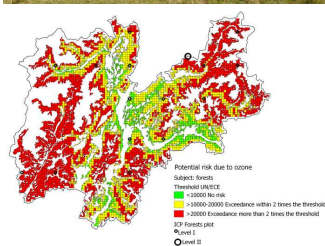


OZONO TROPOSFERICO IN PROVINCIA DI TRENTO

Livelli ed effetti
sulla vegetazione



Relazione attività 2010

OZONO TROPOSFERICO IN PROVINCIA DI TRENTO

**Livelli ed effetti
sulla vegetazione**

Relazione attività 2010

Elena Gottardini, Fabiana Cristofolini, Antonella Cristofori

Fondazione Edmund Mach

Via E. Mach 1, 38010 San Michele all'Adige (TN)

Marco Ferretti, Giovanni Bacaro, Francesco Geri, Elisa Santi, Lisa Veronesi

TerraData environmetrics

Loc. Campo al Ciotolo 2 bis, 58025 Monterotondo Marittimo (GR)

Con la collaborazione di Giacomo Gerosa e Angelo Finco, Ecometrics S.r.l., Brescia, per la parte relativa ai flussi stomatici di ozono.

Relazione relativa allo studio realizzato nel 2010 nell'ambito dell'integrazione all'Accordo di Programma con la Provincia Autonoma di Trento richiesta dal Servizio Foreste e Fauna con lettera di incarico per attività di monitoraggio e ricerca su ozono e vegetazione 2010, Prot. S044-0/2010/201014/4.14 del 23 luglio 2010.



Nota

Questa relazione descrive l'attività svolta nel 2010 dalla Fondazione Edmund Mach (FEM) in stretta collaborazione con *TerraData environmetrics* e pertanto in alcuni casi il contributo di ciascuno diventa difficilmente separabile.

Forma raccomandata di citazione:

Gottardini E., Cristofolini F., Cristofori A., Ferretti M., Bacaro G., Geri F., Santi E., Veronesi L., 2011. Ozono troposferico in provincia di Trento: livelli ed effetti sulla vegetazione nel 2010. Relazione tecnica dello studio realizzato nel 2010 nell'ambito dell'incarico affidato alla Fondazione Edmund Mach dal Servizio Foreste e Fauna della Provincia Autonoma di Trento. 58 pp, più Allegato I.



Ringraziamenti

Gli autori ringraziano le organizzazioni e le persone che a vario titolo hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro.

Tra le istituzioni:

- il Servizio Foreste e Fauna della Provincia Autonoma di Trento (PAT) per il contributo economico;
- l'Agenzia Protezione Ambiente della Provincia di Trento (APPA TN) per il contributo economico.

Tra le persone:

- Mauro Confalonieri (Servizio Foreste e Fauna, PAT) per il sostegno al lavoro e la collaborazione organizzativa;
- il personale delle Stazioni Forestali della Provincia per il prezioso contributo nell'installazione delle stazioni di monitoraggio dell'ozono presso i siti di Livello I e la puntuale sostituzione settimanale dei campionatori passivi;
- Maurizio Salvadori del Parco Naturale Paneveggio Pale di San Martino per l'installazione della stazione di monitoraggio del sito Villa Welsperg e la puntuale sostituzione settimanale dei campionatori passivi;
- Maria Cristina Viola di FEM per il prezioso aiuto in campo e nella validazione microscopica dei sintomi fogliari;
- Fabio Zottele di FEM per i dati di temperatura spazializzati.

Riassunto	5
1. Introduzione	6
2. Ozono in Trentino	7
2.1 Concentrazioni di ozono e stime di esposizione.....	7
2.1.1 <i>Misure delle concentrazioni di ozono</i>	7
2.1.2 <i>Metodo di stima di esposizione con AOT40</i>	9
2.1.3 <i>Concentrazioni ed esposizione</i>	9
2.2 Modelli geostatistici	15
2.2.1 <i>Dati di input</i>	15
2.2.2 <i>Valutazione dell'affidabilità dei dati di input</i>	17
2.2.3 <i>Metodi geostatistici</i>	17
2.2.4 <i>Spazializzazione del modello geostatistico</i>	23
2.2.5 <i>Validazione del modello geostatistico via Leave One Out</i>	23
2.2.6 <i>Sviluppo del modello geostatistico 2009</i>	24
2.2.7 <i>Sviluppo del modello geostatistico 2010</i>	26
2.2.8 <i>Risultati complessivi del modello</i>	29
2.3 Modello previsionale spazio-tempo.....	31
2.3.1 <i>Dati utilizzati</i>	31
2.3.2 <i>Formulazione del modello</i>	33
2.3.3 <i>Modello previsionale spazio-tempo</i>	36
2.4 Stima modellistica dei flussi stomatici di ozono al sito di Passo Lavazé.....	40
3. Effetti sulla vegetazione	42
3.1 Vegetazione spontanea nel sito di Livello II di Passo Lavazé.....	42
3.1.1 <i>Metodologia di rilievo dei sintomi fogliari da ozono</i>	42
3.1.2 <i>Sintomi visibili nel sito forestale di Livello II di Passo Lavazé</i>	43
3.2 Specie O ₃ -sensibile <i>Viburnum lantana</i> L.....	44
3.2.1 <i>Disegno di campionamento e metodi di rilievo</i>	44
3.2.2 <i>Sintomi visibili su Viburnum lantana</i> L.....	48
3.3 Validazione microscopica.....	50
3.4 Stima del ruolo dell'ozono nella defogliazione e crescita degli alberi.....	51
4. Conclusioni	56
5. Bibliografia	57
Allegato I	59

Riassunto

Lo studio intrapreso a partire dal 2007 sui livelli dell'ozono troposferico in Trentino e sui suoi effetti in termini di sintomi sulla vegetazione è proseguito anche nel 2010. Il progetto è realizzato dal Centro Ricerca ed Innovazione della Fondazione Edmund Mach in collaborazione con TerraData environmetrics (Spin-off dell'Università di Siena) nell'ambito di una co-operazione con il Servizio Foreste e Fauna della Provincia Autonoma di Trento.

Le misure di ozono troposferico, effettuate su una rete di 21 siti forestali distribuiti sistematicamente sul territorio provinciale, hanno confermato anche per il 2010 la presenza di concentrazioni di ozono elevate, tali da portare al frequente superamento delle soglie di rischio potenziale per la vegetazione stabilite dalla Direttiva 2008/50/CE dell'Unione Europea (EU-Long Term ed EU-Target) e dai livelli critici indicati dalla Commissione Economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UN/ECE).

Attraverso modelli geostatistici è stato possibile stimare le concentrazioni di ozono su tutto il territorio provinciale. Misurazioni ed elaborazioni confermano come le aree remote a quote superiori ai 500 m s.l.m. siano interessate da concentrazioni elevate di ozono. Mediante successive applicazioni GIS, è stato possibile mappare le aree forestali ed agrarie a potenziale rischio ozono per il 2007. Da una valutazione conservativa, emerge che, se si considerano i valori obiettivo per il 2010 della Direttiva europea (9000 ppb h), circa il 10% della superficie forestale trentina risulta esposta a valori di ozono potenzialmente dannosi; questa percentuale sale al 57% ed all'83% se invece si considerano rispettivamente i livelli critici UN/ECE (5000 ppb h) e la soglia di rischio stabilita dall'Unione Europea come obiettivo di lungo termine per la protezione della vegetazione (3000 ppb h).

Per non tralasciare una importante valutazione relativa al reale assorbimento di ozono da parte delle piante, è stata realizzata inoltre una stima modellistica per quantificare i flussi stomatici di ozono nel popolamento forestale al sito di Passo Lavazé. Questo approccio conferma le stime di rischio potenziale per la vegetazione già rilevate applicando l'indice di esposizione AOT40.

*A fronte di questi superamenti, occorre tuttavia notare che le osservazioni svolte in campo nei diversi anni hanno evidenziato l'effettiva presenza di sintomi fogliari visibili attribuibili all'ozono solo su poche specie legnose, tra cui *Viburnum lantana* L., specie nota per la sua sensibilità all'ozono, oggetto di uno studio specifico. Tali sintomi non sono invece stati riscontrati su nessuna delle specie legnose osservate presso il sito forestale di Livello II.*

Accanto al rilevamento dei sintomi fogliari visibili, al fine di valutare in maniera più esaustiva i possibili effetti dell'ozono sulle foreste, è stato impostato uno studio correlativo sull'accrescimento delle piante forestali in relazione ai livelli di inquinante. A tale scopo, nel corso del 2010 sono stati raccolti ed informatizzati i dati rilevati da rete UN ECE di Livello I e II, dell'inventario forestale, di InfoCarb, e dei piani di gestione; tali dati verranno elaborati ed analizzati durante il 2011.

1. Introduzione

Dal 2007 la Fondazione Edmund Mach, in collaborazione con TerraData environmetrics (*Spin-off* dell'Università di Siena) ha avviato uno studio sui livelli dell'ozono troposferico nelle aree rurali e forestali della provincia di Trento con l'obiettivo di comprendere i rischi potenziali per la vegetazione connessi a tale inquinante ritenuto altamente fitotossico. A tale scopo sono stati utilizzati dei campionatori passivi per misurare le concentrazioni di ozono nei siti forestali di monitoraggio appartenenti alla rete UE-UN/ECE di Livello I (Gottardini et al., 2008, 2009 e 2010). I dati così raccolti hanno permesso di sviluppare una prima mappatura delle concentrazioni e dell'esposizione in termini di AOT40 (Bacaro et al., 2008), ulteriormente sviluppata nel 2010.

Da questi primi risultati era emersa l'opportunità di integrare la rete di misura dell'ozono con altri punti nell'ottica di migliorare la qualità delle stime a livello provinciale. Perciò nel 2009 alla rete di Livello I sono stati aggiunti 5 nuovi siti di misura che hanno consentito di ottenere dati sulle concentrazioni di ozono con una migliore distribuzione territoriale. Nel 2010 è stato inoltre aggiunto un nuovo sito di misurazione presso Villa Welsperg in Val Canali, con la collaborazione del Parco Naturale Paneveggio Pale di San Martino.

Oltre ad ottenere informazioni sulle effettive concentrazioni di ozono nelle aree forestali della provincia e stime di rischio per la vegetazione, lo studio ha per obiettivo anche verificare in campo la presenza di effetti sulla vegetazione attribuibili a questo inquinante. Per rispondere a questa esigenza sono state effettuate una serie di osservazioni circa la presenza di sintomi fogliari visibili, nel 2007 sulla cultivar di tabacco Bel-W3 nota per la sua ipersensibilità all'ozono (Cristofolini *et al.* 2010) e, nel 2008 e 2009, sulla vegetazione spontanea, in particolare sulle specie arboree ed arbustive presenti in alcuni siti di misura dell'ozono. Nel 2009 è stato avviato uno studio sulla specie arbustiva spontanea *Viburnum lantana* L., notoriamente sensibile all'ozono. La specie ha manifestato sintomi frequenti e proporzionali ai livelli di ozono nei due siti oggetto di studio (Gottardini *et al.*, 2010b). Per verificare le potenzialità di utilizzo di *Viburnum lantana* L., come bioindicatore¹ dell'O₃ troposferico, nel corso del 2010 lo studio è stato integrato con osservazioni e rilievi su base campionaria estesi all'intera provincia.

¹ I bioindicatori sono organismi sensibili nei confronti di uno stress (inquinante) e rispondono alla sua presenza in maniera chiara, non ambigua; è inoltre identificabile una relazione tra causa ed effetto, ovvero tra dose di inquinante ed intensità della risposta dell'indicatore.

L'utilizzo di specie native, rispetto all'esposizione di piante coltivate (biomonitoraggio attivo), presenta dei vantaggi quali la possibilità di stimare gli effetti dell'O₃ in aree forestali-remote, dove la gestione ed il mantenimento di bioindicatori esposti attivamente risulterebbe difficoltoso; inoltre le piante sono già adattate all'ambiente e quindi non risentono dello stress dovuto al trapianto e/o alle variazioni delle condizioni ambientali.

Infine, nel corso del 2010 è stato attivato un altro modulo di indagine relativo alla stima dei flussi di ozono nel sito di Livello II del Passo Lavazè (Gerosa e Finco, 2011), in modo da valutare il rischio potenziale per la vegetazione anche in relazione a questo indicatore.

2. Ozono in Trentino

2.1 Concentrazioni di ozono e stime di esposizione

2.1.1 Misure delle concentrazioni di ozono

Le concentrazioni di ozono sono state rilevate presso i 20 punti della rete provinciale già oggetto di rilievo nella campagna 2009; in più, nella stagione 2010 le misure sono state estese ad un altro sito forestale, posto presso Villa Welsperg all'interno del Parco Naturale Paneveggio - Pale di San Martino (Fig. 1).

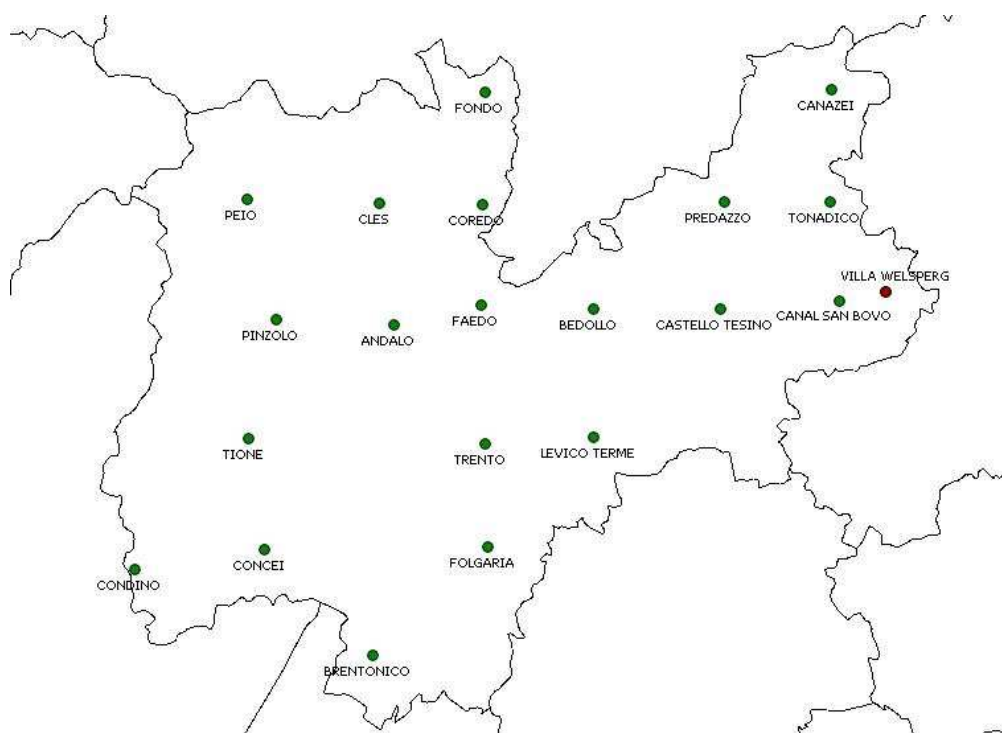


Figura 1. Area di studio e dislocazione dei siti di misura dell'O₃. In rosso il sito forestale aggiunto nella campagna di rilievo 2010.

In ogni sito forestale, all'interno di un'area aperta selezionata in modo da garantire una sufficiente circolazione di aria (diametro maggiore del doppio dell'altezza dell'ostacolo più prossimo), sono

stati esposti i campionatori passivi per l'ozono, sostituiti a cadenza settimanale (PASSAM AG – per dettagli vedi <http://www.passam.ch/>). I campionatori passivi per la misura dell'ozono sono costituiti da fiale in polipropilene con un filtro in fibra di vetro imbevuto con soluzione di acido acetico e 1,2-di(4-piridil)-etilene, che reagisce con l'ozono entrato nel campionatore per diffusione. La reazione comporta la formazione di un'aldeide, la cui determinazione quantitativa mediante spettrofotometria (a 442 nm) consente di risalire alla concentrazione media oraria settimanale di ozono.

La Tabella 1 riassume le informazioni relative a codice CEE, comune, localizzazione geografica, stazione forestale di riferimento e quota associate a ciascun sito di campionamento. Le misure di ozono sono state raccolte nel periodo tra il 5 maggio e il 4 agosto 2010; le elaborazioni relative al confronto con gli anni precedenti sono state fatte per il periodo comune di 8 settimane, dal 2 giugno al 28 luglio 2010.

Tabella 1. Sintesi delle informazioni relative ai siti di campionamento ozono 2010.

Coordinate in UTM32 WGS84.

N. CEE	Comune	Stazione forestale	Quota m s.l.m.	UTM EST	UTM NORD
49	Fondo	Fondo	1370	666000	5148000
52	Canazei	Pozza Di Fassa	1900	714000	5148000
71	Pejo	Ossana	1590	633000	5133000
72	Cles	Cles	1600	651000	5133000
73	Coredo	Coredo	1390	666000	5133000
75	Predazzo	Predazzo	1480	699000	5133000
76	Tonadico	Dem.Paneveggio	1870	714000	5133000
99	Faedo	Ala	490	666000	5118000
100	Bedollo	Baselga Pine'	1390	681000	5118000
101	Castello Tesino	Caoria	1670	699000	5118000
127	Trento	Tn-Lavori	380	666000	5100000
128	Levico Terme	Levico Terme	1030	681000	5100000
157	Condino	Condino	1880	618000	5085000
158	Concei	Tiarno Di Sotto	1175	633000	5085000
160	Folgaria	Folgaria	1130	666000	5085000
	Pinzolo	Pinzolo	1000	633000	5118000
	Andalo	Andalo	1580	651000	5118000
	Canal S.Bovo	Canal S.Bovo	1490	714000	5118000
	Tione	Tione	750	633000	5100000
	Brentonico	Mori	1400	651000	5070000
*	Villa Welsperg	Val Canali	1038	721385	5120350

* Stazione afferente al Parco Naturale Paneveggio Pale di San Martino

Al fine di verificare l'affidabilità dei dati, le concentrazioni misurate mediante dosimetri passivi (21 siti rurali e forestali) sono state comparate con le misure condotte da centraline automatiche APPA



(4 siti urbani e 1 remoto). L'assunto di tale verifica è che i dati dalle centraline rappresentino il riferimento corretto. Sotto questa condizione ci si aspetta quindi che le principali dinamiche temporali (variazioni intra- ed inter-annuali) debbano essere registrate coerentemente dalle due reti.

2.1.2 Metodo di stima di esposizione con AOT40

Le concentrazioni di ozono sono state convertite da $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a ppb, applicando il coefficiente di conversione di 1.9632, riferito a condizioni di pressione e temperatura standard ($P=1.013$ mbar e $T=25^\circ\text{C}$). Per le stime dei valori di esposizione (AOT40) è stata utilizzata una funzione lineare ottenuta dalla relazione tra le concentrazioni medie settimanali ed i valori di AOT40 stimati secondo il procedimento di Gerosa et al. (2007).

Il nuovo metodo di stima si basa su una regressione lineare semplice ed è stato sviluppato in tre fasi successive: prima è stato verificato il concetto, osservando la relazione tra concentrazione media settimanale di ozono e AOT40 misurato, utilizzando il set di dati ricavato dalle centraline automatiche, divisi in due fasce altimetriche (sopra e sotto i 500 m s.l.m.); poi sono state costruite le funzioni generiche dai dati di concentrazione ottenuti da tre anni di misure con campionatori passivi in provincia di Trento e dai valori di AOT40 stimati da Gerosa et al. (2007); terzo, le funzioni sono state testate su un insieme di dati indipendenti provenienti dai siti di campionamento italiani del progetto CONECOFOR; infine le funzioni sono state applicate ai dati 2010 delle stazioni forestali trentine. Le funzioni generiche che si ricavano applicando il procedimento descritto in dettaglio da Ferretti et al. (in preparazione), partendo da valori medi settimanali di ozono, forniscono delle stime di AOT40 rapide e realistiche, senza la necessità di dati aggiuntivi, assunzioni e/o funzioni matematiche relativamente complesse.

2.1.3 Concentrazioni ed esposizione

I valori medi settimanali delle concentrazioni di ozono registrati nel 2010 e la rispettiva deviazione standard sono riportati in Tabella 2. Nella medesima tabella è inserita inoltre l'informazione sulla completezza del dato raccolto; la campagna di misura ha fatto registrare valori buoni con la perdita -nel peggiore dei casi- dei dati di due settimane su 13 (=85%).

Tabella 2. Concentrazioni medie (\pm deviazione standard) di ozono rilevate tra il 5 maggio ed il 4 agosto 2010 in provincia di Trento e completezza del dato.

NOME STAZIONE	completezza %	[O ₃] $\mu\text{g}^*\text{m}^{-3}$	
VAL CANALI	100	42,03 \pm	24,32
CASTELLO TESINO	85	45,06 \pm	27,50
PINZOLO	85	45,83 \pm	27,56
BEDOLLO	100	52,34 \pm	31,77
PEIO	100	52,72 \pm	30,07
LEVICO TERME	100	53,14 \pm	31,14
TIONE	92	56,31 \pm	34,90
PREDAZZO	92	56,90 \pm	31,80
TRENTO	100	57,55 \pm	32,86
FAEDO	100	62,52 \pm	38,85
COREDO	92	64,63 \pm	45,26
FONDO	100	65,28 \pm	38,82
CANAZEI	100	71,31 \pm	44,33
CLES	100	72,56 \pm	43,06
FOLGARIA	100	76,87 \pm	44,72
CANAL SAN BOVO	92	78,80 \pm	46,98
ANDALO	100	89,04 \pm	51,60
CONCEI	100	102,29 \pm	64,39
TONADICO	100	105,52 \pm	60,08
CONDINO	92	110,34 \pm	64,51
BRENTONICO	92	133,42 \pm	83,86

I valori medi più bassi di concentrazione sono stati registrati nel nuovo sito della Val Canali presso la sede di Villa Welsperg nel Parco Naturale Paneveggio Pale di S. Martino (42.03 $\mu\text{g}^*\text{m}^{-3}$), Castello Tesino (45.06 $\mu\text{g}^*\text{m}^{-3}$) e Pinzolo (45.83 $\mu\text{g}^*\text{m}^{-3}$). I valori più elevati sono stati registrati a Brentonico (133.42 $\mu\text{g}^*\text{m}^{-3}$), Condino (110.34 $\mu\text{g}^*\text{m}^{-3}$) e Tonadico (105.52 $\mu\text{g}^*\text{m}^{-3}$).

L'andamento delle concentrazioni misurate dai dosimetri passivi è stato confrontato con quello rilevato dalle centraline APPA (Fig. 2). Come si vede, i due sistemi rilevano coerentemente l'andamento stagionale delle concentrazioni.

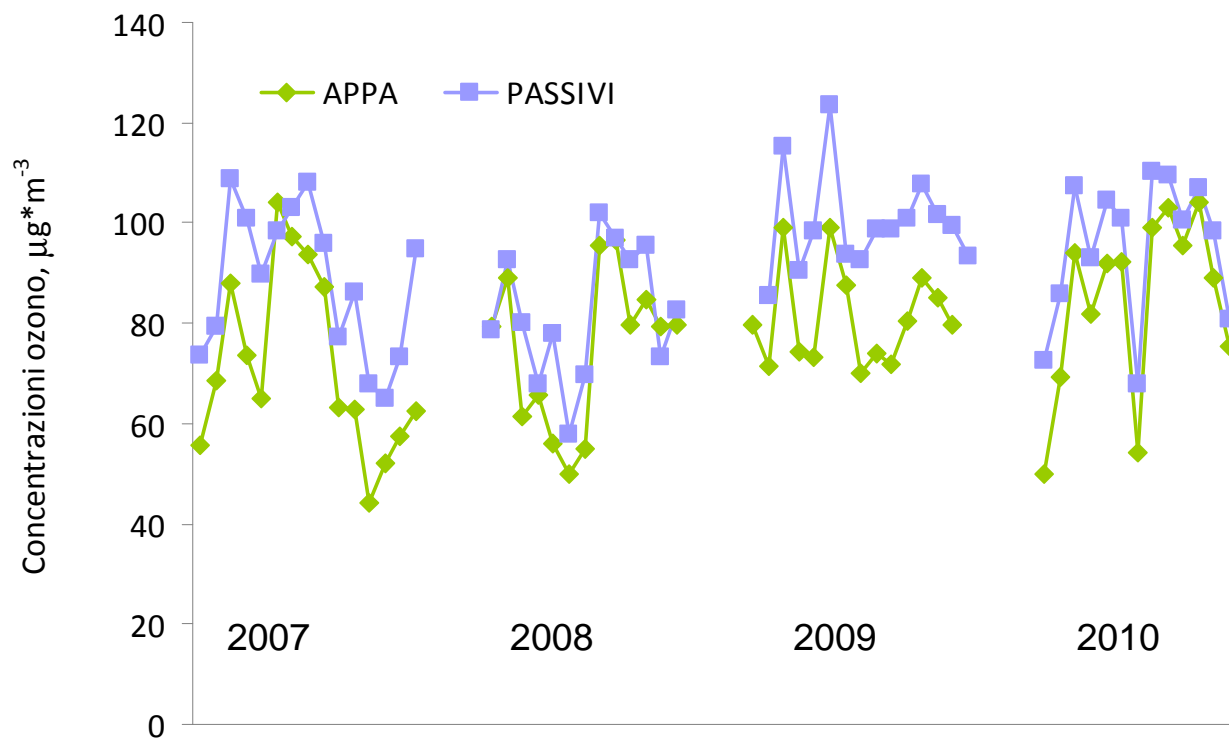


Figura 2. Andamento settimanale delle concentrazioni nei periodi 13/6-19/9/2007, 7/5-30/7/2008, 13/5-2/9/2009 e 5/5-4/8/2010. Passivi: concentrazioni misurate dai dosimetri passivi; APPA: concentrazioni misurate dalle centraline APPA

Analizzando i dati rilevati nelle quattro campagne di misura (2007-2010), dalla Figura 3 possiamo trarre indicazioni sui valori medi di concentrazione di ozono rilevate nel periodo comune di misure (2 giugno – 28 luglio). In verde si riportano - per lo stesso periodo - i valori medi 2009-2010 per le stazioni dove non erano disponibili misure antecedenti.

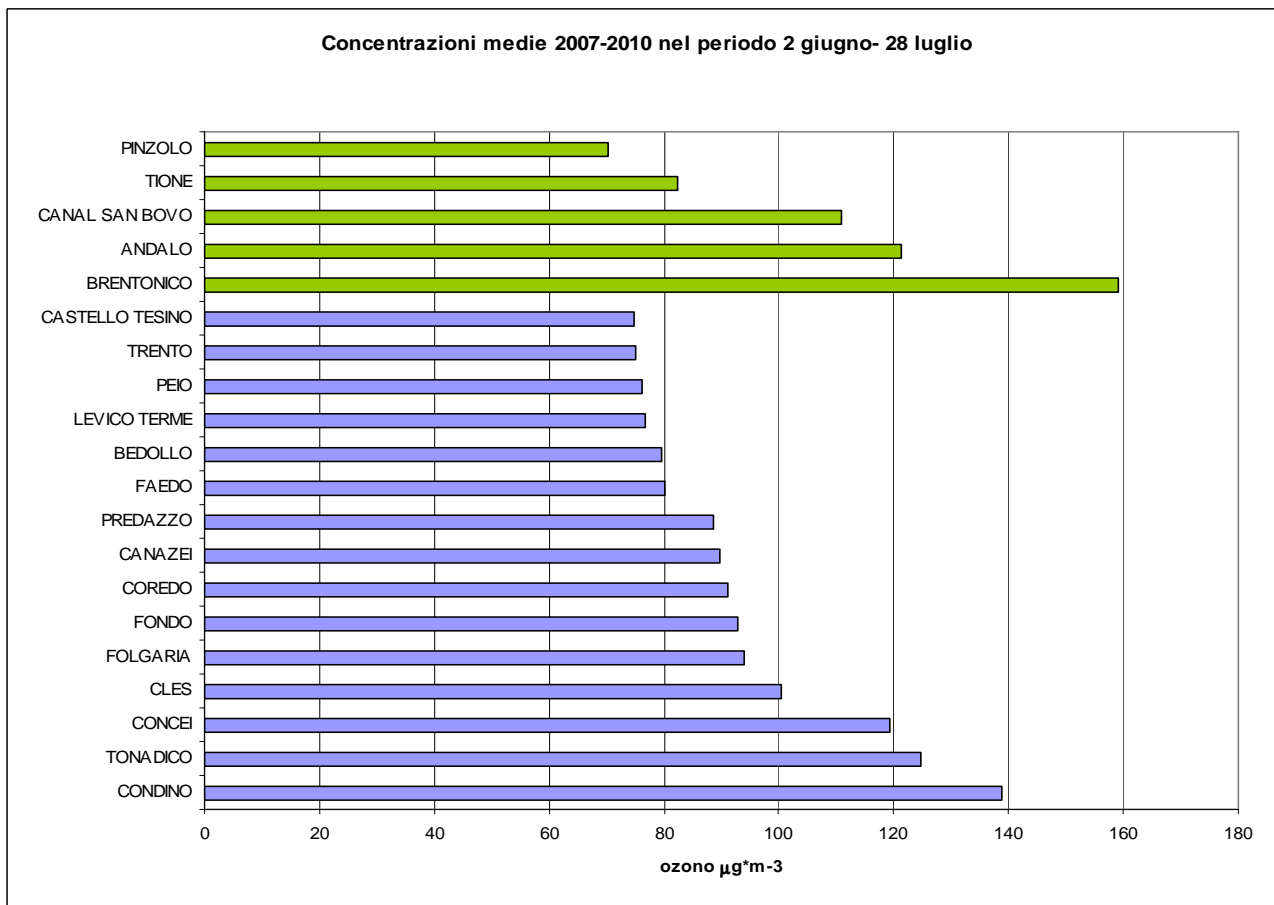


Figura 3. Valori medi di concentrazioni di ozono [2009-2010 (verde), 2007-2010 (viola)] registrati nel periodo 2 giugno -28 luglio espressi in $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Dal confronto con gli anni precedenti nel periodo corrispondente (Fig. 4) si deduce come nel 2010 i valori non si siano discostati di molto dalla medie dei valori registrati negli anni precedenti. Non vi è inoltre una direzione univoca; in certi casi si è notato un aumento, in altri una diminuzione. La stazione di Brentonico ha fatto registrare il valore maggiore con un incremento di concentrazioni rispetto al 2009 superiore a $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

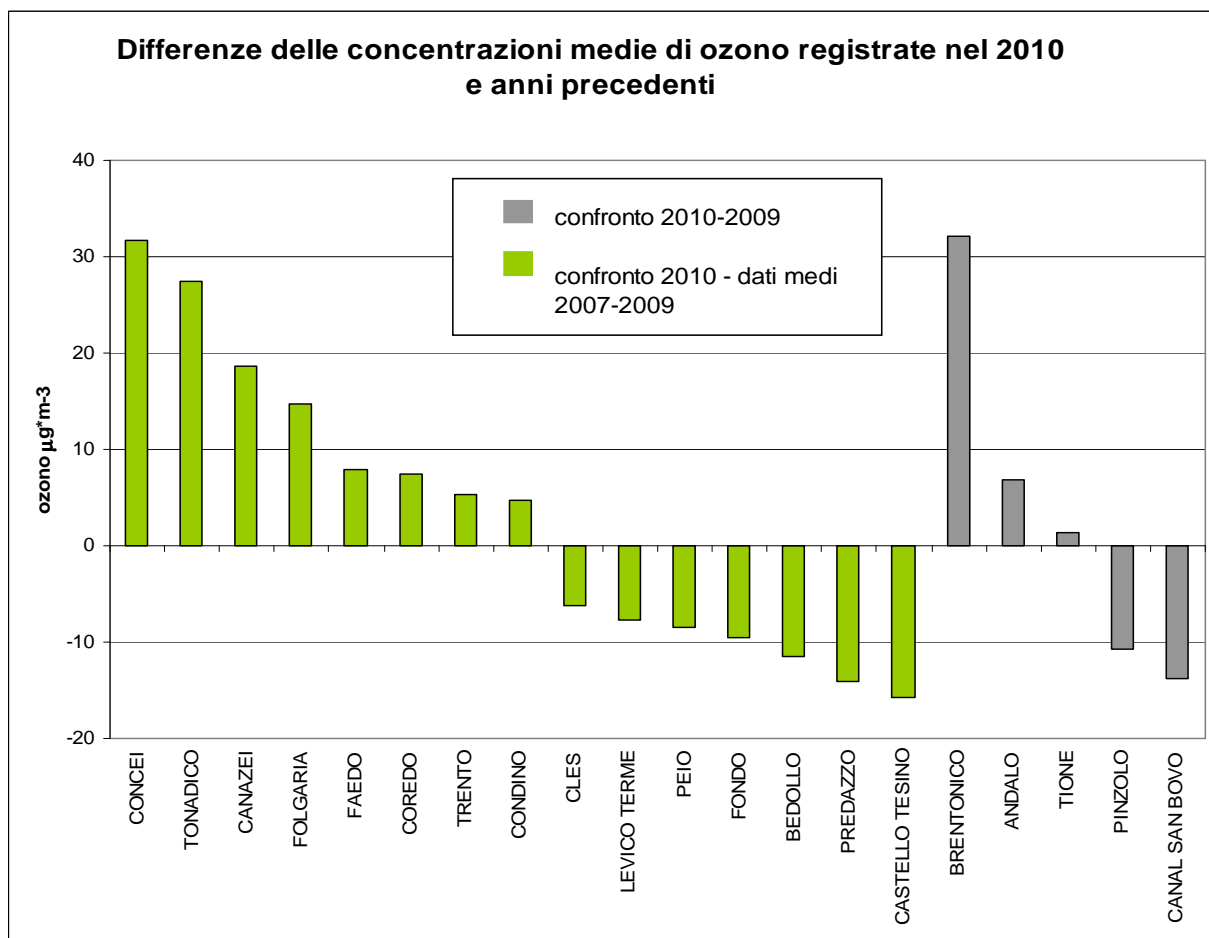


Figura 4. Differenze di concentrazioni medie di ozono tra 2010 e anni precedenti registrate nel periodo 2 giugno 28 luglio.

Al fine di valutare il rischio potenziale per la vegetazione che tali concentrazioni di ozono comportano, sono stati calcolati i valori di AOT40 per il 2010, riportati in Figura 5. La stazione della Val Canali attiva dal 2010 è evidenziata in grigio. Al fine di interpretare i valori osservati ci si riferisce ai limiti riportati dalla normativa come soglie di protezione della vegetazione. Più precisamente al limite di 3000 ppb*h EU/Long Term della Direttiva 2008/50/CE ed al limite di 9000 ppb*h riportato come EU/Target dalla stessa Direttiva.

Si rileva come nel 2010 solo 4 stazioni presentano valori di AOT40 inferiori al limite EU/Long Term di 3000 ppb*h, mentre il valore di 9000 ppb*h EU/Target è superato da 12 stazioni su 21.

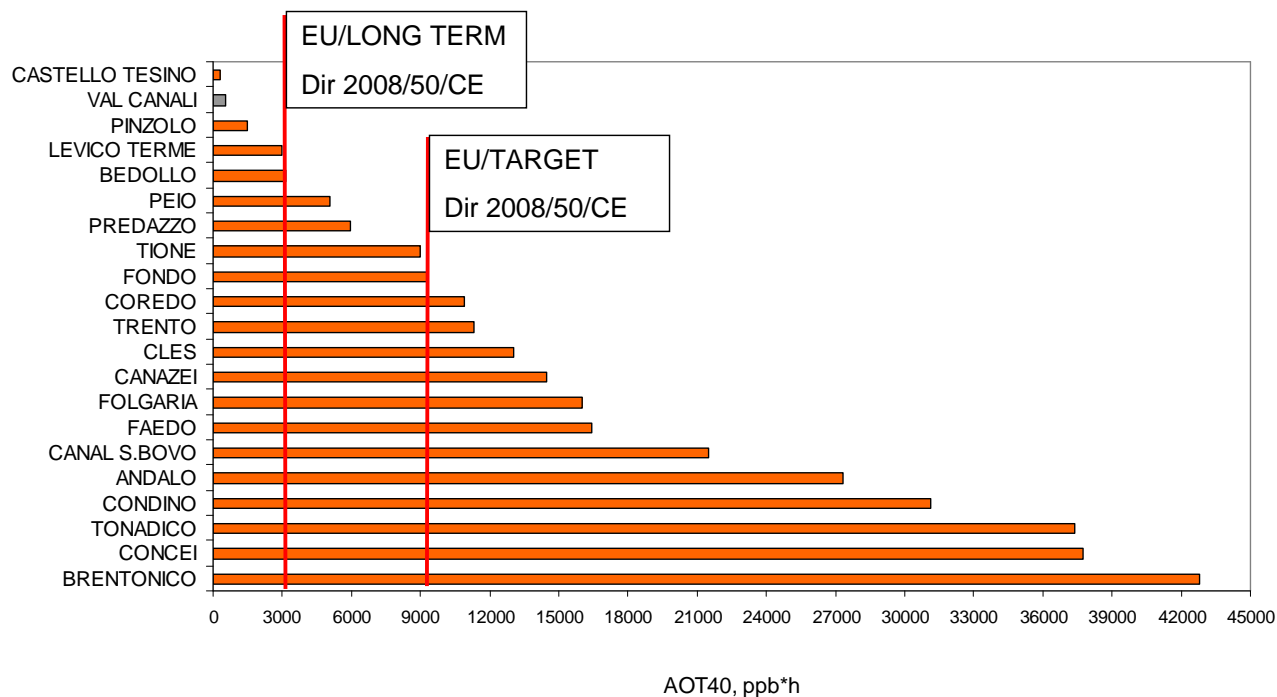


Figura 5. Valori di AOT40 calcolati nel 2010 relativamente al periodo 5 maggio 4 agosto.

L'osservazione dell'andamento temporale (Fig. 6) evidenzia come entro il mese di giugno del 2010 sia stato raggiunto anche il valore massimo indicato dai limiti di 9000 ppb*h.

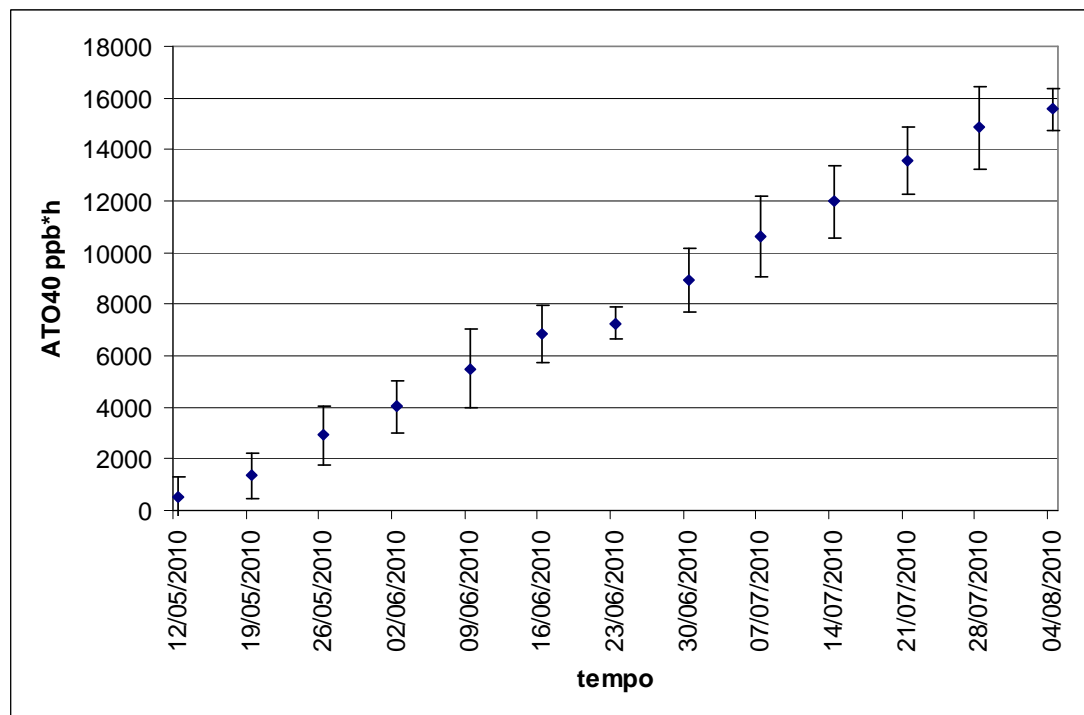


Figura 6. Andamento temporale dei valori di AOT40 registrati nel 2010. Le barre di errore rappresentano la deviazione standard tra le varie stazioni.

2.2 Modelli geostatistici

2.2.1 Dati di input

Per il 2009, il numero totale di siti disponibili per il modello geostatistico è risultato pari a 26, considerando la media delle concentrazioni di ozono dalla settimana dal 20/05 al 05/08/2009 (12 settimane). I dati si riferiscono sia alle centraline APPA che ai dosimetri passivi. In Tabella 3 vengono riportati il nome e le coordinate delle singole osservazioni, i valori mediati delle concentrazioni di ozono e la quota di ciascuna centralina/dosimetro. Per le temperature, i valori settimanali sullo stesso intervallo temporale sono stati quasi sempre misurati in loco e mediati. Laddove le misurazioni erano mancanti, sono stati utilizzati i dati derivati dal modello spaziale delle temperature fornito da FEM opportunamente estratti dal dataset fornitoci per il periodo 2007-2010. La procedura di estrazione (applicata anche per la modellistica 2010 e la modellistica spazio-tempo) ha visto quindi l'acquisizione dei valori di temperatura settimanale in tutto il periodo di riferimento per i punti di *training* del modello, rappresentati dalle centraline geolocalizzate al sistema di riferimento UTM Wgs84 fuso 32N (srid: 32632). La procedura è stata quindi realizzata mediante uno script ciclico sviluppato in ambiente Shell di Grass. Il codice dello script è mostrato qui di seguito:

```
#!/bin/shfor i in `seq 52 105`dov.db.addcol punti_temp col="week$i double"v.what.vect punti_temp qvect="a$i" column="week$i" qcolumn=band1done
```

I dati ottenuti sono stati sintetizzati in un foglio di calcolo per i successivi passaggi del modello. Per la spazializzazione si è invece sempre fatto ricorso a dati modellati su tutta la provincia (modellistica fornita da FEM).

Tabella 3. Quota, temperatura e localizzazione dei 26 punti di misura delle concentrazioni di O₃ nel 2009.

Nome Sito	Longitudine	Latitudine	Ozono ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Altitudine (m)	Temperatura (°C)
Trento PSC APPA	1664477.40	5103259.52	76.69	203.00	22.26
Rovereto - Largo Posta	1658385.64	5084047.93	90.95	200.00	21.53
Gaza	1651417.55	5105103.49	102.80	1601.00	12.84
Piana Rotaliana	1663165.57	5118500.41	75.42	211.00	21.75
Riva del Garda	1643122.54	5083661.02	78.53	73.00	22.64
Borgo Valsugana	1689883.77	5102744.79	67.35	380.00	20.23
Andalo	1653255.00	5115751.00	115.57	1563.00	14.34
Bedollo	1680976.00	5117859.00	92.62	1399.61	14.62
Brentonico	1650217.00	5069802.00	137.88	1464.00	15.12
Canal SB	1715044.00	5119100.00	114.31	1503.00	13.15
Canazei	1713980.00	5148362.00	89.77	1587.58	11.83
Castel Tesino	1698517.00	5117954.00	88.53	1548.79	11.75
Cles	1651186.00	5132648.00	106.15	1698.01	12.21
Concei	1635204.00	5084579.00	105.53	1308.82	14.26
Condino	1617253.00	5081830.00	120.39	1855.97	11.06



Coredo	1665450.00	5132359.00	94.69	1389.11	14.64
Faedo	1665324.00	5118424.00	85.18	306.06	21.04
Folgaria	1666290.00	5084879.00	96.65	1209.55	14.97
Fondo	1665949.00	5148025.00	115.66	1375.48	15.14
Levico	1680918.00	5100063.00	85.23	1105.10	17.52
Peio	1632826.00	5133037.00	80.50	1675.31	14.09
Pinzolo	1636967.00	5116462.00	68.95	971.00	16.38
Predazzo	1699060.00	5132798.00	97.02	1463.96	15.43
Tione	1633074.00	5099886.00	84.32	719.00	19.20
Tonadico	1713788.00	5132795.00	119.89	1853.55	10.47
Trento	1665808.00	5099179.00	83.50	359.48	21.42

Per l'anno 2010, i punti di raccolta delle concentrazioni di ozono sono risultati in numero maggiore (27). I dati relativi alla concentrazione di ozono su cui è stato sviluppato il modello geostatistico rappresentano le medie delle settimane che vanno dal 05/05 al 03/08 (13 settimane). Le medie ottenute per ciascun punto sono riportate in Tabella 4 assieme a quote e temperature, quest'ultime ottenute da misure in loco. Laddove le misurazioni erano mancanti, sono stati utilizzati i dati derivati dal modello spaziale delle temperature fornito FEM (vedi sopra). Lo stesso modello è stato utilizzato per la spazializzazione.

Tabella 4. Quota, temperatura e localizzazione dei 27 punti di misura delle concentrazioni di O₃ nel 2010.

Nome Sito	Longitudine	Latitudine	Ozono (ug*m-3)	Altitudine (m)	Temperatura (°C)
Trento PSC APPA	1664477.40	5103259.52	85.96	203.00	21.50
Rovereto - Largo Posta	1658385.64	5084047.93	93.35	200.00	20.92
Gaza	1651417.55	5105103.49	117.89	1601.00	11.88
Piana Rotaliana	1663165.57	5118500.41	83.72	211.00	21.21
Riva del Garda	1643122.54	5083661.02	86.43	73.00	21.63
Borgo Valsugana	1689883.77	5102744.79	73.33	380.00	19.51
Andalo	1653255.00	5115751.00	119.75	1563.00	13.31
Bedollo	1680976.00	5117859.00	68.82	1399.61	13.44
Brentonico	1650217.00	5069802.00	154.62	1464.00	13.85
Canal SB	1715044.00	5119100.00	107.56	1503.00	11.94
Canazei	1713980.00	5148362.00	92.87	1587.58	10.59
Castel Tesino	1698517.00	5117954.00	59.60	1548.79	10.51
Cles	1651186.00	5132648.00	91.27	1698.01	11.03
Concei	1635204.00	5084579.00	139.85	1308.82	13.40
Condino	1617253.00	5081830.00	129.67	1855.97	9.98
Coredo	1665450.00	5132359.00	84.86	1389.11	13.59
Faedo	1665324.00	5118424.00	86.63	306.06	20.52
Folgaria	1666290.00	5084879.00	97.61	1209.55	14.00
Fondo	1665949.00	5148025.00	83.31	1375.48	14.00
Levico	1680918.00	5100063.00	69.27	1105.10	16.64
Peio	1632826.00	5133037.00	70.72	1675.31	13.08
Pinzolo	1636967.00	5116462.00	60.53	971.00	15.40
Predazzo	1699060.00	5132798.00	76.09	1463.96	14.33
Tione	1633074.00	5099886.00	83.17	719.00	18.49
Tonadico	1713788.00	5132795.00	139.12	1853.55	9.27
Trento	1665808.00	5099179.00	75.02	359.48	20.73
Val Canali	1721395.00	5120447.00	55.88	1038.00	14.54



2.2.2 Valutazione dell'affidabilità dei dati di input

I dati necessari per lo sviluppo del modello sono coordinate geografiche, quota, temperature e concentrazioni di ozono. Coordinate e quote sono derivate da rilevamenti diretti e dai sistemi geografici di supporto, assunti come riferimenti affidabili. La qualità dei dati sulle concentrazioni di ozono è già stata discussa precedentemente. I dati di T utilizzati sono invece quelli misurati in situ e quelli derivati dai modelli forniti da FEM (Centro Trasferimento Tecnologico, Unità Sistema Informativo Geografico - SIG). L'utilità dei dati misurati in situ nel 2008-2010 è duplice: da un lato possono essere utilizzati direttamente nella costruzione del modello (e quindi è possibile basarsi su un predittore effettivamente misurato), dall'altro consentono una valutazione della affidabilità dei dati di temperatura spazializzati sul territorio provinciale.

La Figura 7 riporta il confronto tra dati misurati e dati modellati per il 2008 e 2009. Circa il 60% delle osservazioni si trova entro una differenza di ± 1 °C, e il 92% tra ± 2 °C. In solo due casi, la differenza tra valori predetti e osservati è stata superiore a 4°C, entrambe le volte a Concei. Esiste una certa tendenza alla sovrastima per i valori bassi ed a una sottostima per valori alti.

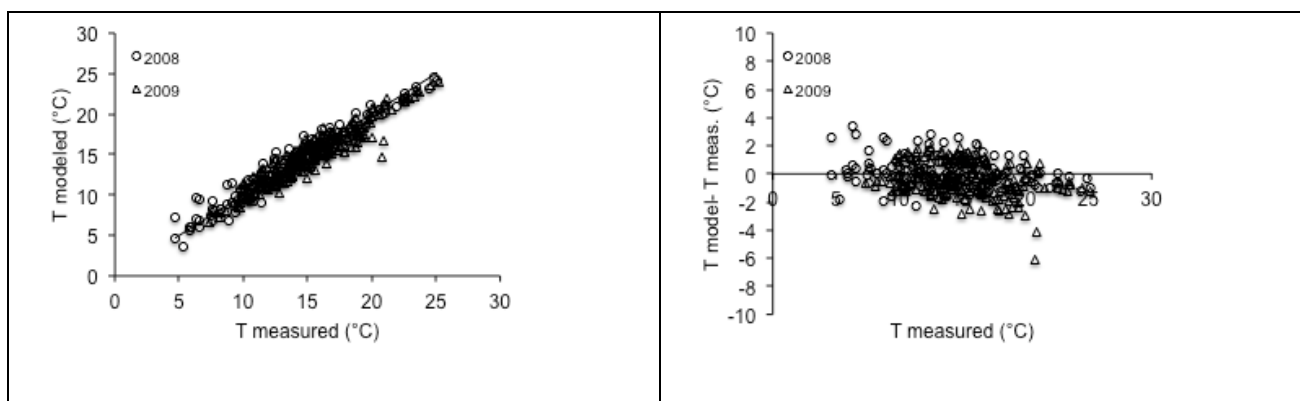


Figura 7. Valori misurati e modellati di ozono (a sx.) e differenza tra le due serie in funzione dei valori misurati (a dx).

2.2.3 Metodi geostatistici

All'interno delle statistiche spaziali, il termine "geostatistica" si riferisce a quei modelli e metodi sviluppati per dati che presentano le seguenti caratteristiche:

i valori di una variabile Y_i ; $i = 1, \dots, n$ sono osservati per un set discreto di punti di osservazioni x_i all'interno di una determinata area A (comune, provincia, regione o nazione, ad esempio);

ogni valore osservato Y_i rappresenta una misura diretta, o comunque risulta statisticamente relazionato al valore di un certo fenomeno continuo nello spazio $S(x)$ (“segnale”, in termini geostatistici; ad esempio si può annoverare come fenomeno continuo nello spazio la concentrazione di ozono, oppure la concentrazione di un certo inquinante nel suolo), per quella specifica località x_i (Diggle & Ribeiro 2007).

Gli obiettivi principali di un’analisi geostatistica sono fondamentalmente rappresentati dal processo di stima e di predizione:

1) il processo di stima si riferisce alla necessità di fare inferenza relativamente ai parametri di un processo stocastico partendo dai dati raccolti. Vengono quindi considerati e stimati quei parametri di interesse diretto, come ad esempio quelli che definiscono una relazione regressiva tra una variabile di risposta (la concentrazione di ozono) e una variabile di tipo esplicativo (la temperatura), oppure i parametri di interesse indiretto, per esempio quelli che definiscono la struttura di covarianza per il modello del “segnale” in analisi $S(x)$.

2) il processo previsionale si riferisce invece all’inferenza che viene effettuata relativamente alla realizzazione di un “segnale” $S(x)$ non osservato. Da un punto di vista applicativo, l’obiettivo specifico di una previsione potrebbe includere la predizione di un certo fenomeno $S(x)$ per una arbitraria località x all’interno di una certa area A . Il risultato di questo processo viene classicamente rappresentato da una mappa dell’area A in cui vengono riportati i valori predetti di $S(x)$ per tutte le possibili località x .

Date queste premesse concettuali, si è proceduto, attraverso le metodologie geostatistiche, a creare delle previsioni spazialmente continue della concentrazione di ozono, relativamente all’intera superficie della Provincia di Trento per gli anni 2008 e 2009. Partendo dai dati puntiformi e discreti disponibili per le concentrazioni di ozono è stato necessario formulare un modello formale e successivamente sono stati stimati tutti i parametri necessari alla sua definizione.

Sulla base dei parametri utilizzati e stimati, sono stati poi successivamente spazializzati (predetti) i valori di ozono su tutta l’area di interesse, separatamente per i due anni indagati. Si procede alla descrizione dettagliata del metodo di formulazione del modello, di stima dei parametri e, infine, della spazializzazione utilizzata. Ovviamente, come per ogni analisi statistica che si effettua è necessario, in fase preliminare, realizzare un’analisi esplorativa dei dati grezzi, così da essere in grado di selezionare le adeguate trasformazioni e i diversi accorgimenti per rendere i modelli previsionali il più robusti possibili. Queste analisi esplorative vengono quindi descritte come primo punto del procedimento complessivo.

Analisi esplorative

i) Non-Spaziali: per ciascun set di dati (2008 e 2009) sono stati sviluppati degli istogrammi relativi alla distribuzione delle frequenze delle concentrazioni di ozono. L'obiettivo di tale operazione è di fornire uno strumento semplice ed immediato per comprendere l'esistenza di asimmetrie evidenti nella distribuzione dei valori (deviazione dalla Normalità), così come di evidenziare la presenza di *outliers*. Per descrivere quantitativamente la deviazione nei valori medi di ozono da una distribuzione normale, è stato applicato un test Shapiro Wilk (1965). Dove necessario, si è proceduto alla normalizzazione dei dati attraverso la famiglia di trasformazioni Box-Cox (Box & Cox 1964).

ii) Spaziali: il metodo più semplice per analizzare quantitativamente la dipendenza spaziale nella distribuzione della variabile di interesse è di effettuare una semplice regressione tra la variabile di risposta e le singole componenti spaziali (latitudine e longitudine). Inoltre, per verificare se i dati di concentrazione di ozono misurati presentano una forte dipendenza spaziale (rispondendo, in altri termini, alla ben nota legge dell'autocorrelazione spaziale), è stato calcolato un semivariogramma empirico per la media della concentrazione per anno considerato. Da un punto di vista generale, per ogni set di dati spazialmente definiti come $(x_i, y_i) : i = 1, \dots, n$, le ordinate del semivariogramma empirico rappresentano le quantità

$$v_{ij} = \frac{1}{2}(y_i - y_j)^2$$

Se i valori y_i presentano una media e una varianza spazialmente costante, allora i valori v_{ij} sono proporzionali a

$$\sigma^2 \{1 - \rho(x_i, x_j)\}$$

dove σ^2 rappresenta la varianza, mentre $\rho(x_i, x_j)$ quantifica la correlazione esistente tra i valori di y_i e y_j .

Se gli y_i sono generati da un processo spaziale stazionario, allora si avrà che il valore $\rho(\cdot)$ dipende esclusivamente dalla distanza tra x_i e x_j e tende allo 0 all'aumentare della distanza considerata. Ne consegue che i valori attesi di v_{ij} tendono ad un valore costante rappresentato da σ^2 , allorché la distanza u_{ij} tra x_i e x_j aumenta. Al contrario, se i valori y_i non sono tra loro spazialmente correlati, allora tutti i valori v_{ij} assumeranno il valore σ^2 . Il semivariogramma viene quindi rappresentato, per comodità di lettura, come i valori di v_{ij} (solitamente il valore medio di semivarianza mediato per la classe di distanza considerata) verso la corrispondente distanza u_{ij} . Da un punto di vista pratico, ciò significa che se la semivarianza v_{ij} in un semivariogramma tende ad aumentare in modo costante, questo risultato potrà essere interpretato come se i valori osservati della variabile di

risposta sono stati generati da un processo stocastico di tipo stazionario. In altre parole, l'intervallo della correlazione spaziale esistente tra i valori della variabile si estenderà anche al di fuori dell'area di studio esaminata. Al contrario, se il semivariogramma presenta un classico andamento in cui inizialmente i valori di v_{ij} crescono per poi raggiungere un andamento asintotico al crescere della distanza tra punti di osservazione, l'autocorrelazione spaziale esistente tra le osservazioni potrà essere correttamente stimata e parametrizzata (attraverso la stima dei parametri del semivariogramma, si veda in seguito) e inclusa nel modello predittivo finale, per ottenere stime maggiormente accurate.

Formulazione del modello geostatistico

Classicamente, un modello geostatistico viene specificato nel seguente modo: in assenza di qualsiasi variabile esplicativa (e.g., quota), e considerando $(x_i, y_i): i = 1, \dots, n$ le località x_i in cui sono stati misurati i valori della variabile di interesse y_i , si ha che il modello stazionario Gaussiano è specificato dalle due componenti:

1) $\{S(x) : x \in \mathbb{R}^2\}$ rappresenta un processo Gaussiano con media μ , varianza $\sigma^2 = \text{Var}\{S(x)\}$ e funzione di correlazione $\rho(u) = \text{Corr}\{S(x), S(x')\}$, dove, come in precedenza, $u = \|x-x'\|$ e $\|\cdot\|$ esprimono la distanza tra i punti di misurazione.

2) condizionate rispetto a $\{S(x) : x \in \mathbb{R}^2\}$, le misurazioni y_i rappresentano misurazioni mutualmente indipendenti della variabile casuale Y_i , normalmente distribuite con media condizionale $E[Y_i|S(\cdot)] = S(x_i)$.

In forma più semplice, il modello può essere specificato utilizzando la seguente notazione

$$Y_i = S(x_i) + Z_i : i = 1, \dots, n$$

dove $\{S(x) : x \in \mathbb{R}^2\}$ è definito dall'assunto al punto uno precedentemente descritto, mentre Z_i sono variabili random con distribuzione $N(0, \tau^2)$ mutualmente indipendenti.

Componenti spaziali e non del modello geostatistico e stima dei loro parametri

Il modello geostatistico appena descritto, necessita dunque di diverse specificazioni e della stima di molti parametri. In particolare:

- *componente spaziale*: al fine di specificare un modello corretto, la funzione di correlazione $\rho(u)$ (quindi la componente spaziale in senso stretto) deve essere positivamente definita. Questa componente, che tende a 0 al crescere della distanza tra le osservazioni, viene graficamente descritta come la componente del semivariogramma che esprime il tasso di crescita della semivarianza al crescere della distanza (quando il semivariogramma assume un andamento

asintotico al crescere della distanza u_{ij} , significa che la funzione di correlazione tra le osservazioni $\rho(u)$ tende al valore 0). La funzione $\rho(u)$ viene stimata fittando al semivariogramma empirico una funzione definita Matern, esplicitata come:

$$\rho(u) = \{2^{\kappa-1}\Gamma(\kappa)\}^{-1}(u/\phi)^{\kappa}K_{\kappa}(u/\phi)$$

e di cui deve essere stimato il parametro di scala Π (per la spiegazione degli altri parametri, si rimanda direttamente a Diggle & Ribeiro 2007). Poiché la componente spaziale è rappresentata anche dagli altri parametri che descrivono il semivariogramma, sempre utilizzando il semivariogramma empirico costruito sui dati misurati, dovranno essere stimati l'intercetta τ^2 (definita anche *nugget* e che rappresenta il valore di semivarianza alla distanza pari a 0; ove sia maggiore di 0, rappresenta la variabilità nei valori osservati dovuta alla varianza presente a scale di osservazione inferiori rispetto a quella considerata e che non è possibile descrivere –rumore o variazione stocastica) e il valore di semivarianza raggiunto nella parte asintotica del semivariogramma, pari a $\tau^2 + \sigma^2$ (questo valore viene definito anche *sill*, che corrisponde alla somma della varianza *nugget* e alla varianza del processo osservato σ^2 , come precedentemente definita). Riassumendo, dunque, per descrivere la struttura di covarianza spazialmente esplicita delle concentrazioni medie di ozono per ciascun anno considerato, sono stati stimati 3 diversi parametri a partire dal semivariogramma empirico costruito sui dati: Π , τ^2 e σ^2 ;

- *predittori ambientali*: la variazione della variabile di interesse rispetto alle diverse località in cui questa viene misurata, può direttamente essere dipendente dalla contestuale variazione di altri parametri fisico-chimici, così come anche topografici. Al fine di considerare questi effetti all'interno di un modello geostatistico, si deve considerare che il valore medio μ del “segnale” in analisi $S(x)$ è dato da:

$$\mu = \beta_0 + \sum \beta_i d_i(x)$$

dove, come in un classico modello regressivo di tipo lineare, β_0 rappresenta l'intercetta, mentre d_i : $i=1, \dots, n$ rappresentano gli *i-esimi* predittori e β_i : $i=1, \dots, n$ i rispettivi coefficienti. L'introduzione di predittori all'interno di un modello geostatistico da vita a un modello definito “a media non costante”. Per questo tipo di modelli, dovranno dunque essere stimati tutti i parametri (coefficienti) relativi a ciascun predittore più, ovviamente, il parametro che esprime l'intercetta.

Per quanto riguarda le concentrazioni di ozono (relativamente a ciascun anno considerato), sono stati utilizzati, i seguenti predittori continui: 1) *quota*, 2) *temperatura*, 3) *latitudine*, 4) *longitudine*.

L'analisi ha avuto come obiettivo quello di sviluppare un modello “parsimonioso”, ovvero in grado di spiegare il massimo della varianza con il minor numero di predittori. Per questo scopo, oltre il fit

individuale dei predittori rispetto alle concentrazioni medie di ozono (per valutare la varianza spiegata da ogni singolo predittore), è stato costruito un modello nullo (solo con i parametri spaziali, come definiti al punto precedente) e un modello totale (considerando invece congiuntamente tutti i predittori all'interno del modello). Dal confronto di questi due modelli, e attraverso una procedura di eliminazione progressiva di predittori dal modello totale (*stepwise* di tipo *backward*) si è giunti alla formulazione del miglior modello parsimonioso. Per evitare al massimo grado la soggettività nella selezione di un modello parsimonioso rispetto ad un altro, è stato inoltre adottato, in fase di *backward selection*, un duplice criterio di selezione (esclusione nel particolare caso in analisi) dei predittori: infatti, oltre a considerare il valore di verosimiglianza dei vari modelli ridotti rispetto ai dati di concentrazione stagionale di ozono (*log-likelihood*, dove ad un valore più alto di questo parametro corrisponde una maggiore similarità del fit del modello rispetto ai dati osservati), è stato calcolato per ogni step, il valore della statistica AIC (Akaike Information Criterion, Burnham & Anderson 2002). Il valore di AIC per un determinato modello viene determinato dalla seguente equazione:

$$AIC = 2k - 2 \ln(L)$$

dove k rappresenta il numero di parametri stimati nel modello statistico, L rappresenta invece il valore di massima verosimiglianza per il medesimo modello. Un altro modo di esprimere l'AIC, dato n il numero dei casi osservati (n° delle osservazioni e repliche) e definiti RSS come la somma dei quadrati dei residui, si ottiene:

$$AIC = 2k + n \left[\ln \left(\frac{2\pi RSS}{n} \right) + 1 \right]$$

Nella costruzione dei modelli basati sul calcolo dell'AIC si preferiscono soluzioni in cui il valore di questa statistica è minimizzato. In altre parole, mediante l'utilizzo dell'AIC si tenta di trovare il modello migliore in grado di spiegare i dati a disposizione utilizzando il minor numero di parametri. L'utilizzo del duplice criterio di selezione ha permesso di effettuare la scelta del miglior modello parsimonioso.

Per quanto riguarda la stima dei parametri (spaziali e non) del modello, la metodologia applicata è stata quella della massimizzazione della verosimiglianza (*maximum likelihood*) per il cui calcolo si rimanda a testi specialistici (Pawitan 2001). Tutte le analisi sono state effettuate utilizzando il software R (R Development Core Team 2010)

2.2.4 Spazializzazione del modello geostatistico

Una volta controllata l'accuratezza del modello sviluppato, i parametri stimati (spaziali e relativi alle variabili ambientali) sono stati utilizzati per la predizione spaziale dei valori delle concentrazioni di ozono per tutta la provincia di Trento. In particolare, per ottenere i valori di ozono per ciascuna delle celle di 1x1 km ottenute, è stato applicato il metodo definito di "kriging" semplice. Le concentrazioni di ozono, per ogni località di interesse, sono state dunque calcolate come:

$$S(x) = \mu + \sum_{i=1}^n w_i(x)(y_i - \mu)$$

dove $w_i(x)$ sono funzioni esplicite dei parametri di covarianza II , r^2 e σ^2 .

Le mappe di sintesi della concentrazione di ozono e della corrispondente varianza sono state realizzate utilizzando una griglia con risoluzione 1km x 1km e estensione pari alla Provincia di Trento. Tutte le analisi e i layout tematici sono stati elaborati sulla base della griglia chilometrica. La griglia è stata sviluppata in modo automatico utilizzando un generatore di griglia di Qgis e i centroidi delle celle utilizzate nel processo di modellizzazione. L'importazione dei dati provenienti dal processo di modellizzazione è stata effettuata attraverso l'importazione diretta in Qgis di file csv (*comma separated value*)

Successivamente i risultati della concentrazione di ozono sono stati proiettati al sistema di riferimento UTM Wgs84 fuso 32N (srid: 32632) con la conseguente produzione della mappa della distribuzione della concentrazione di ozono. Al fine di una corretta visualizzazione ed interpretazione dei dati, la classificazione dei dati è stata effettuata attraverso una scala di colore elaborata su un intervallo di $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, con una soglia minima settata a valori inferiori a $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e una con una soglia massima settata a concentrazioni maggiori di $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Analogamente sono stati proiettati anche i valori di varianza con una classificazione effettuata attraverso una scala di colore elaborata su un intervallo di $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con una soglia minima settata a valori inferiori a $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e una soglia massima settata a concentrazioni maggiori di $240 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.2.5 Validazione del modello geostatistico via Leave One Out

Per la validazione di un modello di regressione è consuetudine basarsi su tecniche di *cross validation*, ovvero su metodiche di validazione che prevedono la costruzione del modello su di un dataset privato di una o più osservazioni, che poi vengono successivamente predette dal modello stesso. In base alla capacità del modello di predire le osservazioni, è possibile valutarne l'efficienza (in termini di errore sulla stima). Il metodo di validazione utilizzato per i modelli 2008-2009 della concentrazione stagionale dell'ozono è stato il *leave one out* (LOO). Questo sistema di validazione prevede l'esclusione di un'osservazione alla volta dal set totale delle osservazioni. Una

semplice regressione tra valori predetti in fase di LOO e valori osservati per ciascun punto è stata calcolata per ottenere una stima della bontà del modello (goodness of fit).

2.2.6 Sviluppo del modello geostatistico 2009

La distribuzione del dato medio di concentrazione di ozono nel 2009 per le 12 settimane e per le 26 stazioni considerate (Fig. 8) mostra una distribuzione pressoché normale (Statistica W= 0.962, $p=0.452$). Per tale motivo non si richiede nessuna procedura di normalizzazione preventiva e il dato è stato inserito all'interno del modello nella sua forma originale.

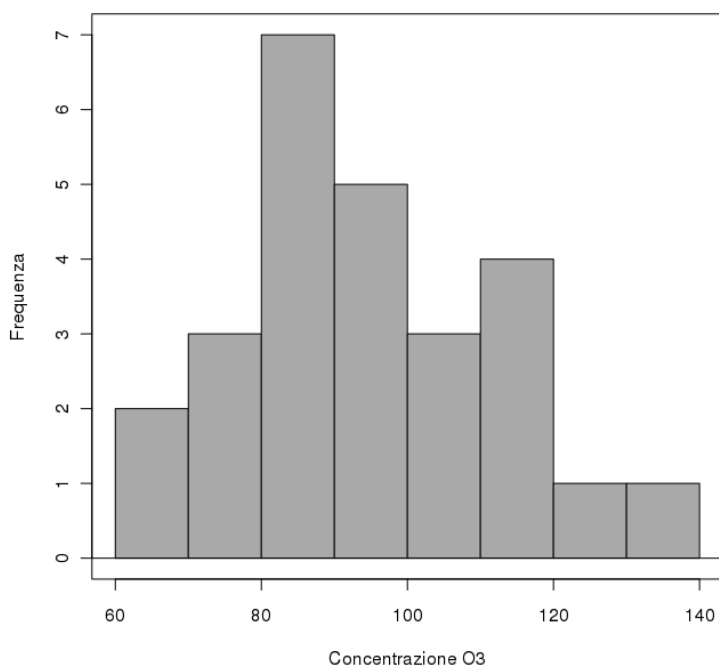


Figura 8. Distribuzione dei valori medi di ozono per l'anno 2009, basati sulle 26 osservazioni disponibili.

Osservando il valore di verosimiglianza ottenuto inserendo nel modello separatamente ciascun predittore (coordinate spaziali, temperatura e quota), si è osservato un generale migliore fitting ottenuto dall'inclusione della sola temperatura (Tab. 5).

Tabella 5. Stima della massima verosomiglianza e dell'AIC per i singoli predittori (i valori stimati delle componenti spaziali non vengono mostrati).

Fit Individuali	Likelihood (AIC)
Coordinate	-110.4 (232.8)
Quota	-107.1 (224.2)
Temperature	-104.6 (219.2)

Il risultato del confronto tra modello totale e modello ridotto ottenuto mediante backward selection dei predittori e che include temperature e quota (escludendo le coordinate dalla stima dei parametri), mostra comunque un'elevata somiglianza (in termini di AIC e di verosomiglianza) con il modello totale, da cui si determina la generale adeguatezza del modello parsimonioso, scelto per la successiva fase di spazializzazione (Tab. 6).

Tabella 6. Descrizione sintetica del modello spaziale ridotto ottenuto dopo le procedure di selezione dei predittori. Il modello ridotto include quota e temperatura.

Modello	Intercetta	X	Y	Quota	T(°)	Parametri Spaziali			
						σ^2	φ	r^2	AIC
Totale	1735.88	0.0002	-0.0004	0.045	3.482	137.9	13799	4.823	212.8
Ridotto	-4.128			0.042	3.307	353.2	49850	10.19	214.1

Il valori predetti dal modello in fase di LOO, mostrano una buona corrispondenza tra valori predetti ed osservati, anche se il modello tende a sottostimare i valori osservati molto alti (Fig. 9).

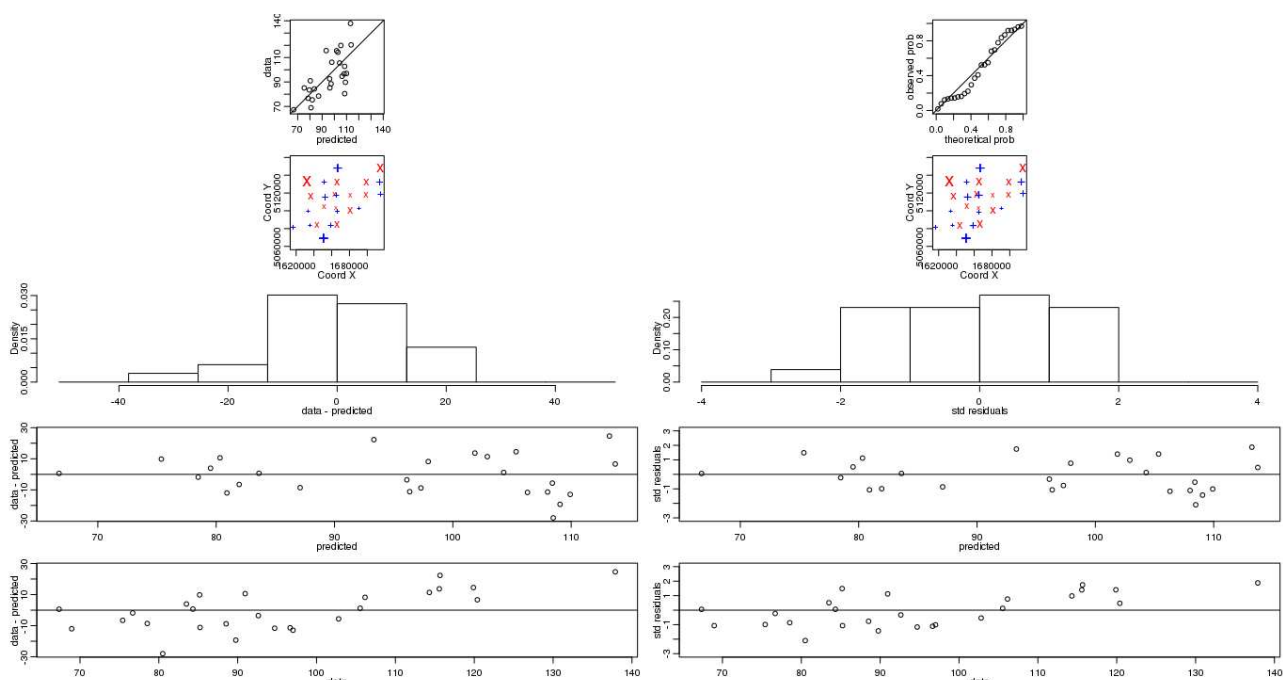


Figura 9. In alto: confronto tra valori predetti dal modello spaziale in seguito a LOO e valori realmente osservati per le concentrazioni di ozono. In basso: differenza tra valori osservati e predetti nello spazio (la grandezza delle croci esprime il valore assoluto del discostamento, il blu esprime un errore positivo, il rosso negativo)

2.2.7 Sviluppo del modello geostatistico 2010

L'analisi di normalità per la distribuzione delle concentrazioni di ozono per le 27 osservazioni disponibili nel 2010, mostra una marcata asimmetria principalmente dovuta ad una coda di valori alti presenti nel set di dati (Fig. 10), ed evidenziata anche dal risultato statisticamente significativo dello Shapiro-Wilk test ($W=0.914$, $p=0.03$). Una volta effettuata la trasformazione del dato mediante l'utilizzo della trasformazione Box-Cox (valore del parametro lambda stimato $=-0.629$), il dato è risultato normalmente distribuito ($W=0.972$, $p=0.679$, si veda anche Fig. 11). Per questo motivo, e considerati gli assunti di normalità necessari per lo sviluppo del modello geostatistico descritto precedentemente, si è proceduto ad utilizzare le concentrazioni medie di ozono trasformate come appena descritto.

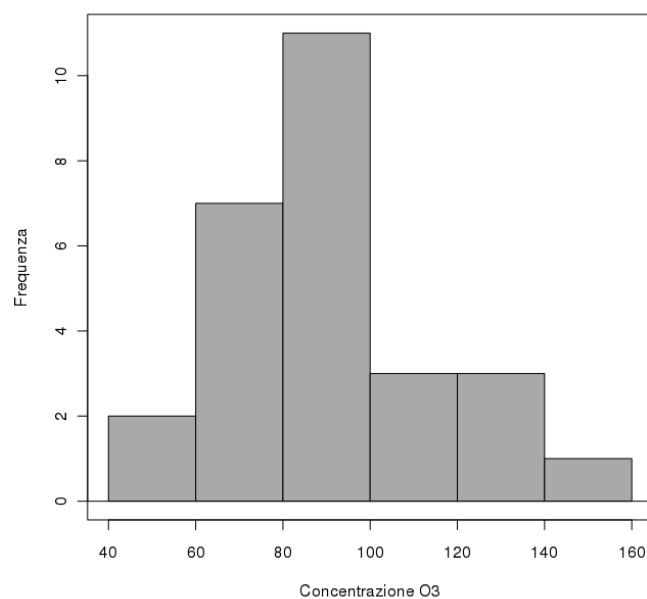


Figura 10. Distribuzione dei valori medi di ozono per l'anno 2010, basati sulle 27 osservazioni disponibili. La distribuzione delle concentrazioni è risultata non normale a causa della coda di valori alti poco frequenti (si veda il testo).

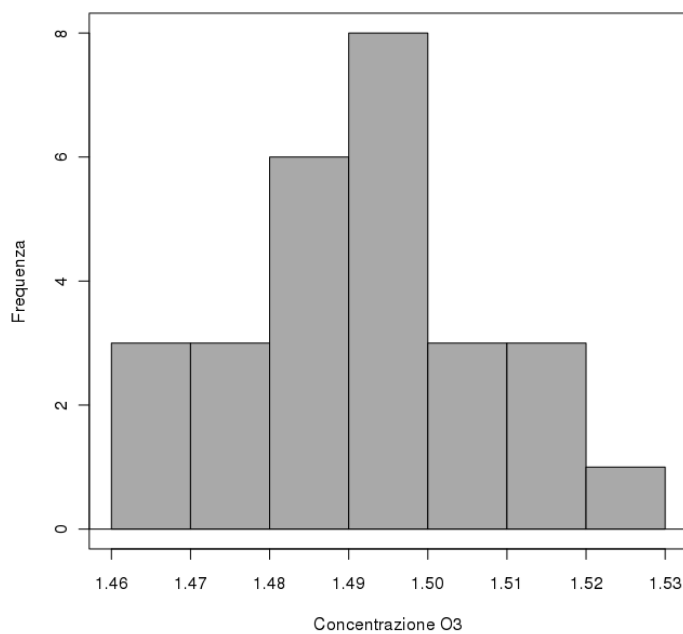


Figura 11. Distribuzione dei valori medi di ozono per l'anno 2010, normalizzati utilizzando la trasformazione Box-Cox (si veda il testo per i test di significatività associati).

Osservando il valore di verosimiglianza ottenuto inserendo nel modello separatamente ciascun predittore (coordinate spaziali, temperatura e quota), si è osservato un generale migliore fitting ottenuto dall'inclusione della sola quota (Tab. 7).

Tabella 7. Stima della massima verosimiglianza (likelihood) e dell'AIC per i singoli predittori (i valori stimati delle componenti spaziali non vengono mostrati).

Fit Individuali	Likelihood (AIC)
Coordinate	-121.3 (259.4)
Quota	-121.2 (255.2)
Temperature	-121.5 (259.1)

Il risultato del confronto tra modello totale e modello ridotto ottenuto mediante backward selection dei predittori e che include temperature e quota (escludendo le coordinate dalla stima dei parametri), mostra, come in precedenza, un'elevata somiglianza (in termini di AIC e di verosimiglianza) con il modello totale (Tab. 8). Di conseguenza, anche al fine di avere modelli geostatistici totalmente comparabili per gli anni esaminati, si è proceduto alla spazializzazione utilizzando il modello ridotto appena descritto.

Tabella 8. Descrizione sintetica del modello spaziale ridotto ottenuto dopo le procedure di selezione dei predittori. Il modello ridotto include quota e temperatura.

Modello	Intercetta	X	Y	Quota	T(°)	Parametri Spaziali			
						σ^2	φ	τ^2	AIC
Totale	3.250	0.000	0.000	0.000	0.0001	0.000	0.000	0.0002	252.4
Ridotto	1.460			0.000	0.008	0.0002	54184	0.0001	253.9

Per il modello selezionato (ridotto) si è osservato che i valori predetti in fase di LOO, tendono a mostrare una certa sottostima dei valori osservati alti, mentre c'è una tendenza a sovrastimare i valori osservati bassi (Fig. 12). Tale andamento può essere dovuto o alla presenza di outliers nel set di dati (questa ipotesi è suggerita dal fatto che, anche utilizzando diverse trasformazioni del dato e diversi modelli, la distribuzione dei dati osservati rispetto ai predetti mantiene lo stesso

pattern) o dalla non inclusione nel modello di variabili esplicative in grado di descrivere questa distribuzione.

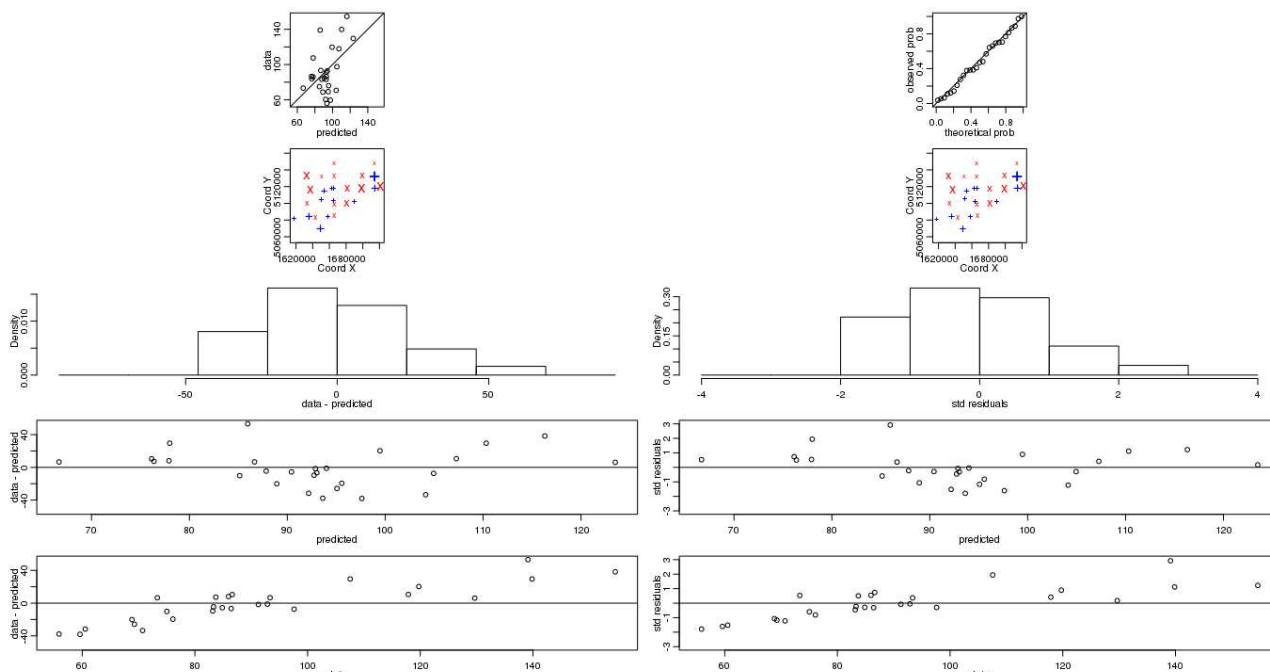


Figura 12. In alto: confronto tra valori predetti dal modello spaziale in seguito a LOO e valori realmente osservati per le concentrazioni di ozono. In basso: differenza tra valori osservati e predetti nello spazio (la grandezza delle croci esprime il valore assoluto del discostamento, il blu esprime un errore positivo, il rosso negativo).

2.2.8 Risultati complessivi del modello

I risultati della validazione mediante LOO indicano che le previsioni del modello sono in linea con i dati misurati e rientrano quasi sempre nel campo di incertezza (*expanded uncertainty*, $p=95\%$) tipico dei dosimetri passivi e che varia tra il 32.8% (concentrazioni $< 10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) ed il 21.2% (concentrazioni $> 80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) (Fig. 13). In quest'ambito, è comunque evidente che il modello sottostima i valori alti.

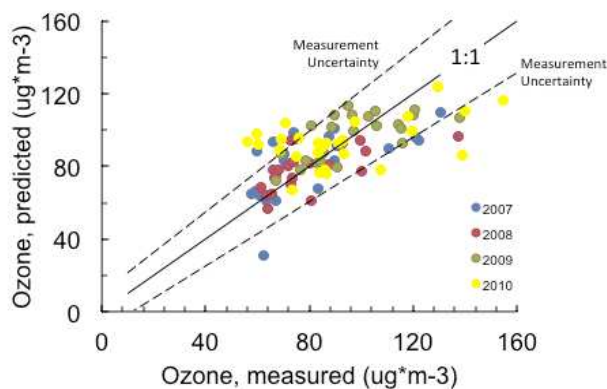


Figura 13. Validazione LOO: concentrazioni di ozono misurato e predetto dai modelli geostatistici utilizzati ai vari anni.

Sulla base di questi risultati, ed utilizzando i dati spazializzati di temperatura ed il modello digitale del terreno, la Figura 14 riporta una stima delle concentrazioni medie di ozono in Trentino ai vari anni. Dalla Figura 14 si nota il tipico andamento dell'ozono, minore nei fondovalle. La Figura 15 riporta invece le varianze delle stime che nel 2010 sono state molto alte a causa della riscontrata maggiore variabilità dei valori misurati.

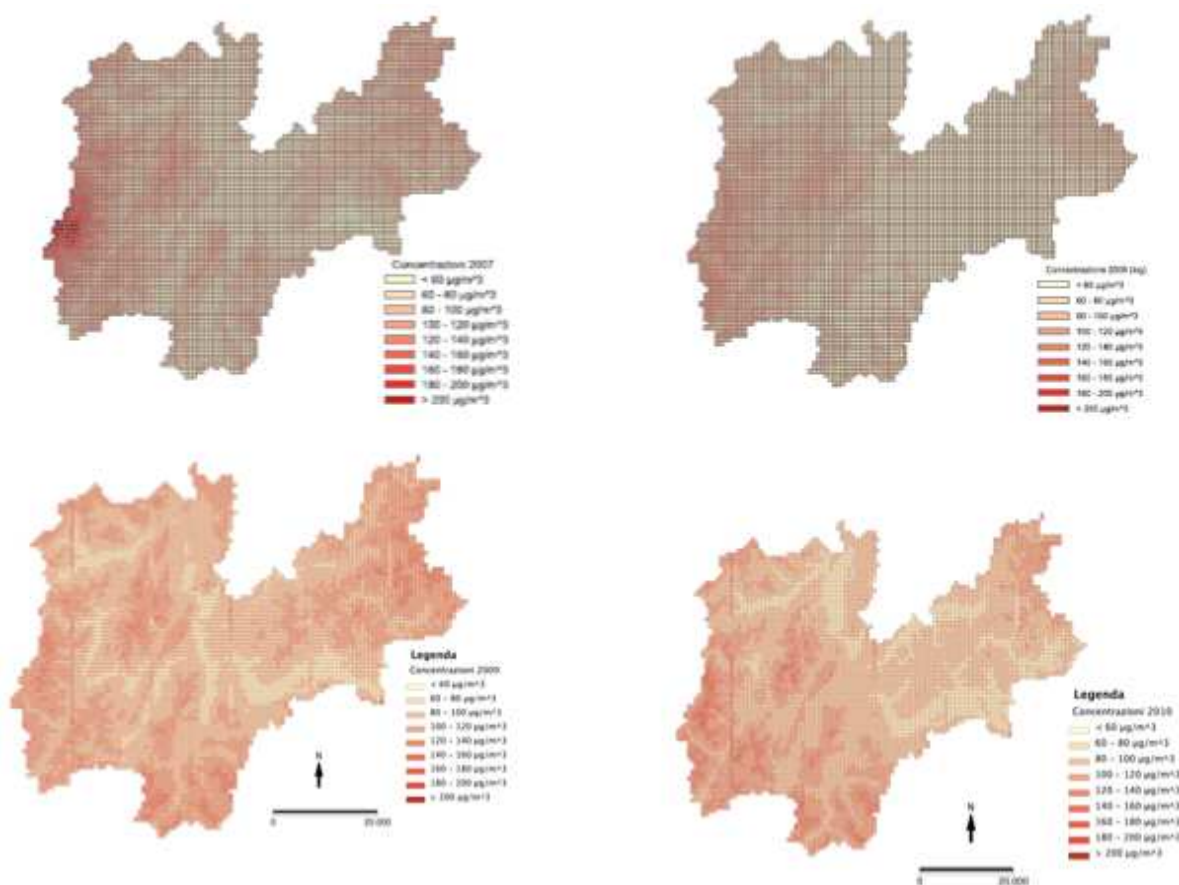


Figura 14. Stima delle concentrazioni medie di ozono in Trentino nei periodi Maggio-Luglio 2007 (in alto a sx); 2008 (in alto a dx); 2009 (in basso a sx) e 2010 (in basso a dx)

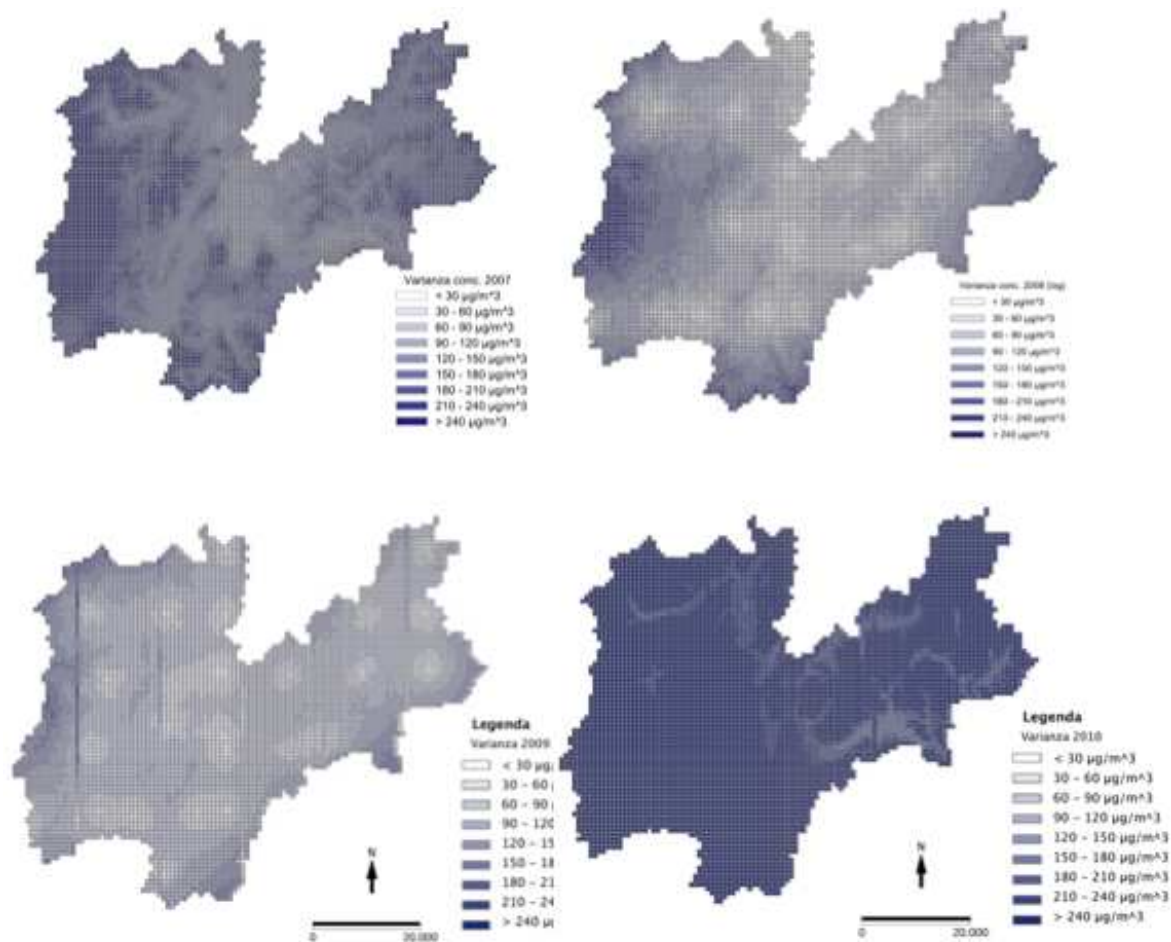


Figura 15. Varianza delle stime delle concentrazioni medie di ozono in Trentino nei periodi Maggio-Luglio 2007 (in alto a sx); 2008 (in alto a dx); 2009 (in basso a sx) e 2010 (in basso a dx).

2.3 Modello previsionale spazio-tempo

2.3.1 Dati Utilizzati

Per lo sviluppo di un modello previsionale di distribuzione delle concentrazioni di ozono per la provincia di Trento, si è utilizzato un data set composto da repliche temporali e spaziali basate su dosimetri disposti in tutto il territorio. In particolare, i dati utilizzati si riferiscono al 2007 e sono composti da:

- 15 stazioni forestali di monitoraggio per il rilevamento dell' ozono (Tab. 9);
- 13 settimane di disponibilità del dato (repliche temporali), a partire dal 20/06/07 fino al 12/09/2007 (Tab. 10).

Per garantire la normalità nella distribuzione del dato e per diminuire la variabilità totale della serie dei dati (in modo da rendere più agevole la stima dei parametri del modello), le concentrazioni di ozono sono state trasformate attraverso trasformazione logaritmica.

Tabella 9. Coordinate delle 15 stazioni di rilevamento della concentrazione di ozono utilizzate per sviluppare il modello previsionale spazio-tempo per la provincia di Trento

Nome Sito	Longitudine	Latitudine
BEDOLLO	1680976	5117859
CANAZEI	1713980	5148362
CASTELLO TESINO	1698517	5117954
CLES	1651186	5132648
CONCEI	1635204	5084579
CONDINO	1617253	5081830
COREDO	1665450	5132359
FAEDO	1665324	5118424
FOLGARIA	1666290	5084879
FONDO	1665949	5148025
LEVICO TERME	1680918	5100063
PEIO	1632826	5133037
PREDAZZO	1699060	5132798
TONADICO	1713788	5132795
TRENTO	1665808	5099179

Tabella 10. Concentrazioni di O₃ per ciascuna settimana di rilevamento (13 in totale) e per ciascuna stazione di rilevamento.

Settimana	BEDOLLO	CANAZEI	CASTELLO	CLES	CONCEI	CONDINO	COREDO	FAEDO	FOLGARIA	FONDO	LEVICO	PEIO	PREDAZZO	TONADICO	TRENTO
20/06/07	65.1	79.1	51.6	83.6	119.2	112.5	78.1	73.6	75.1	77.4	49.8	57.5	78.5	113.9	74.2
27/06/07	92.2	119.9	79.1	103.8	138.5	157.8	118.5	89.7	102.0	110.7	92.2	75.4	108.7	166.9	78.5
04/07/07	86.2	76.3	73.8	108.0	142.1	141.4	101.4	87.1	101.1	95.6	78.4	87.3	93.5	139.3	70.9
11/07/07	80.5	64.9	70.0	95.6	128.1	129.5	98.3	78.2	85.2	91.2	75.9	70.9	83.6	128.5	73.0
18/07/07	79.8	64.9	68.5	119.1	127.5	154.7	113.2	70.9	86.3	115.2	83.0	91.6	108.1	120.2	74.2
25/07/07	94.4	122.6	105.0	120.6	115.9	142.2	109.4	45.5	98.8	107.7	91.9	85.7	93.6	144.2	67.7
01/08/07	88.1	112.1	86.1	123.9	126.4	170.5	118.5	67.5	108.6	112.9	99.7	87.6	119.9	125.1	71.5
08/08/07	77.6	89.2	73.5	108.7	115.1	148.9	94.3	67.7	92.1	94.6	72.1	98.9	113.1	126.4	63.6
15/08/07	43.7	83.9	48.4	68.7	157.4	113.8	74.1	52.1	87.9	78.9	46.8	59.7	81.4	105.3	56.4
22/08/07	47.7	84.2	60.5	93.7	135.3	124.5	82.6	60.7	90.6	73.8	64.9	103.3	85.3	122.0	62.0
29/08/07	49.7	81.4	42.9	74.0	104.7	111.7	56.6	38.1	77.0	69.5	42.9	40.4	76.4	110.6	39.4
05/09/07	41.9	91.9	59.8	62.2	86.5	94.7	46.4	39.1	67.9	63.7	37.5	81.6	63.5	92.5	44.3
12/09/07	63.0	85.3	38.2	68.9	88.7	106.8	63.1	22.8	71.4	85.1	74.7	56.8	78.3	96.9	49.7

Nel modello spazio-tempo sviluppato, si è deciso di introdurre dei predittori ambientali in grado di contribuire a spiegare la variabilità presente nel dato. La stima dei coefficienti regressivi è dunque stata effettuata per:

-temperatura: per ciascuna stazione e per ciascuna settimana, i valori relativi alla temperatura giornaliera sono stati mediati ed utilizzati per la modellizzazione. Le temperature giornaliere sono derivate da modellistica fornita da FEM.



- altitudine: è stata utilizzata la quota sul livello del mare per ciascuna stazione.

Temperature e altitudine sono state inserite nel modello dopo essere state logaritmizzate (soprattutto allo scopo di standardizzare le due variabili che sono misurate su scale completamente differenti).

2.3.2 Formulazione del modello

I modelli statistici per dati spazio-tempo sono sempre più utilizzati nello studio dei cambiamenti climatici, dell'epidemiologia e per i dati da remoto. La modellizzazione dei dati spazio-tempo ha la necessità di prendere in considerazione diverse fonti di variabilità e di autocorrelazione che derivano dalle varie frequenze dell'osservazione temporale, così come dalle varie scale spaziali analizzate. A queste, si aggiungono le possibili interazioni spazio-temporali e l'effetto delle covariate nel determinare la risposta.

Per la stima di un modello spazio-tempo per le concentrazioni di ozono in Provincia di Trento nel periodo compreso tra il 20/06/2007 e il 12/09/2007 (13 settimane in totale), è stata utilizzata una modellizzazione di tipo gerarchico.

I modelli gerarchici possono essere costruiti includendo insieme vari submodelli condizionali che sono definiti gerarchicamente a differenti livelli: nel primo di questi livelli, la variabilità dell'osservazione è modellizzata attraverso la così detta "measurement equation" che, in altri termini, rappresenta semplicemente il segnale più l'errore associato. Nell'approccio classico, il segnale "vero" o trend è rappresentato da una funzione deterministica; invece, nel caso del modello spazio-tempo utilizzato, il trend rappresenta un processo stocastico che è definito ad ogni sublivello della gerarchia e le complesse dinamiche sono suddivise in sub-dinamiche che via via sono modellizzate gerarchicamente. Come ulteriore vantaggio di questo tipo di modellizzazione, si ha che l'incertezza totale del sistema può essere scomposta tra i vari componenti o livelli gerarchici.

Da un punto di vista meramente statistico, il modello spazio-tempo gerarchico può essere definito come segue:

sia $Z(s,t)$ il processo spazio-temporale osservato rispetto al tempo t e alla posizione geografica s . Sia $Z_t = \{Z(s_1,t), \dots, Z(s_n,t)\}$ la rete di osservazioni dello stesso fenomeno al tempo t per n posizioni geografiche. Inoltre, si definisca $Y_t = \{Y_1(t), \dots, Y_p(t)\}$ come un vettore p -dimensionale per il processo temporale non osservato al tempo t e con $p \leq n$. Il modello gerarchico a tre stadi può essere definito per $t=1, \dots, T$ dalle seguenti equazioni:

$$Z_t = U_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$U_t = X_t\beta + KY_t + \omega_t \quad (2)$$

$$Y_t = GY_{t-1} + \eta_t \quad (3)$$

Nella prima equazione, la stima dell'errore viene introdotta cosicché U_t possa essere visto come una versione omogenea del processo spazio-temporale Z_t . Nel secondo livello, il processo non-osservato U_t è definito come la somma di tre componenti: 1) una funzione della matrice $(n * d)$ -dimensionale X_t delle d covariate osservate al tempo t per le n posizioni geografiche; 2) la costante spaziale latente temporale del processo Y_t ; 3) la componente di errore. La componente $(n * d)$ -dimensionale della matrice K è nota e definisce i pesi delle p componenti di Y_t per ogni località geografica $s_i, i=1, \dots, n$. Infine, l'equazione 3, la dinamica temporale di Y_t è modellizzata come un processo autoregressivo p -dimensionale dove G è la matrice di transizione e la componente η_t è il così detto "innovation error". Una caratteristica fondamentale delle tre componenti dell'errore individuate nelle equazioni 1, 2, 3 è di presentare media pari a zero e di essere indipendenti rispetto al tempo e rispetto a se stesse. In particolare, l'errore di pura misurazione ε_t è un processo "white noise" di tipo Gaussiano con varianza e con la matrice di covarianza date da $\sigma_\varepsilon^2 I_n$, dove I_n è la matrice di identità n -dimensionale. La componente η_t nell'equazione 3, rappresenta invece un processo "white noise" p -dimensionale con matrice di varianza-covarianza pari a $\Sigma\eta$. Infine, la pura componente spaziale ω_t dell'equazione 2 rappresenta un processo spaziale Gaussiano n -dimensionale. Questa componente è, per definizione, non correlata con η_t ed ε_t per ogni periodo t e la sua matrice di varianza-covarianza è data da una funzione di covarianza spaziale costante nel tempo definita come:

$$Cov[\omega(s, t), \omega(s', t)] = \sigma_\omega^2 C_\theta(h)$$

dove $h = \|s - s'\|$ è la distanza Euclidea tra i siti s e s' . Dato che la funzione di covarianza dipende solo da h , il processo spaziale è stazionario di secondo ordine e isotropico. Inoltre, la funzione $C_\theta(h)$ dipende dal parametro Θ che deve essere stimato ed è continuo per $h=0$ con $\lim_{h \rightarrow 0} C_\theta(h) = 1$. Un esempio classico di funzione di covarianza è data dalla funzione esponenziale:

$$C_\theta(h) = \exp(-\theta h) \quad (4)$$

Sostituendo l'equazione 2 nell'equazione 1 si ottiene il seguente modello gerarchico a due stadi:

$$Z_t = X_t\beta + KY_t + e_t \quad (5)$$

$$Y_t = GY_{t-1} + \eta_t \quad (6)$$

che può essere considerato come un classico modello "state-space" (Durbion e Koopman 2001), dove l'equazione 5 rappresenta l'equazione di misurazione e la (6) è l'equazione di stato. Se tutti i

parametri sono conosciuti, il processo temporale sconosciuto Y_t viene stimato per ogni periodo t attraverso le tecniche di “Kalman Filter” e di “Kalman smoother” attraverso l'utilizzo delle condizioni iniziali Y_0 date dal vettore Gaussiano p -dimensionale con media μ_0 e matrice di varianza-covarianza Σ_0 . Nell'equazione 5, l'errore $e_t = \varepsilon_t + \omega_t$ ha una distribuzione Gaussiana con media 0 e matrice di varianza-covarianza $\Sigma_e = \sigma_\omega^2 \Gamma(\|s-s'\|)_{i,j=1,\dots,n}$.

Γ rappresenta la funzione di covarianza spaziale scalata definita come:

$$\Gamma_{\gamma,\theta}(h) = \begin{cases} 1 + \gamma & h = 0 \\ C_\theta(h) & h > 0 \end{cases} \quad (7)$$

dove $\gamma = \sigma_\varepsilon^2 / \sigma_\omega^2$. In termini geostatistici, la componente σ_ε^2 può essere interpretata come l'effetto “nugget” del processo spaziale $e(s,t)$ per fissati t .

In conclusione, il vettore dei parametri da stimare nel modello spazio-tempo appena descritto è dato da:

$$\Psi = \{ \beta, \sigma_\varepsilon^2, \text{vec}(G), \text{vecLT}(\Sigma_\eta), \mu_0, \log(\gamma), \theta \} \quad (8)$$

In questo vettore, la componente $\{\Psi, \text{vecLT}(\Sigma_0)\}$ identifica il modello descritto in eq. 5 ed eq. 6.

La corrispondente funzione di verosimiglianza è espressa come segue:

$$\log L(\Psi; z) = -\frac{nT}{2} \log(2\pi) + \quad (9)$$

$$-\frac{1}{2} \sum_{t=1}^T [\log |\Omega_t| + (z_t - \mu_t)' \Omega_t^{-1} (z_t - \mu_t)]$$

Questa funzione complessa e non lineare del vettore dei parametri non noti del modello richiede un particolare tipo di algoritmo specifico per ottenere la sua massimizzazione numerica. Questo algoritmo è definito EM e viene utilizzato come procedura iterativa per la stima degli elementi di Ψ . Questo tipo di algoritmo, definito da McLachlan e Krishnan (1997) è particolarmente utile per problemi legati alla mancanza di dati, come ad esempio, nel caso dei modelli definiti nelle eq. 5 e 6, dove i dati mancanti sono dati dalla variabile latente Y_t . Utilizzando questo algoritmo, la funzione di verosimiglianza completa è data da:

$$\begin{aligned} \log L_c(\Psi; \bar{z}) \propto & -\frac{T}{2} \log |\Sigma_c| + \\ & -\frac{1}{2} \sum_{t=1}^T (z_t - X_t \beta - K y_t)' \Sigma_c^{-1} (z_t - X_t \beta - K y_t) + \\ & -\frac{1}{2} \log |\Sigma_0| - \frac{1}{2} (y_0 - \mu_0)' \Sigma_0^{-1} (y_0 - \mu_0) + \\ & -\frac{T}{2} \log |\Sigma_\eta| - \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T (y_t - G y_{t-1})' \Sigma_\eta^{-1} (y_t - G y_{t-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

Ad ogni iterazione $k=1,2,\dots$, l'algoritmo EM consiste di uno step E (expectation) e di uno step M (maximization). Per i dettagli statistici dei due passaggi, si rimanda a Fassò e Cameletti (2009).

La convergenza dell'algoritmo EM si ottiene quando i due seguenti criteri sono raggiunti contemporaneamente:

$$\frac{\|\Psi^{(k+1)} - \Psi^{(k)}\|}{\|\Psi^{(k)}\|} < \pi$$

e

$$\frac{\|\log L(\Psi^{(k+1)}; z) - \log L(\Psi^{(k)}; z)\|}{\|\log L(\Psi^{(k)}; z)\|} < \pi$$

dove $\|\cdot\|$ è la distanza Euclidea e π è una quantità fissata a priori.

Attraverso l'utilizzo del pacchetto STEM (Cameletti 2009) del software R, si è proceduto a stimare il vettore Ψ utilizzando la funzione Stem.estimation (si veda l'Appendice) utilizzando $k=10000$ (numero di iterazioni) e $\pi=0.05$ (parametro anche definito precisione). Una volta raggiunta la convergenza dell'algoritmo EM basata sui due criteri appena descritti, i parametri stimati per il modello spazio-tempo (eq. 8) sono stati utilizzati per simulare il processo spazio-tempo per ciascuna stazione. Al fine di avere un valore medio predetto, il processo di simulazione è stato ripetuto 1000 volte e la media dei valori ottenuti utilizzata come stima della concentrazione di O₃ per ogni periodo t . Al fine di osservare la coerenza generale del modello, sono state successivamente calcolate delle semplici correlazioni con i dati osservati.

2.3.3 Modello previsionale spazio-tempo

La distribuzione delle concentrazioni di ozono (log-transformed) rispetto alle settimane di rilievo e per ciascuna centralina, è mostrato in Figura 16. La relazione tra temperatura ed ozono è sempre positiva.

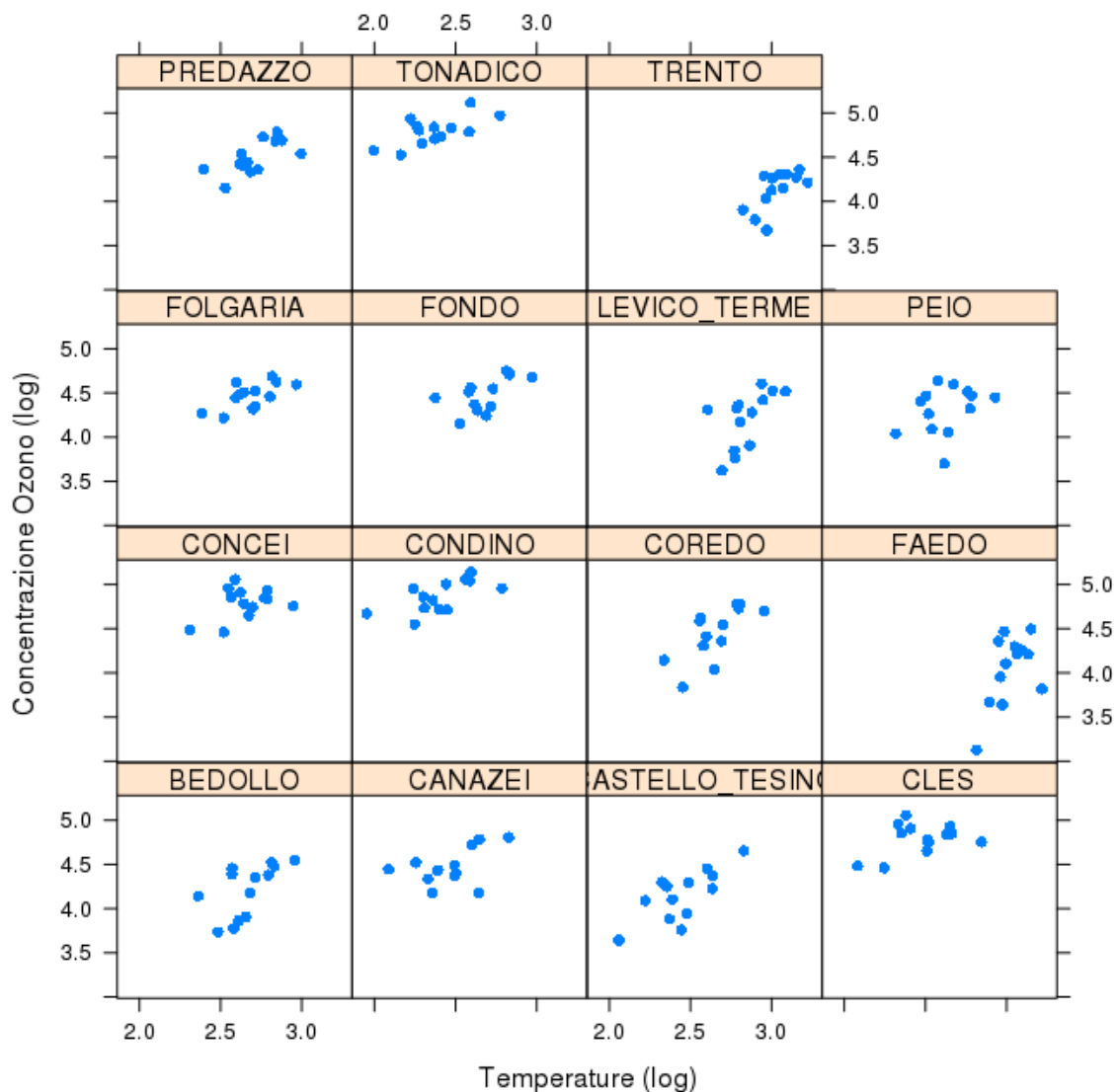


Figura 16. Distribuzione delle concentrazioni di ozono (log-transformed) rispetto alle temperature medie settimanali (log-transformed), per ciascun sito.

L'utilizzo della massima verosimiglianza per la selezione del miglior modello spazio-tempo (tab. 11), mostra come l'inclusione di entrambe le covariate (temperatura e altitudine) nel modello è in grado di minimizzare il valore di likelihood, rispetto all'inclusione delle singole covariate o rispetto al modello nullo (solo l'intercetta). L'analisi della verosimiglianza evidenzia anche che la quota, più che la temperatura, è un predittore con capacità di ridurre maggiormente il valore di logLikelihood (bisogna però considerare che la quota assume un valore unico per stazione di rilevamento). La stima dei parametri di dipendenza autocorrelativa spaziale e temporale del modello, insieme agli intervalli di confidenza (95%) e alla stima dei coefficienti del modello lineare (intercetta, temperatura e quota) sono riportati in Tabella 12. I coefficienti regressivi, in particolare, mostrano

come la quota sia correlata positivamente con i residui del modello, mentre le temperature negativamente.

Tabella 11. Stima della massima verosimiglianza utilizzata per la selezione del miglior modello spazio-tempo della concentrazione di ozono in provincia di Trento

Modello	Valore LogLikelihood
Quota +Temperature (Modello selezionato)	-19.196
Quota	-22.480
Temperature	-57.368
Null Model (solo intercetta)	-126.27

Tabella 12. Parametri stimati, loro errore standard e relativi intervalli di confidenza (95% Inferiore e Superiore) per il modello Spazio-Tempo basato su temperature e quote.

Parametri del modello	Valore Stimato	Errore Standard	T-Test Value	95% IC Inf	95% IC Sup
Intercetta	2.865	0.391	8.089	2.076	3.561
Quota	0.233	0.032	6.663	0.216	0.287
Temperature	-0.020	0.098	-0.960	-0.030	0.010
Sigma2epsilon	0.002	0.007	1.512	0.001	0.003
Sigma2omega	0.070	0.006	8.311	0.049	0.099
Theta	>0.001	>0.001	0.954	>0.001	>0.001
G	0.187	0.073	3.011	0.001	0.206
SigmaEta	0.015	0.014	1.472	0.005	0.034
m0	-0.499	1.258	-0.278	-2.444	0.278

In seguito a 1000 simulazioni del processo Gaussiano spazio-temporale stimato attraverso il modello descritto nei metodi, è stata predetta la media delle concentrazioni di ozono settimanali per ciascuna stazione (valori predetti); la bontà del modello è stata dunque valutata correlando (attraverso il coefficiente di correlazione di Pearson, Tab. 13) i valori osservati con quelli predetti (da 1000 simulazioni, Fig. 17). In generale si osserva un'alta correlazione positiva tra le due serie di dati, per singola stazione. Unica eccezione è rappresentata dal Sito Concei (la correlazione tra valori predetti e stimati è negativa prossima allo zero e non significativa). La stazione per cui i valori predetti dal modello sono invece risultati migliori, è rappresentata dal sito Cles ($r=0.835$, $p=>0.001$).

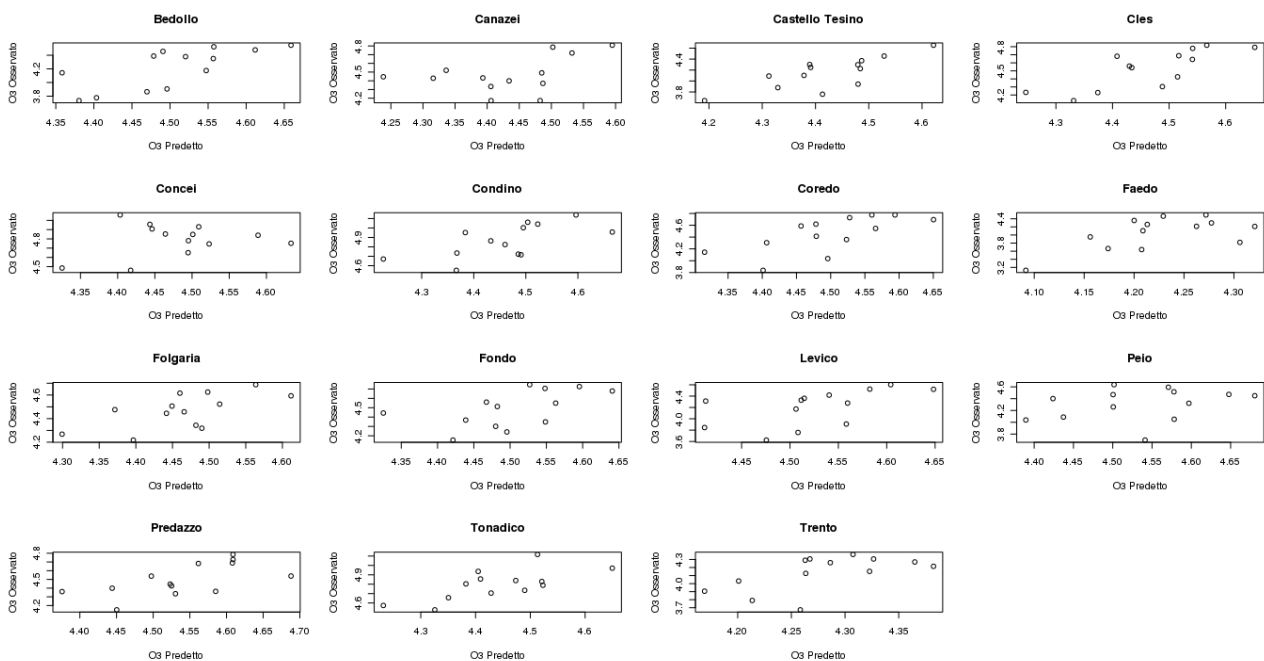


Figura 17. Correlazione tra le concentrazioni di ozono osservate (i valori sono log-transformed) e la media di 1000 simulazioni della concentrazioni di ozono ottenute attraverso la stima dei parametri del modello spazio-temporale.

Tabella 13. Correlazione di Spearman (e relativo test di significatività) tra concentrazioni di ozono osservate e predette dal modello spazio-tempo (queste ultime basate su 1000 simulazioni del modello).

Stazione	Coefficiente di Correlazione (Spearman rho)	P-value
Bedollo	0.780	0.002
Canazei	0.363	0.222
Castello Tesino	0.719	0.007
Cles	0.835	>0.001
Concei	-0.054	0.863
Condino	0.774	0.002
Coredo	0.704	0.007
Faedo	0.456	0.119
Folgaria	0.626	0.025
Fondo	0.538	0.061
Levico	0.719	0.007
Peio	0.285	0.343
Predazzo	0.692	0.011
Tonadico	0.604	0.032
Trento	0.610	0.026

2.4 Stima modellistica dei flussi stomatici di ozono al sito di Passo

A livello della comunità scientifica di settore, molta attenzione viene posta nel valutare la differenza tra la concentrazione di ozono troposferico e la quantità di ozono realmente assorbita dalla pianta attraverso gli stomi. È stato quindi deciso di verificare il discostamento tra le stime di esposizione con AOT40 e la stima dei flussi stomatici di ozono in un sito con adeguata disponibilità dei dati di input necessari per lo sviluppo del modello. La stima dei flussi stomatici è stata quindi realizzata per il sito di Livello II di Passo Lavazé. Si prevede di utilizzare le informazioni ottenute anche al fine

di fornire una possibile interpretazione delle risposte delle piante in termini di accrescimento e defogliazione.

Il calcolo dei flussi stomatici di ozono richiede l'implementazione di un modello che calcoli la reale quantità di ozono che penetra negli stomi delle piante nell'unità di tempo, a partire dai dati orari delle concentrazioni atmosferiche di O₃, delle condizioni atmosferiche, della geometria del popolamento, dell'acqua disponibile nel suolo e della fisiologia della pianta. Tale quantità, integrata per l'intero periodo vegetativo, costituisce la dose di ozono assorbita dalle piante.

Le concentrazioni orarie di ozono, i dati primari necessari, sono state ottenute con un processo di disaggregazione dei valori medi settimanali di concentrazione di O₃ rilevate dai dosimetri passivi esposti nel sito di studio, ipotizzando un'evoluzione giornaliera media del profilo di O₃ tipica di aree montuose poste alla stessa quota altimetrica (Loibl et al., 1994; Gerosa et al., 2007).

Il modello implementato si rifà al modello DO3SE utilizzato in ambito UN/ECE per la stima dei flussi stomatici, del quale sono stati mutuati integralmente struttura e parametrizzazioni adattandole alle serie dei dati meteo e chimici disponibili.

Il modello prevede una *canopy* forestale di 28.2 m di altezza, con *leaf area index* di 2.94 costante nel corso della stagione, e stima la dose stomatica di ozono per una porzione apicale di chioma di LAI unitario.

Le resistenze alla deposizione di ozono, atmosferiche e della *canopy*, sono state calcolate a partire dagli input meteorologici (*in primis* il vento) e dalla conduttanza stomatica fogliare. Quest'ultima è stata simulata mediante un sottomodulo prognostico di tipo *jarvisiano* a partire dalla conduttanza stomatica massima per la specie (125 mmol m⁻² s⁻¹; UN/ECE 2009) e dell'azione limitante giocata dal potere evaporante dell'atmosfera (VPD), dalla temperatura, dalla luce (che ne determina la dinamica circadiana) e dalla disponibilità di acqua nel suolo.

Quest'ultima è stata stimata dinamicamente a partire dalla tessitura del suolo e dalla profondità di esplorazione delle radici, tenendo conto del bilancio giornaliero tra precipitazioni ed evapotraspirazione (*bucket strategy*).

Le simulazioni sono state condotte per gli anni compresi tra il 1996 e il 2009 con l'eccezione del 1998 (solo 1/6 di dati disponibili e con disposizione temporale disomogenea) e del 2007 (per mancanza dati di ozono). Per gli anni precedenti il 2002, in mancanza di dati di vento e di radiazione solare, si è proceduto ad applicare una ventosità e una radiazione media tra quelle disponibili tra il 2002 e il 2009.

I risultati evidenziano un'elevata esposizione all'ozono (AOT40 delle ore di luce compreso tra un minimo di 30000 ppb-h e un massimo 87000 ppb-h) e un flusso stomatico significativo (AF_{st0}) compreso tra 36.3 e 49.4 $mmol\ m^{-2}$. Anche tenendo conto della capacità detossificante delle piante, simulata mediante l'introduzione della soglia istantanea di flusso di 1.6 $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ da sottrarre a ciascun flusso orario ($AF_{st1.6}$), la dose di ozono fitotossicologicamente attiva (compresa tra un minimo di 22.1 e un massimo di 35.7 $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$) appare rilevante se confrontata con il livello critico provvisoriamente stabilito in 4 $mmol\ m^{-2}$ dall'UN/ECE (2009 per faggio e betulla, le uniche specie per cui è stato derivato il livello critico di flusso).

L'esposizione e la dose stomatica appaiono ben correlate linearmente ($R^2=0.85$ nel caso di $AF_{st1.6}$), a rivelare la pressoché trascurabile influenza della disponibilità idrica sulla conduttanza stomatica esibita dalle piante nel sito di Lavazé. I parametri che appaiono limitare più fortemente la conduttanza stomatica (e dunque la dose assorbita), sono infatti la temperatura dell'aria e il VPD.

Per una trattazione specifica dell'argomento si rimanda all'allegato I.

3. Effetti sulla vegetazione

Nel corso della stagione vegetativa 2010 è stato effettuato il rilievo dei sintomi fogliari attribuibili ad ozono presso i seguenti siti:

- il sito di Livello II di Passo Lavazé; il rilievo è stato condotto il 20 agosto 2010;
- i 30 quadrati selezionati per lo studio sulla specie arbustiva spontanea *Viburnum lantana* L.; i rilievi sono stati effettuati nel periodo 4 agosto-3 settembre 2010.

Al fine di valutare in maniera più esaustiva i possibili effetti dell'ozono sulle foreste, è stato inoltre impostato uno studio correlativo sull'accrescimento e lo stato di salute delle piante forestali in relazione ai livelli di inquinante, sfruttando le diverse sorgenti di dati già presenti per la provincia.

3.1 Vegetazione spontanea nel sito di Livello II di Passo Lavazé

3.1.1 Metodologia di rilievo dei sintomi fogliari da ozono

Come previsto dalla metodica ICP Forests (Manual Part VIII Assessment of Ozone Injury - http://www.icp-forests.org/pdf/FINAL_AAQsympt.pdf) il rilievo dei sintomi da ozono sulla specie legnosa è stato effettuato lungo il margine forestale esposto alla luce (LESS) più vicino al campionario passivo per l'ozono (Fig. 18). 33 rettangoli (miniplot) delle dimensioni di 1 x 2 m

ciascuno sono stati selezionati a partire da un margine di 1268 m (percentuale di errore associato: 10%) per verificare la presenza o l'assenza di sintomi visibili.

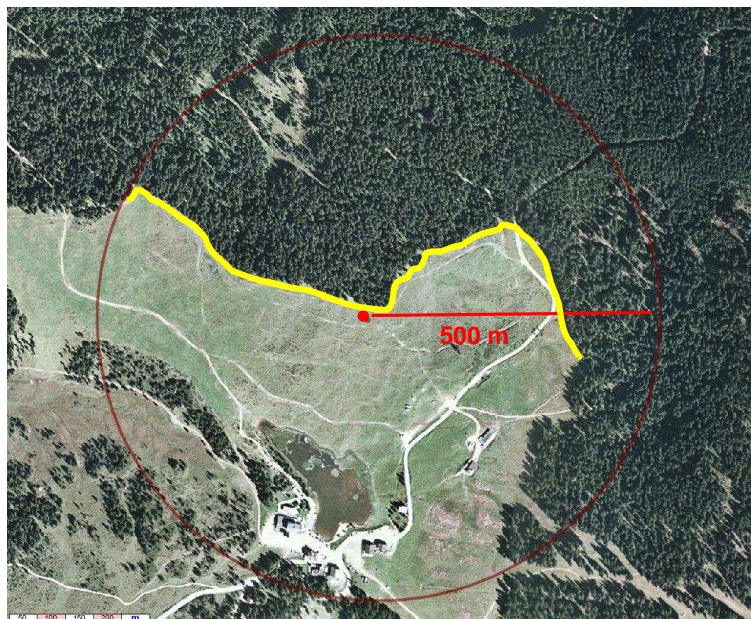


Figura 18. Individuazione del LESS presso il sito di Passo Lavazè.

Il rilevamento dei sintomi sulla lamina fogliare (*stipple*, *chlorotic mottling*, decolorazione, arrossamento o bronzatura) è stato effettuato con l'ausilio di una lente d'ingrandimento 10X, seguendo i criteri suggeriti nel manuale dell'ICP-Forests che fornisce un diagramma di flusso per ottimizzare la diagnosi dei danni da ozono. La presenza di sintomi attribuibili ad altre cause, biotiche od abiotiche, è sempre stata considerata e indicata nelle schede di rilievo. Per assicurare la qualità del rilievo sono state inoltre utilizzate guide di campo, per confrontare i sintomi osservati con il materiale iconografico di riferimento (Innes et al., 2001).

Ad ogni specie è stato assegnato un codice da 0 a 4: 0= assenza sintomi; 1= sintomi ascrivibili ad ozono; 2= sintomi da altri agenti; 3= sintomi 1+2; 4= sintomi non chiaramente attribuibili né all'ozono né ad altri agenti noti quali funghi e/o insetti.

3.1.2 Sintomi visibili nel sito forestale di Livello II di Passo Lavazé

I rilievi effettuati presso il sito forestale di Livello II di Passo Lavazé hanno interessato 33 miniplot di 2 x 1 m, su un margine forestale di 1268 m, stabiliti per ottenere un livello di precisione pari al 10%. In base alla revisione della metodica ICP Forests, sono state osservate solo le specie legnose (*Arctostaphylos uva-ursi*, *Calluna vulgaris*, *Juniperus communis*, *Picea abies*, *Pinus cembra*, *Sorbus aucuparia*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium uliginosum*), con un numero

complessivo di valutazioni pari a 118. Gli unici sintomi rilevati (nel 96% delle osservazioni) sono risultati quelli attribuibili a cause diverse dall'ozono (gelo, insetti, funghi, ecc.).

3.2 Specie O₃-sensibile *Viburnum lantana* L.

3.2.1 Disegno di campionamento e metodi di rilievo

Viburnum lantana L. è una specie arbustiva spontanea diffusa in boschi caducifogli, dalle Alpi fino alla Campania, con distribuzione altitudinale che va dalla fascia collinare a quella sub-alpina. Questa specie, nota per la sua sensibilità all'ozono, reagisce all'esposizione a questo inquinante manifestando sintomi fogliari specifici rappresentati da punteggiature (*stipples*) bruno-scure, presenti sulla pagina superiore della foglia negli spazi internervali (Fig. 19); i sintomi compaiono dapprima sulle foglie più vecchie che quindi sono state esposte all'aria per maggior tempo.



Figura 19. Tipici sintomi da ozono su foglia di *Viburnum lantana*.

L'attività svolta nel 2010 ha riguardato la stima dell'impatto dell'ozono sulla vegetazione spontanea attraverso la valutazione dell'effettiva presenza di sintomi fogliari visibili sulla specie ozono-sensibile *Viburnum lantana*; ciò è avvenuto effettuando il rilievo della frequenza di piante sintomatiche per livello di AOT40 su celle unichilometriche della provincia di Trento. Obiettivo dello studio era mettere in evidenza eventuali relazioni tra la frequenza di sintomi e le soglie di rischio per la vegetazione.

Fasi di lavoro

Selezione delle celle 1x1 km. La selezione è avvenuta sovrapponendo la cartografia floristica di *Viburnum lantana* (Fig. 20) alla mappa di rischio potenziale da ozono per la vegetazione (Fig. 21).

Dal totale dei quadrati con segnalazione di presenza di viburno (N) presenti su tutto il territorio della provincia di Trento, ne sono stati estratti casualmente n=30 (+ riserve) secondo il disegno stratificato per quota e AOT40 di Tabella 14 (Fig. 22).

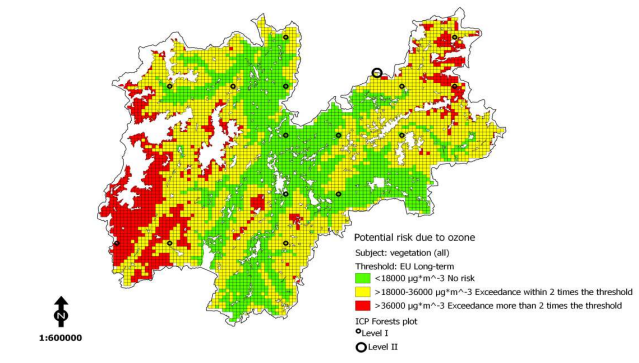
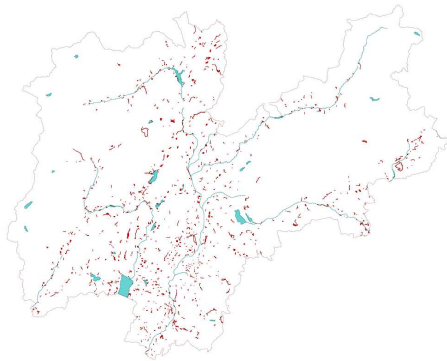


Figura 20. Segnalazioni di *Viburnum lantana* nella provincia di Trento

Figura 21. Valori di AOT40 spazializzati sulle celle 1x1 km della provincia di Trento

Tabella 14. Numero di celle uni chilometriche selezionate per fascia di quota e di AOT40.

Fasce altitudinali	Categorie di rischio AOT40, ppb*h		
	<9000	9000-18000	>18000
<700 m s.l.m.	5	5	5
>700 m s.l.m.	5	5	5

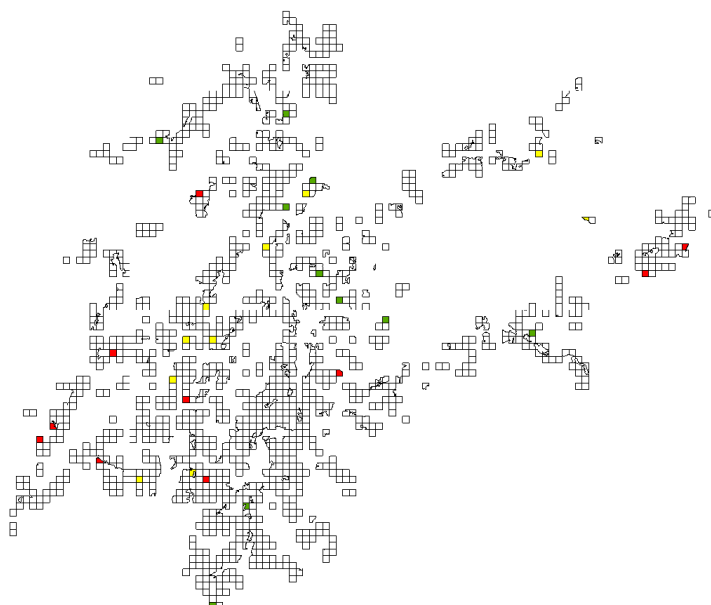


Figura 22 . I 30 quadrati selezionati per i rilievi su *Viburnum lantana* distribuiti nelle tre fasce di AOT40: <math>< 9000 \text{ ppb}\cdot\text{h}</math> (verde), tra $9000 \text{ ppb}\cdot\text{h}$ e $18000 \text{ ppb}\cdot\text{h}$ (giallo), > $18000 \text{ ppb}\cdot\text{h}$ (rosso).

Procedure per l'individuazione delle piante

Per ogni quadrato selezionato, è stata localizzata la segnalazione di *V. lantana*. In caso di più segnalazioni, ne è stata scelta una casualmente. Solo in caso di assenza di un numero sufficiente di piante (vedi paragrafo successivo) sono state considerate anche le eventuali altre segnalazioni.

E' stato identificato il centro della segnalazione. In caso di segnalazioni lineari, il centro è alla metà della lunghezza. In caso di segnalazioni areali (poligoni) il centro è il centroide del poligono.

E' stata localizzata l'area aperta (larghezza \geq altezza vegetazione; non in vicinanza di strade ad elevato traffico) più vicina al centro della segnalazione e ne sono stati ispezionati i margini boschivi partendo dal punto di accesso dell'area aperta e procedendo in senso orario in caso di aree, e da sinistra a destra in caso di segnalazione lineare (Fig. 23).

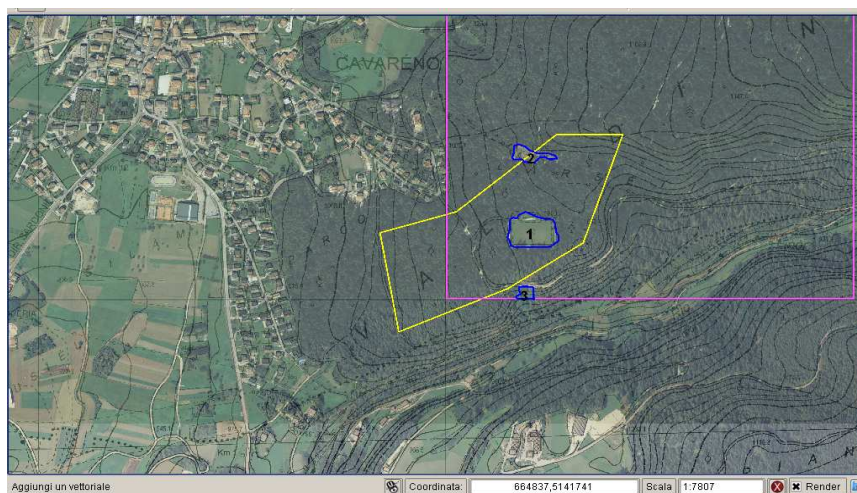


Figura 23. Esempio di una parte di cella uni chilometrica (rosa) con segnalazione areale di *Viburnum lantana* (giallo) e individuazione delle tre aree aperte (blu).

Rilievi e numerosità

Lungo il margine boschivo ispezionato, per ogni quadrato sono state prese in considerazione tutte le piante idonee presenti (piante con altezza inferiore ai 50 cm non sono state considerate) secondo i seguenti criteri di numerosità:

- erano presenti $n \geq 10$ piante di viburno: il rilevamento è stato effettuato sino ad un massimo di $n=30$ piante.
- erano presenti $10 < n < 30$ piante di viburno: sono state ispezionate le eventuali altre due aree aperte individuate sino a raggiungere un massimo di $n=30$ piante.
- erano presenti $n < 10$ piante di viburno: si sono ispezionate successivamente le eventuali altre due aree aperte più vicine, procedendo per distanze crescenti. Ci si è comunque fermati al raggiungimento di $n=30$ piante.

Il numero minimo di piante per quadrato è $n=10$; non esiste un numero minimo di piante per singola area aperta. In assenza di almeno 10 piante dopo l'ispezione della terza area aperta, si è proceduto come segue:

1. in caso di altre segnalazioni, si è reiterato il processo precedente;
2. in assenza di altre segnalazioni, si è sostituito il quadrato.

Ad ogni pianta osservata sono stati attribuiti:

- un codice per i sintomi (0= assenza sintomi; 1= esclusivamente sintomi da ozono; 2= altri sintomi; 3= 2+1)
- la percentuale di foglie sintomatiche secondo le seguenti classi: < 5%; tra 6 e il 50%; > 50%.
- la dimensione della pianta secondo le seguenti categorie: S= piccola (50-90 cm); M= media (90-180 cm); L= grande (>180cm); XL= grande ed estesa (h>180 cm e con numerosi polloni derivanti dal medesimo ceppo);

Limiti di tempo. E' stato dedicato al massimo 1h per area aperta per l'individuazione del numero sufficiente di piante. Per l'osservazione di ogni pianta e l'individuazione di eventuali sintomi da O₃ è stato dedicato: un minuto per ogni pianta di piccola (S= altezza inferiore a 90 cm) e media taglia (M= altezza tra i 90 e 180 cm); due minuti per le piante con altezza superiore ai 180 cm (L); tre minuti nel caso la pianta abbia numerosi polloni (XL) senza dubbio derivanti dal medesimo ceppo. Un ulteriore minuto è stato utilizzato per eventuali discussioni e per l'individuazione della percentuale di foglie sintomatiche per pianta.

Sono inoltre state annotate: data di rilievo, rilevatori, numero del quadrato e della segnalazione, numero dell'area aperta; l'esposizione del margine aperto su cui è stata rilevata la pianta.

3.2.2 Sintomi visibili su *Viburnum lantana L.*

Complessivamente sui 30 quadrati sono state osservate 676 piante, per una media di 22,5 piante per quadrato. 273 piante (40%) sono risultate sintomatiche per la presenza di sintomi fogliari ozono-specifici (Fig. 24); di queste, il 45% presentava sintomi su meno del 5% delle foglie, il 33% mostrava sintomi su meno della metà delle foglie (dal 6 al 50%) e il 22% delle piante presentava sintomi su oltre il 50 % delle foglie.



Figura 24. Rilievo di sintomi fogliari attribuibili all'ozono su piante di *Viburnum lantana*: osservazioni macroscopiche in campo e sezioni fogliari al microscopio per la validazione del sintomo.

Le percentuali di piante sintomatiche rilevate nelle tre classi di AOT40 e nelle due classi di quota sono riportate in Figura 25. I valori riferiti alle quote superiori (>700 m s.l.m.) mostrano una proporzionalità con i livelli di AOT40.

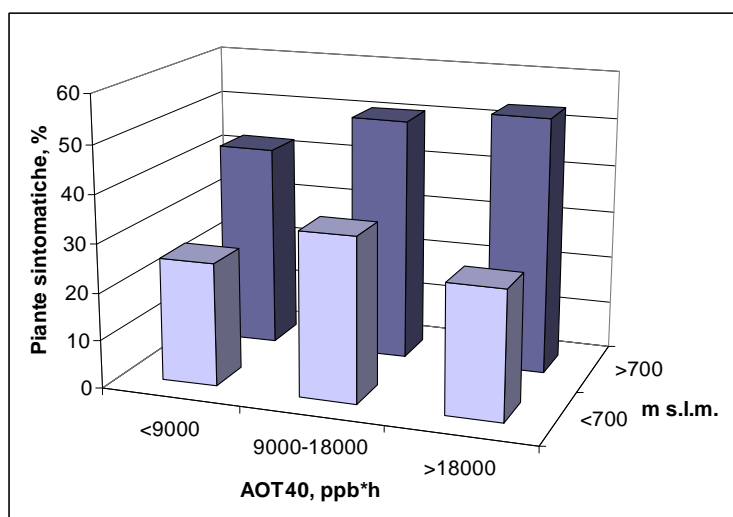


Figura 25. Percentuale di piante sintomatiche per livello di quota e di AOT40 definiti dal disegno sperimentale.

In Figura 26 sono riportati i valori medi di AOT40 calcolati per intervalli di 5000 ppb*h in relazione ai corrispondenti valori medi di piante sintomatiche in percentuale, senza distinzione per classi di quota. La retta di regressione che descrive questa relazione risulta significativa ($P=0,037$) evidenziando una proporzionalità tra livello di esposizione all'ozono e intensità di sintomi.

Occorre precisare che i valori di AOT40 utilizzati per effettuare queste relazioni sono quelli sui quali è stata basata la selezione dei quadrati per i rilievi e si riferiscono al 2009; le percentuali di piante sintomatiche rilevate dovranno essere più correttamente messe in relazione con i valori di AOT40 relativi al periodo di studio (2010). Queste elaborazioni verranno effettuate non appena saranno disponibili i dati spazializzati sull'intera provincia.

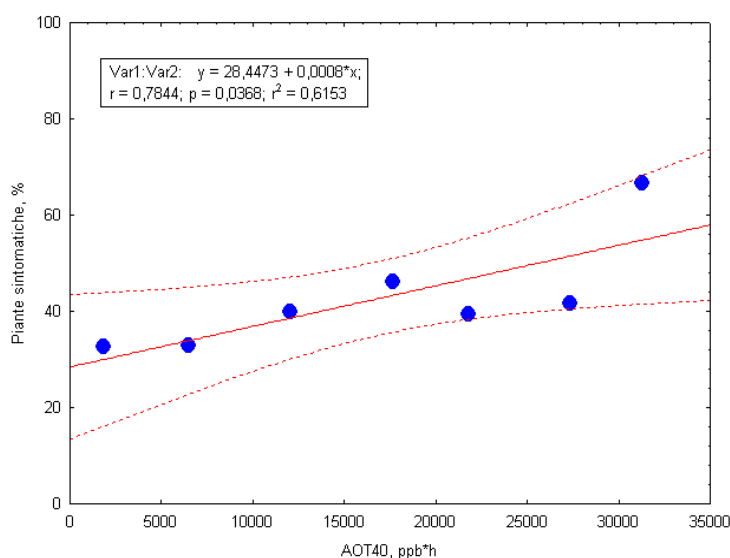


Figura 26. Relazione tra i valori medi di AOT40 calcolati per intervalli di 5000 ppb*h ed i corrispondenti valori medi di piante sintomatiche in percentuale

3.3. Validazione microscopica

I sintomi fogliari visibili indotti dall'ozono sono stati validati mediante osservazioni microscopiche seguendo la metodica indicata da vari Autori (Vollenweider et al., 2003; Günthardt-Goerg and Vollenweider, 2007). La tipica presenza di cellule del tessuto a palizzata collassate a causa del danno subito dall'ozono è stata verificata realizzando delle sezioni sottili di foglia (50 μm) ed effettuando osservazioni al microscopio ottico ad ingrandimento 400X (Fig. 27).

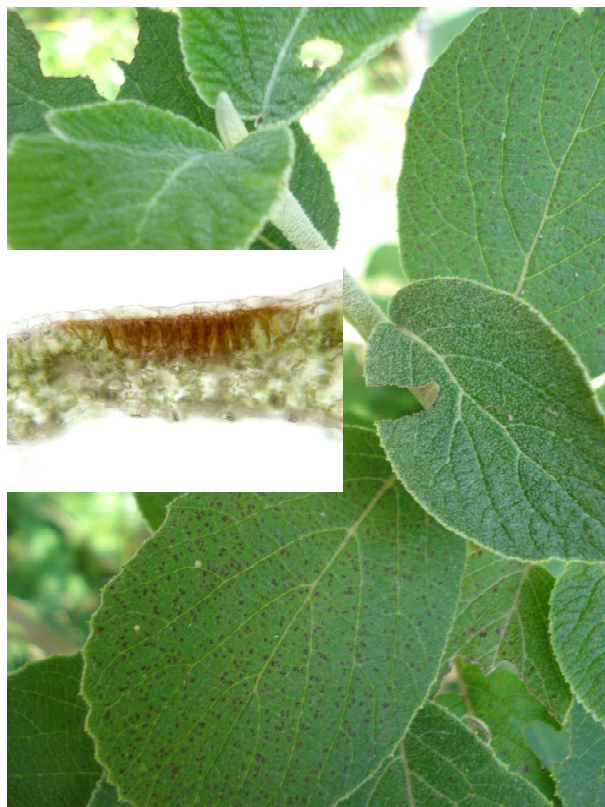


Figura 27. Pianta di Viburnum lantana con sintomi da ozono sulle foglie più sviluppate e sezione di foglia - vista al microscopio ottico- in corrispondenza di una lesione da ozono. Si riconosce lo strato del tessuto a palizzata con presenza di cellule collassate (marrone).

3.4 Stima del ruolo dell'ozono nella defogliazione e crescita degli alberi: raccolta ed organizzazione dei dati

Accanto allo studio su specie a sensibilità nota si evidenzia l'importanza di approfondire uno studio correlativo degli effetti dell'ozono sulle foreste, considerando i diversi aspetti del fenomeno senza limitarsi all'evidenza dei sintomi fogliari ma indagando accrescimenti e defogliazioni. A questo proposito si è operato raccogliendo dati utili alla finalità secondo le seguenti linee:

(i) identificazione della tipologia forestale. La tipologia di interesse è stata valutata in termini di importanza forestale per la provincia di Trento, bagaglio di conoscenze disponibili a livello internazionale relativamente alla risposta all'ozono e dati disponibili.

(iii) Identificazione della variabile di risposta di interesse. Stesse considerazioni che al punto precedente.

(iii) Identificazione delle possibili sorgenti di dati.

Per individuare la tipologia forestale di interesse e' stata presa in considerazione la distribuzione dei boschi (Fig. 28) in funzione delle specie forestali in Trentino e per fasce di quota (dati INFC). Boschi di abete rosso (137203 ha) e, in misura minore, di larice e cembro (63038 ha) e faggete (62247 ha), sono le tipologie più rappresentate in Trentino.

Tra esse, abete rosso e faggio sono le specie su cui esistono considerevoli esperienze di ricerca e monitoraggio degli effetti dell'ozono e su queste specie sono stati predisposti i livelli critici di ozono per le foreste (UN/ECE, 2004 e successive modificazioni). Questi due aspetti (ampia diffusione ed esistenza di studi di riferimento) inducono a considerare abete rosso e faggio come specie target per uno studio correlativo. Come tipologia forestale, la fustaia è senz'altro quella di maggior interesse locale.

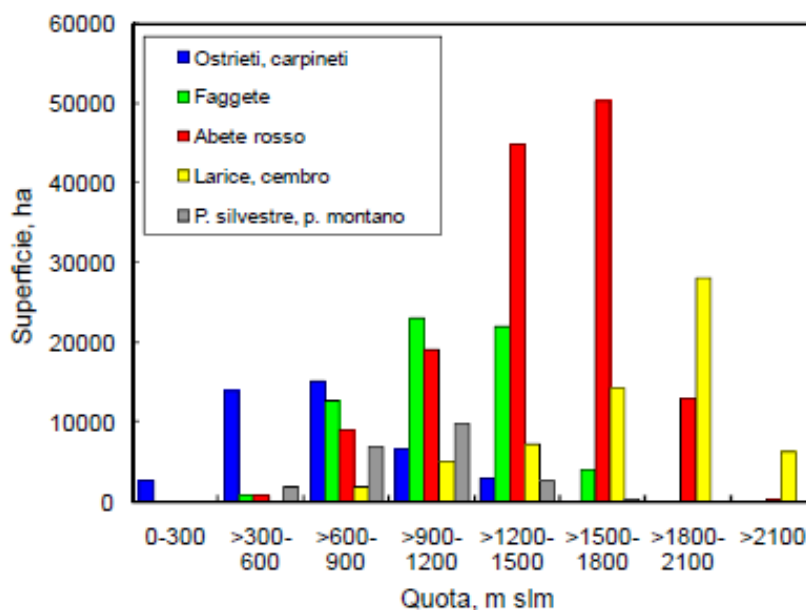


Figura 28. Distribuzione dei boschi in Trentino per specie e fascia di quota.

Nei confronti della variabile di interesse, data la sua importanza sia in termini economici che ecologici (sostanzialmente sintetizza il vigore del bosco), tale variabile è stata identificata nell'accrescimento, in termini di area basimetrica, di ampiezza degli anelli annuali o in termini di volume, a seconda della disponibilità dei dati.

Relativamente all'identificazione delle sorgenti di dati sono stati indagati i diversi possibili DB esistenti in Trentino relativamente all'accrescimento degli alberi: la rete UN ECE di Livello I e II, inventario forestale ed InfoCarb e i piani di gestione.

Plot di Livello I e II

I plot di Livello I e Livello II fanno parte della componente italiana sia della rete UN/ECE ICP Forests (Livello I) ed anche della rete ICP Integrated Monitoring (Livello II). Il Livello I consiste in 15 plot distribuiti sistematicamente sul territorio provinciale ed attiva sin dal 1985. Il Livello II consiste in due plot attivi sin dal 1992. I dati raccolti sulla rete di Livello I e II sono stati forniti dal Dr. Mauro Confalonieri (Servizio Foreste PAT), ed includono le variabili riportate in Tab.15 e 16.

Tabella 15. Variabili individuali rilevate sui plot di Livello I, suddivise per categoria.

Rete	Categoria	Variabili
Livello I	Dati stazionali e generali	ID plot Latitudine Longitudine Altitudine Esposizione Disponibilità di acqua Tipo di humus Età media piano dominante
	Dati riguardanti i singoli alberi - chiome	ID albero Specie Trasparenza e/o defogliazione Colore delle foglie Danni attribuibili a cause note Diametro
	Dati a livello di plot - suolo	Descrizione del suolo pH C organico N totale Carbonati Acidità scambiabile Cationi scambiabili
	Dati a livello di plot - foglie/oghi	N, S, P, Ca, Mg, K

Tabella 16. Variabili individuali rilevate sui plot di Livello II, suddivise per categoria.

Rete	Categoria	Variabili
Livello II	Dati stazionali e generali	ID plot Latitudine Longitudine Altitudine Esposizione Disponibilità di acqua Tipo di humus Età media piano dominante
	Dati riguardanti i singoli alberi - chiome	ID albero Rimozione e mortalità Classe sociale Compressione della chioma Visibilità Defogliazione Decolorazione Trasparenza Fioritura Fruttificazione Rami secondari ed epicormici Forma della chioma Sintomi su foglie, rami, fusto Età dei sintomi Causa dei sintomi Quantificazione dei sintomi
	Dati a livello di singoli alberi - incrementi	Diametro Altezza
	Dati a livello di plot - suolo	Descrizione del suolo pH C organico

	N totale
	Carbonati
	Acidità scambiabile
	Cationi scambiabili
	P, Ca, K, Mg, Mn
	Cd, Cu, Pb, Zn, Fe, Al
Dati a livello di plot - foglie	N, S, P, Ca, Mg, K
Dati a livello di plot - deposizioni	pH
	COND
	Ca, Mg, Na, K, NH ₄ , SO ₄ , NO ₃ , Cl,
	Al, C, PO ₄
Dati a livello di plot - vegetazione	Numero di specie
	Copertura
Dati a livello di plot - fenologia	Emissione foglie/aghi
	Danni biotici/abiotici
Dati a livello di plot - inquinanti	Ozono
	Sintomi sulla vegetazione

InFoCarb

InFoCarb (Tonolli e Salvagni, 2007) è l'inventario forestale del Carbonio nella provincia di Trento. Si basa su un tessellation stratified sampling (TSS) (anche definito unaligned systematic sampling), che permette stime quantitative a livello provinciale. I dati disponibili in termini di incremento per ettaro (Tab. 17) ci sono stati forniti dal Dr. Damiano Gianelle (FEM).

Tabella 17. Categorie di dati e variabili messi a disposizione da InFoCarb.

Rete	Categoria	Variabili
InFoCarb	Dati stazionali e generali	ID plot Northing Easting Latitude Longitude Classe colturale Distretto Classe Altitudine Categoria Attitudinale Tipo forestale Codice Proprietà
	Dati a livello di plot	Incr % plot Plot vol Incr cor. plot Età media

Piani di gestione

I dati dei piani di gestione derivano dalle successive revisioni dei piani di assestamento delle varie proprietà forestali in provincia di Trento. I dati sono stati forniti dal Dr. Alessandro Wolinsky (Servizio Foreste e Fauna, PAT) e le variabili a disposizione sono riportate in Tabella 18.

Tabella 18. Variabili disponibili nel dataset dei piani di gestione. Continua nelle pagine successive.

Nome campo	Descrizione
DESCRIZIONE	ZONA DI RIFERIMENTO PIANO
PROPRIETA'	PROPRIETA'
COMUNE CATASTALE	CODICE COMUNE CATASTALE
QUADRANTE	CODICE QUADRANTE DI RIFERIMENTO
LATITUDINE	COORD. GEOGRAF. - LATITUDINE
LONGITUDINE	COORD. GEOGRAF. - LONGITUDINE
BACINO IDROGRAFICO	CODICE DI RIFERIMENTO DEL BACINO IDROGRAFICO A CUI APPARTIENE LA PARTICELLA
DISTRETTO FORESTALE	CODICE DI RIFERIMENTO DEL DISTRETTO FORESTALE A CUI APPARTIENE LA PARTICELLA
STAZ_FORESTALE	CODICE DI RIFERIMENTO DELLA STAZIONE FORESTALE A CUI APPARTIENE LA PARTICELLA
NUM_PIANO	NUMERO DEL PIANO
NUM_PARTICEL	CODICE DELLA PARTICELLA
CINGOLO	CINGOLO A CUI VIENE RIFERITA LA PARTICELLA
SUP_TOT_LORDA	SUP. TOTALE LORDA
SUP_IMPRODUTTIVO	SUP. IMPRODUTTIVA
SUP_PROD_NON_FORESTALE	SUP. IMPRODUTTIVA NON FORESTALE
ANNO_INIZIO_PIANO	ANNO INIZIO PIANO ASSESTAMENTO
ANNO_SCADENZA_PIANO	ANNO SCADENZA PIANO ASSESTAMENTO
CLASSIFICAZIONE COLTURALE	CLASSIFICAZ. COLTURALE
CORRISPOND_INVENTARIO_PRECEDENTE	S=SI N=NO
ALTITUDINE PREVALENTE	ALTITUDINE PREVALENTE
QUOTA MIN	QUOTA MINIMA DELLA PARTICELLA
QUOTA MAX	QUOTA MASSIMA DELLA PARTICELLA
FASCIA ALTITUDINALE DI PERTINENZA	FASCIA ALTITUDINALE DI PERTINENZA BASATA SULL'ALTITUDINE PREVALENTE
EXPO	ESPOSIZIONE DELLA PARTICELLA
PENDENZA	PENDENZA
POSIZIONE	POSIZIONE DELLA PARTICELLA
ACCIDENTALITA'	GRADO DI ACCIDENTALITA' DELLA PARTICELLA
VALLECOLE COLLETT. ACQUA	PRESENZA DI COLLETTORI D'ACQUA
GRUPPO E TIPO ROCCE	LA PRIMA CIFRA INDICA IL GRUPPO LA SECONDA IL TIPO DI ROCCIA MADRE
COPERTURA QUATERNARIA	SPESSORE COPERTURA
TIPO SUOLO	
PROFONDITA'	
TESSITURA1	
TESSITURA2	
CONSISTENZA SUOLO	
REAZIONE	REAZIONE DEL SUOLO
UMIDITA	UMIDITA' DEL SUOLO
CAT ATTITUDINALE	CATEGORIA ATTITUDINALE DELLA PARTICELLA
CLASSE ECONOMICA	CLASSE ECONOMICA DI APPARTENENZA DELLA PARTICELLA
SUP. PROD FORESTALE	SUPERFICIE FORESTALE PRODUTTIVA
HUMUS	
COPERTURA MORTA	
DANNI1	
DANNI2	
TIPO RILIEVO	
ABETE ROSSO - SP.LEGN.TAR.	TARIFFE PER LA SPECIE ABETE ROSSO
PERC.SP.LEGN.- ABETE ROSSO	
ABETE BIANCO - SP.LEGN.TAR.	TARIFFE PER LA SPECIE ABETE BIANCO
PERC.SP.LEGN.- ABETE BIANCO	
LARICE - SP.LEGN.TAR.	TARIFFE PER LA SPECIE LARICE
PERC.SP.LEGN.- LARICE	
PINO SILVESTRE - SP.LEGN.TAR.	TARIFFE PER LA SPECIE PINO SILVESTRE
PERC.SP.LEGN.- PINO SILV.	
PINO NERO - SP.LEGN.TAR.	TARIFFE PER LA SPECIE PINO NERO
PERC.SP.LEGN.- PINO NERO	
PINO CEMBRO - SP.LEGN.TAR.	TARIFFE PER LA SPECIE CEMBRO
PERC.SP.LEGN.- PINO CEMBRO	
FAGGIO - SP.LEGN.TAR.	TARIFFE PER LA SPECIE FAGGIO
PERC.SP.LEGN.- FAGGIO	
ALTRE LATIF. - SP.LEGN.TAR.	TARIFFE PER LE ALTRE LATIFOGLIE
PERC.SP.LEGN.- ALTRE LATIF.	
DENSITA'	
ALTEZZA MEDIA	
STATURA ATTUALE	
STATURA POTENZIALE	
CLASSE DI FERTILITA'	
PROVVIGIONE TOTALE	
PROVVIGIONE AD ETTARO	
INCREMENTO CORRENTE	
INCREMENTO PERCENT.	
INCREMENTO AD ETTARO	
RIPRESA TOTALE	

4. Conclusioni

I valori di ozono registrati nel 2010 hanno superato diffusamente i livelli di protezione per la vegetazione stabiliti sia dalla UE che dall'UN/ECE. Corrispondentemente, gran parte della superficie vegetata risulta esposta a livelli potenzialmente rischiosi.

I flussi stomatici stimati per il sito di Passo Lavazè per gli anni 1996 - 2009 appaiono considerevoli e coerenti con l'andamento dell'AOT40.

Relativamente ai sintomi, nessuna tra le specie legnose rilevate al sito di monitoraggio di Livello II di Passo Lavazè ha mostrato sintomi attribuibili all'ozono.

Al contrario, i sintomi su vegetazione spontanea riconosciuta dalla letteratura scientifica come ozono-sensibile (*Viburnum lantana* L.) sono diffusi e da una prima analisi risultano proporzionali ai valori di esposizione all'ozono.

I sintomi fogliari visibili sono una delle diverse manifestazioni che le piante possono avere in risposta all'esposizione all'ozono; sono di facile individuazione e di sicura attribuzione per quanto riguarda la causa. L'assenza di sintomi fogliari visibili non esclude però che le piante possano risentire dell'esposizione a questo inquinante. Le risposte all'ozono possono infatti consistere in una riduzione del tasso di crescita (e conseguentemente del potenziale di immagazzinamento di carbonio), in una variazione dei rapporti allometrici, in una maggiore suscettibilità a parassiti e agli stress ambientali abiotici e in una diminuzione di vitalità. Nel corso del 2010 si è iniziato a prendere in considerazione anche questi aspetti con la ricognizione e l'organizzazione dei dati esistenti, che verranno elaborati nel 2011 al fine di comprendere in maniera più esaustiva i reali effetti dell'ozono sulla vegetazione del Trentino.

5. Bibliografia

- Bacaro G., Calderisi M., Cristofolini F., Cristofori A., Gottardini E., Rocchini D., Ferretti M., 2008. Studio di un modello per la stima dell'ozono troposferico in provincia di Trento. Relazione tecnica dello studio realizzato nell'ambito della convenzione tra IASMA e Servizio Foreste e Fauna della Provincia Autonoma di Trento (Convenzione N. 4297 del 12/3/08). 45 pp.
- Box G. E. P., Cox D. R., 1964. An analysis of transformations (with discussion). *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, 26: 211-252.
- Burnham K. P., Anderson D. R., 2002. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. Springer-Verlag.
- Bussotti F., Agati G., Desotgiu R., Matteini P., Tani C., 2005. Ozone foliar symptoms in woody plant species assessed with ultrastructural and fluorescence analysis. *New Phytologist*, 166:941.
- Cameletti M., 2009. *Stem: Spatio-temporal models in R*. R package version 1.0.
- Cristofolini F., Cristofori A., Gottardini E., Maccherini S., Ferretti M., 2011. Constraints in the identification and interpretation of ozone as a significant predictor of effects on the supersensitive indicator *Nicotiana tabacum* Bel-W3 in biomonitoring studies. *Ecol. Indic.*, DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.12.003
- Diggle P. J., Ribeiro J. P. Jr., 2007. *Model-based Geostatistics*. Springer-Verlag.
- Durbin, J., Koopman, S., 2001. *Time Series Analysis by State Space Methods*. Oxford University Press, New York.
- Fassò A., Cameletti M., 2009. The EM algorithm in a distributed computing environment for modelling environmental space-time data, *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24, 1027-1035.
- Gottardini E., Cristofori A., Cristofolini F., Ferretti M., 2007. Bio-monitoraggio integrato dell'ozono in provincia di Trento. Istituto Agrario di San Michele all'Adige (IASMA). Centro Sperimentale. Relazione dello studio realizzato nell'ambito della convenzione tra APPA Trento e IASMA nel campo della tutela e studio della qualità dell'aria (Det. N. 174/2 del 09.07.2007).
- Gottardini E., Cristofolini F., Cristofori A., Ferretti M., 2009. Ozono troposferico in provincia di Trento: livelli ed effetti sulla vegetazione nel 2008. Relazione tecnica dello studio realizzato nel 2008 nell'ambito delle convenzioni stipulate dalla Fondazione Edmund Mach con il Servizio Foreste e Fauna e con l'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente della Provincia Autonoma di Trento. 35 pp.
- Gottardini E., Cristofolini F., Cristofori A., Ferretti M., Bacaro G., Geri F., 2010. Ozono troposferico in provincia di Trento: livelli ed effetti sulla vegetazione nel 2009. Relazione tecnica dello studio realizzato nel 2009 nell'ambito delle convenzioni stipulate dalla Fondazione Edmund Mach con il Servizio Foreste e Fauna e con l'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente della Provincia Autonoma di Trento. 56 pp.
- Gottardini E., Cristofori A., Cristofolini F., Bussotti F., Ferretti M., 2010b. Responsiveness of *Viburnum lantana* L. to tropospheric ozone: field evidence under contrasting site conditions in Trentino, northern Italy. *J. Environ. Monit.*, 12:2237–2243. DOI: 10.1039/c0em00299b

- Gunthardt-Goerg M. S. and Vollenweider P., 2007. Linking stress with macroscopic and microscopic leaf response in trees: New diagnostic perspectives. *Environmental Pollution*, 147:467-488.
- Innes J.L., Skelly J.M., Schaub M., 2001. Ozone and broadleaved species. A guide to the identification of ozone-induced foliar injury. *Ozon, Laubholz- und Krautpflanzen. Ein Führer zum Bestimmen von Ozonsymptomen*. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Stuttgart, Wien; Haupt. 136. ISBN 3-258-06384-2.
- McLachlan, G. J., Krishnan, T., 1997. *The EM Algorithm and Extensions*. Wiley, New York.
- Novak K., Schaub M., Fuhrer J., Skelly J. M., Frey B., Krauchi N., 2008. Ozone effects on visible foliar injury and growth of *Fagus sylvatica* and *Viburnum lantana* seedlings grown in monoculture or in mixture. *Environmental and Experimental Botany*, 62:212-220.
- Pawitan Y., 2001. *Statistical Modelling and Inference Using Likelihood*. Oxford University Press, Oxford.
- R Development Core Team, 2010. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Shapiro S.S., Wilk M.B., 1965. An analysis of variance test for normality. *Biometrika* 52: 591-611.
- Skelly J. M., Innes J. L., Snyder K. R., Savage J. E., Hug C., Landolt W., Bleuler P., 1998. Investigations of ozone induced injury in forests of southern Switzerland: Field surveys and open-top chamber experiments. *Chemosphere*, 36:995.
- Tonolli S, Salvagni F. InFoCarb: Inventario Forestale del Carbonio della Provincia di Trento. Centro di Ecologia Alpina, Trento, 2007, pp. 176.
- VanderHeyden D., Skelly J., Innes J., Hug C., Zhang J., Landolt W., Bleuler P., 2001. Ozone exposure thresholds and foliar injury on forest plants in Switzerland. *Environmental Pollution* 111:321-331.
- Vollenweider P., Ottiger M., Gunthardt-Goerg M. S., 2003. Validation of leaf ozone symptoms in natural vegetation using microscopical methods. *Environmental Pollution*, 124:101-118.

ALLEGATO 1

STIMA MODELLISTICA DEI FLUSSI STOMATICI DI OZONO NEL POPOLAMENTO FORESTALE DI PASSO LAVAZE'

