i modelli CMCC, HADGEM e MIROC6, la biomassa, dunque la produttività, decresce drasticamente. In alcuni anni non è prevista alcuna tonnellata di raccolto. Secondo gli altri tre modelli, CESM2, EC-EARTH3 e MPI-ESM, la biomassa a bassa quota rimane pressoché invariata nei decenni futuri. I modelli invece concordano sull'aumento di produttività ad alta quota. In conclusione, la mia analisi simula una perdita di produttività fino al 98% a bassa quota e un incremento ad alta quota fino al 15% per metà secolo e fino al 18% a fine secolo.

Per quanto concerne gli indicatori agro-climatici, non tutti reagiscono ugualmente alle proiezioni climatiche. Gli indicatori agro-climatici studiati sono:

- AC1 precipitazioni intense [*conta*];
- AC2 precipitazioni cumulate [*mm*];



- AC3 ET/P [*mm/mm*];
- AC4 Y [*ton/ha*];
- AC5 ET/Y [*mm/(ton/ha)*];
- AC6 ET/ETP [*mm/mm*];
- AC7 onda di calore [*conta*];
- AC8 indici biodiversità [-];
- AC9 indici agro-meteo [°C].

I giorni di precipitazione intensa (AC1) e le precipitazioni cumulate durante la stagione (AC2) diminuiscono. In genere, gli scenari SSP5 8.5 segnano i maggiori decrementi, anche oltre al 50% per il 2100, ad ogni quota.

Gli indicatori legati alla temperatura (AC7 e AC9) sono tutti in forte aumento. Aumentano i gradi giorno cumulati durante la stagione ed i giorni con temperature al di sopra della temperatura di cutoff della comunità erbacea. Le zone ad alta quota sperimenteranno temperature mai registrate prima d'ora. L'aumento di temperatura rende le zone a bassa quota meno produttive, ma favorisce la crescita di biomassa nelle fasce più alte (AC4). Gli scenari socio-economici SSP5 8.5, di tutti i modelli GCM, sono quelli che simulano incrementi anche del 200% degli indicatori agro-climatici di temperatura.

Analizzando la ripartizione tra le specie secondo gli scenari futuri, non vi è segno di perdita di biodiversità (AC8). La presenza relativa delle due specie rimane la stessa di quella attuale simulata (e confermata in sito per le specie ad alta quota): 34% *Dactylis Glomerata* e 66% *Trifolium Alpinum* a bassa quota; 32% *Festuca Rubra* e 68% *Nardus Stricta* ad alta quota. Tra tutti i fattori di *suitability* considerati, quello a cui è attribuito maggior peso, secondo i risultati ottenuti, è quello legato al pascolo. Più l'animale è propenso a nutrirsi di un tipo di vegetazione, più quest'ultima diminuirà in termini di abbondanza.

Gli indicatori legati all'evapotraspirazione (AC3, AC5 e AC6) diminuiscono secondo ogni proiezione, escluso qualche scenario SSP1 2.6 per la bassa quota. Questo è giustificato dall'atteso decremento delle precipitazioni, e dall'aumento di evapotraspirazione.

## 12.2 Incertezze nella modellazione

In generale le aree montane ad alta quota sono sprovviste di una fitta rete di informazioni, perché è difficile fare misurazioni e sono caratterizzate da un'alta

variabilità spaziale e temporale. Premesso ciò, dall'elaborazione dei dati disponibili è stato possibile svolgere le analisi del presente elaborato, riscontrando però problematiche da superare.

I dati di LAI, rispetto ai quali è stato calibrato il modello, derivano dall'elaborazione di immagini satellitari del NDVI, non derivano da misure dirette in sito tramite stazioni di rilevamento, il che riduce l'accuratezza di tali dati. L'indice di area fogliare ricavato dunque da osservazioni da satellite, si riferisce a tutta la comunità erbacea presente nel dominio, ma il modello colturale analizza solamente quattro specie, due per fascia di quota.

A rappresentanza di un'intera comunità colturale, sono state infatti adottate solo due specie. Questa assunzione è giustificata dal fine di simulare i processi idrologici presenti e futuri, ma non è difatti in grado di simulare tutte le dinamiche multi specie, ma solo quelle inerenti alle due analizzate.

Per la modellazione idrologica-pascoliva sono stati adottati modelli spazialmente semi-distribuiti, e quindi i parametri caratterizzanti il sistema sono costanti nello spazio e nel tempo. Si utilizzano difatti parametri medi per tutto il sistema, per semplificare i calcoli e ridurre il costo computazionale, ma ciò rappresenta una forzatura della realtà.

Infine, le simulazioni eseguite con i GCM non garantiscono un'elevata precisione, poiché la loro risoluzione è troppo bassa per rappresentare i fenomeni atmosferici alla scala dei bacini. Per ovviare a ciò, si è proceduto al downscaling, ma anche la procedura stessa è soggetta a possibili imprecisioni.

# Bibliografia

- [1] I. Palazzoli, S. Maskey, S. Uhlenbrook, E. Nana, and D. Bocchiola. Impact of prospective climate change on water resources and crop yields in the Indrawati basin, Nepal. *Agricultural Systems*, 133:143–157, 2015.
- [2] F. Fuso, F. Casale, F. Giudici, and D. Bocchiola. Future hydrology of the cryospheric driven lake como catchment in Italy under climate change scenarios. *Climate*, 9(1):1–24, 2021.
- [3] G. Duratorre, T. Bombelli, G. Menduni, and D. Bocchiola. Hydropower potential in the alps under climate change scenarios. The Chavonne plant, Val D’Aosta. *Water (Switzerland)*, 12(7):1–20, 2020.
- [4] G. M. Bombelli, A. Soncini, A. Bianchi, and D. Bocchiola. Potentially modified hydropower production under climate change in the Italian Alps. *Hydrological Processes*, 33(17):2355–2372, 2019.
- [5] Impact of potential climate change on crop yield and water footprint of rice in the Po valley of Italy. *Agricultural Systems*, 139:223–237, 2015.
- [6] D. Bocchiola, L. Brunetti, A. Soncini, F. Polinelli, and M. Gianinetto. Impact of climate change on agricultural productivity and food security in the Himalayas: A case study in Nepal. *Agricultural Systems*, 171(December 2018):113–125, 2019.
- [7] G. Movedi, E. Bellocchi, G. Argenti, L. Paleari, F. Vesely, N. Staglianò, Ca. Dibari, and R. Confalonieri. Development of generic crop models for simulation of multi-species plant communities in mown grasslands. *Ecological Modelling*, 401(April):111–128, 2019.
- [8] R. Confalonieri. CoSMo: A simple approach for reproducing plant community dynamics using a single instance of generic crop simulators. *Ecological Modelling*, 286:1–10, 2014.

- [9] Life Pastoralp Deliverable C.3. Pastures vulnerability and adaptation strategies to climate change impacts in the Alps Report on list of indicators and relevant thresholds. pages 1–29, 2019.
- [10] Life Pastoralp Deliverable F.1. Pastures vulnerability and adaptation strategies to climate change impacts in the Alps Deliverable F . 1 Project Management Plan ( PMP ) December , 2017 Updated to June 2020. (June), 2020.
- [11] F. Casale and D. Bocchiola. Climate change effects upon pasture in the alps. the case of valtellina valley, italy. theoretical and applied climatology. (submitted.).
- [12] Relazione sulla performance e gestione del parco nazionale gran paradiso relativa all'anno 2016, redatta a norma dell'art. 10, comma 1, lett. b) del d.lgs. 150/2009, redatta a norma dell'art. 46, del dpr 97/2003, ed approvata con deliberazione urgente del presidente n. 16 del 28.04.2017. <http://www.pngp.it/de/ente-parco/amministrazione-trasparente/performance/relazione-sulla-performance>, 2017.
- [13] G. Faccioni, E. Sturaro, M. Ramanzin, and A. Bernués. Socio-economic valuation of abandonment and intensification of Alpine agroecosystems and associated ecosystem services. *Land Use Policy*, 81(January 2018):453–462, 2019.
- [14] Life Pastoralp. <https://www.pastoralp.eu>.
- [15] Parco Nazionale Gran Paradiso. <http://www.pngp.it/>.
- [16] D. Bocchiola, E. Nana, and A. Soncini. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. *Agricultural Water Management*, 116:50–61, 2013.
- [17] C. Stöckle, M. Donatelli, and R. Nelson. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4):289–307, 2003.
- [18] R. Confalonieri and L. Bechini. A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa. *European Journal of Agronomy*, 21(2):223–237, 2004.
- [19] R. Myneni, Y. Knyazikhin, and T. Park. Modis/terra leaf area index/fpar 8-day 14 global 500m sin grid v061 distributed by nasa eosdis land processes daac. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.061>..

- [20] Z. Zhu, J. Bi, Y. Pan, S. Ganguly, A. Anav, L. Xu, A. Samanta, S. Piao, R. R. Nemani, and R. B. Myneni. Global data sets of vegetation leaf area index (LAI)3g and fraction of photosynthetically active radiation (FPAR)3g derived from global inventory modeling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index (NDVI3G) for the period 1981 to 2011. *Remote Sensing*, 5(2):927–948, 2013.
- [21] A. Soncini, D. Bocchiola, R. S. Azzoni, and G. Diolaiuti. A methodology for monitoring and modeling of high altitude Alpine catchments. *Progress in Physical Geography*, 41(4):393–420, 2017.
- [22] T. Aili, A. Soncini, A. Bianchi, G. Diolaiuti, C. D’Agata, and D. Bocchiola. Assessing water resources under climate change in high-altitude catchments: a methodology and an application in the Italian Alps. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1-2):135–156, 2019.
- [23] N. Addimando, E. Nana, and D. Bocchiola. Modeling Pasture Dynamics in a Mediterranean Environment: Case Study in Sardinia, Italy. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(5):04014063, 2015.
- [24] D Bocchiola. Pasture Modelling in Mountain Areas: the Case of Italian Alps, and Pakistani Karakoram. *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal*, 8(3), 2017.
- [25] F. Pellicciotti, B. Brock, U. Strasser, P. Burlando, M. Funk, and J.r Corripio. An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: Development and testing for Haut Glacier d’Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 51(175):573–587, 2005.
- [26] W. Haeberli and M. Hoelzle. Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology*, 21:206–212, 1995.
- [27] G. Hargreaves and R. Allen. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1):53–63, 2003.
- [28] G. Ravazzani, C. Corbari, S. Morella, P. Gianoli, and M. Mancini. Modified Hargreaves-Samani Equation for the Assessment of Reference Evapotranspiration in Alpine River Basins. 138(July):592–599, 2012.
- [29] A. Pereira. The Priestley – Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. 125:305–313, 2004.

- [30] C H B Priestley and R J Taylor-division Atmospheric Physics. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. (February):81–92, 1972.
- [31] P. Jarvis and K. McNaughton. Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. 15:1–49, 1986.
- [32] Stockle C.and Steve A.and Gaylon S.I. Cropsyst, a cropping systems simulation model: Water/nitrogen budgets and crop yield. *Agricultural Systems*, 46(3):335–359, 1994.
- [33] E. Nana, C. Corbari, and D. Bocchiola. A model for crop yield and water footprint assessment: Study of maize in the Po valley. *Agricultural Systems*, 127:139–149, 2014.
- [34] D. J. Moot, W. R. Scott, A. M. Roy, and A. C. Nicholls. Base temperature and thermal time requirements for germination and emergence of temperate pasture species. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 43(1):15–25, 2000.
- [35] N Staglianò, G Argenti, and G Gentili. Forage species for long duration artificial mixtures characterised by different complexity. 160(79):157–160, 2008.
- [36] M. Pacchioli and G. Fattori. Gli alimenti per la vacca da latte: i foraggi. 2014.
- [37] Agenzia regionale per lo sviluppo rurale ERSA - Servizio fitosanitario e chimico, ricerca, sperimentazione. The Monitoring of alpine farms for the development of mountain agriculture in Friuli Venezia Giulia. 2014.
- [38] B. Groppelli, A. Soncini, D. Bocchiola, and R. Rosso. Evaluation of future hydrological cycle under climate change scenarios in a mesoscale Alpine watershed of Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(6):1769–1785, 2011.
- [39] B. Groppelli, D. Bocchiola, and R. Rosso. Spatial downscaling of precipitation from GCMs for climate change projections using random cascades: A case study in Italy. *Water Resources Research*, 47(3):1–18, 2011.
- [40] G. Danabasoglu, J. F. Lamarque, J. Bacmeister, D. A. Bailey, A. K. DuVivier, J. Edwards, L. K. Emmons, J. Fasullo, R. Garcia, A. Gettelman, C. Hannay, M. M. Holland, W. G. Large, P. H. Lauritzen, D. M. Lawrence, J. T.M. Lenaerts, K. Lindsay, W. H. Lipscomb, M. J. Mills, R. Neale,

- K. W. Oleson, B. Otto-Bliesner, A. S. Phillips, W. Sacks, S. Tilmes, L. van Kampenhout, M. Vertenstein, A. Bertini, J. Dennis, C. Deser, C. Fischer, B. Fox-Kemper, J. E. Kay, D. Kinnison, P. J. Kushner, V. E. Larson, M. C. Long, S. Mickelson, J. K. Moore, E. Nienhouse, L. Polvani, P. J. Rasch, and W. G. Strand. The Community Earth System Model Version 2 (CESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(2):1–35, 2020.
- [41] A. Cherchi, P. G. Fogli, T. Lovato, D. Peano, D. Iovino, S. Gualdi, S. Masina, E. Scoccimarro, S. Materia, A. Bellucci, and A. Navarra. Global Mean Climate and Main Patterns of Variability in the CMCC-CM2 Coupled Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(1):185–209, 2019.
- [42] EC-Earth Consortium (EC-Earth). Ec-earth-consortium ec-earth3-veg model output prepared for cmip6 scenariomip. = <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.727>.
- [43] R. Döscher, M. Acosta, A. Alessandri, P. Anthoni, A. Arneth, T. Arsouze, T. Bergmann, R. Bernadello, S. Bousetta, L.P. Caron, G. Carver, M. Castrillo, F. Catalano, I. Cvijanovic, P. Davini, E. Dekker, F. Doblas-Reyes, D. Docquier, P. Echevarria, U. Fladrich, R. Fuentes-Franco, M. Gröger, J. v. Hardenberg, J. Hieronymus, M. P. Karami, J-P. Keskinen, T. Koenigk, R. Makkonen, F. Massonnet, M. Ménégoz, P.I Miller, E. Moreno-Chamarro, L. Nieradzic, T. van Noije, P. Nolan, D. O’Donnell, P. Ollinaho, G. van den Oord, P. Ortega, O. Prims, A. Ramos, T. Reerink, C. Rousset, Y. Ruprich-Robert, P. Le Sager, T. Schmith, R. Schrödner, F. Serva, V. Sicardi, M. Sloth Madsen, B. Smith, Tian Tian, Etienne Tourigny, Petteri Uotila, Martin Vancoppenolle, Shiyu Wang, David Wårlind, U. Willén, K. Wyser, S. Yang, X. Yepes-Arbós, and Q. Zhang. The EC-Earth3 Earth System Model for the Climate Model Intercomparison Project 6. pages 1–90, 2021.
- [44] J. L. García-Franco, L.J. Gray, and S. Osprey. The American monsoon system in HadGEM3 and UKESM1. *Weather and Climate Dynamics*, 1(2):349–371, 2020.
- [45] T. Kataoka, H. Tatebe, H. Koyama, T. Mochizuki, K. Ogochi, H. Naoe, Y. Imada, H. Shiogama, M. Kimoto, and M. Watanabe. Seasonal to Decadal Predictions With MIROC6: Description and Basic Evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(12):1–25, 2020.

- [46] T. Mauritsen, J. Bader, T. Becker, J. Behrens, M. Bittner, R. Brokopf, V. Brovkin, M. Claussen, T. Crueger, M. Esch, I. Fast, S. Fiedler, D. Fläschner, V. Gayler, M. Giorgetta, D. S. Goll, H. Haak, S. Hagemann, C. Hedemann, C. Hohenegger, T. Ilyina, T. Jahns, D. Jimenéz-de-la Cuesta, J. Jungclaus, T. Kleinen, S. Kloster, D. Kracher, S. Kinne, D. Kleberg, G. Lasslop, L. Kornblueh, J. Marotzke, D. Matei, K. Merauer, U. Mikolajewicz, K. Modali, B. Möbis, W. A. Müller, Julia E.M.S. Nabel, Christine C.W. Nam, Dirk Notz, Sarah Sylvia Nyawira, Hanna Paulsen, Karsten Peters, R. Pincus, H. Pohlmann, J. Pongratz, M. Popp, T. Raddatz, S. Rast, R. Redler, Christian H. Reick, T. Rohrschneider, V. Schemann, H. Schmidt, R. Schnur, U. Schulzweida, K. D. Six, L. Stein, I. Stemmler, B. Stevens, J. von Storch, F. Tian, A. Voigt, P. Vrese, K. H. Wieners, S. Wilkenskjaeld, A. Winkler, and E. Roeckner. Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1.2) and Its Response to Increasing CO<sub>2</sub>. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(4):998–1038, 2019.
- [47] B.C. O’Neill, C. Tebaldi, D. P. Van Vuuren, V. Eyring, Pi. Friedlingstein, G. Hurtt, R. Knutti, E. Kriegler, J.F. Lamarque, J. Lowe, G. A. Meehl, R. Moss, K. Riahi, and B. M. Sanderson. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9):3461–3482, 2016.
- [48] V Eyring, S Bony, G A Meehl, C Senior, B Stevens, and R J Stou. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organisation. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(12):10539–10583, 2015.
- [49] S. Caserini. Scenari internazionali di emissione e assorbimenti di gas serra congruenti con l’ Accordo di Parigi. pages 1–23, 2017.
- [50] K. Riahi, D. P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B. C. O’Neill, S. Fujimori, N. Bauer, K. Calvin, R. Dellink, O. Fricko, W. Lutz, A. Popp, J. Cuaresma, S. KC, M. Leimbach, L. Jiang, T. Kram, S. Rao, J. Emmerling, K. Ebi, T. Hasegawa, P. Havlik, F. Humpenöder, L. Da Silva, S. Smith, E. Stehfest, V. Bosetti, J. Eom, D. Gernaat, T. Masui, J. Rogelj, J. Strefler, L. Drouet, Volker Krey, Gunnar Luderer, Mathijs Harmsen, Kiyoshi Takahashi, Lavinia Baumstark, Jonathan C. Doelman, M. Kainuma, Z. Klimont, G. Marangoni, H. Lotze-Campen, M. Obersteiner, A. Tabeau, and M. Tavoni. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42:153–168, 2017.



- [51] D. P. van Vuuren, J. A. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, and J. Weyant. A special issue on the RCPs. *Climatic Change*, 109(1):1–4, 2011.
- [52] M. Rivington, K. B. Matthews, K. Buchan, D. G. Miller, G. Bellocchi, and G. Russell. Climate change impacts and adaptation scope for agriculture indicated by agro-meteorological metrics. *Agricultural Systems*, 114:15–31, 2013.
- [53] V. H. Dale and S. Polasky. Measures of the effects of agricultural practices on ecosystem services. *Ecological Economics*, 64(2):286–296, 2007.
- [54] A.Y. Hoekstra. Virtual Water Trade. Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. *International Expert Meeting on Virtual Water Trade*, 12(12):1–244, 2003.
- [55] C. E. Shannon and W. Weaver. The Theory of Mathematical Communication. *International Business*, page 131, 1949.
- [56] K. Krippendorff. Mathematical Theory of Communication. *Encyclopedia of Communication Theory*, pages 614–618, 2012.
- [57] H. Nagendra. Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. 22:175–186, 2002.
- [58] Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d’Aosta. Indici Agrometeo per la stazione di Villeneuve-SR S.Nicolas. 2017.