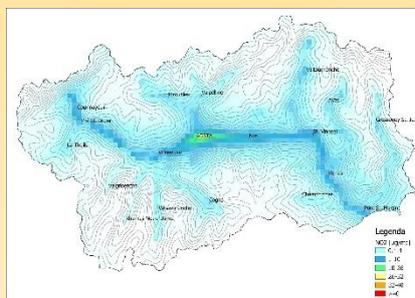
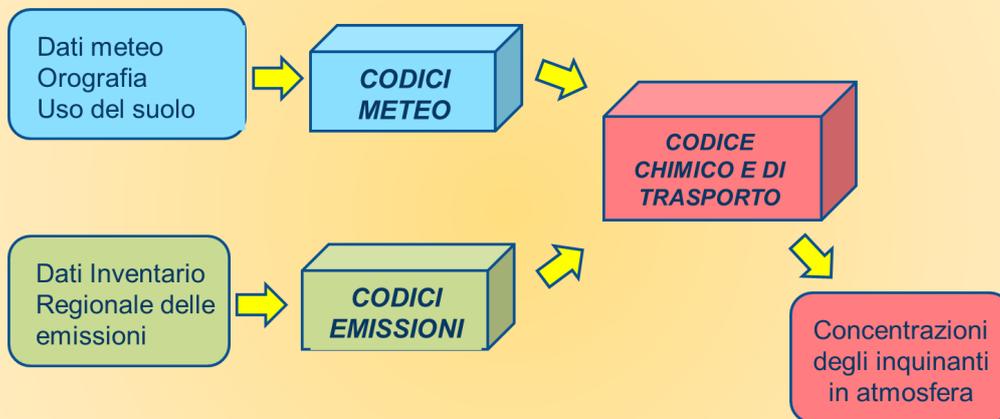


SIMULAZIONE ANNUALE DELLA DISPERSIONE DI INQUINANTI IN ATMOSFERA CON IL CODICE FOTOCHIMICO FARM



LA SIMULAZIONE MODELLISTICA DI DISPERSIONE

Per tale simulazione si è utilizzato un dominio di calcolo comprendente l'intera Regione Valle d'Aosta e parte delle regioni confinanti. La griglia di calcolo ha una risoluzione orizzontale di 1 km x 1 km.

Si è elaborata una simulazione annuale per il **2022** utilizzando i seguenti dati in ingresso al modello:

- emissioni degli inventari regionali valdostano e piemontese e da inventario europeo EMEP per le regioni francesi e svizzere confinanti
- meteorologia ricostruita con il codice SWIFT con i dati delle stazioni meteo di ARPA VdA e della Protezione Civile
- condizioni al contorno ricavate dalla simulazione di qualità dell'aria della Regione Piemonte elaborata da ARPA Piemonte per lo stesso anno.

Ogni mese simulato ha richiesto all'incirca 8 ore di simulazione e ha prodotto un file di concentrazione in aria ed i file di deposizione al suolo.

Stima delle concentrazioni degli inquinanti in atmosfera

Le simulazioni effettuate hanno prodotto 117 specie di inquinanti in uscita per la simulazione di quelli principali e 81 specie per quella dei POPs, di seguito sono riportate le mappe delle concentrazioni medie annuali delle seguenti sostanze la cui valutazione è richiesta dal DM 155/2010:

- *inquinanti gassosi:*
 - monossido di carbonio* (CO)
 - biossido di zolfo* (SO₂)
 - biossido di azoto* (NO₂)
 - ozono* (O₃)
 - benzene* (C₆H₆)

- *polveri:*
 - PM10*
 - PM2.5*

- *metalli:*
 - arsenico* (As)
 - cadmio* (Cd)
 - cromo (Cr)
 - rame (Cu)
 - mercurio* (Hg)
 - nichel* (Ni)
 - piombo* (Pb)
 - selenio (Se)
 - zinco (Zn)

- *POPs:*
 - Benzo(a)pirene*
 - IPA totali*

(* inquinanti di cui viene richiesta la valutazione dal DM 155/2010)

► Biossido d'azoto

Dalla mappa di concentrazione si notano valori più elevati nelle aree maggiormente antropizzate, in corrispondenza della vallata centrale e, in particolare, del bacino del capoluogo.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e alle sue soglie di valutazione. Per tale inquinante la stagione estiva presenta tipicamente concentrazioni molto inferiori a quelle della stagione invernale caratterizzata dall'apporto delle emissioni da riscaldamento domestico e dalle condizioni climatiche sfavorevoli alla dispersione (venti deboli e basso irraggiamento solare).

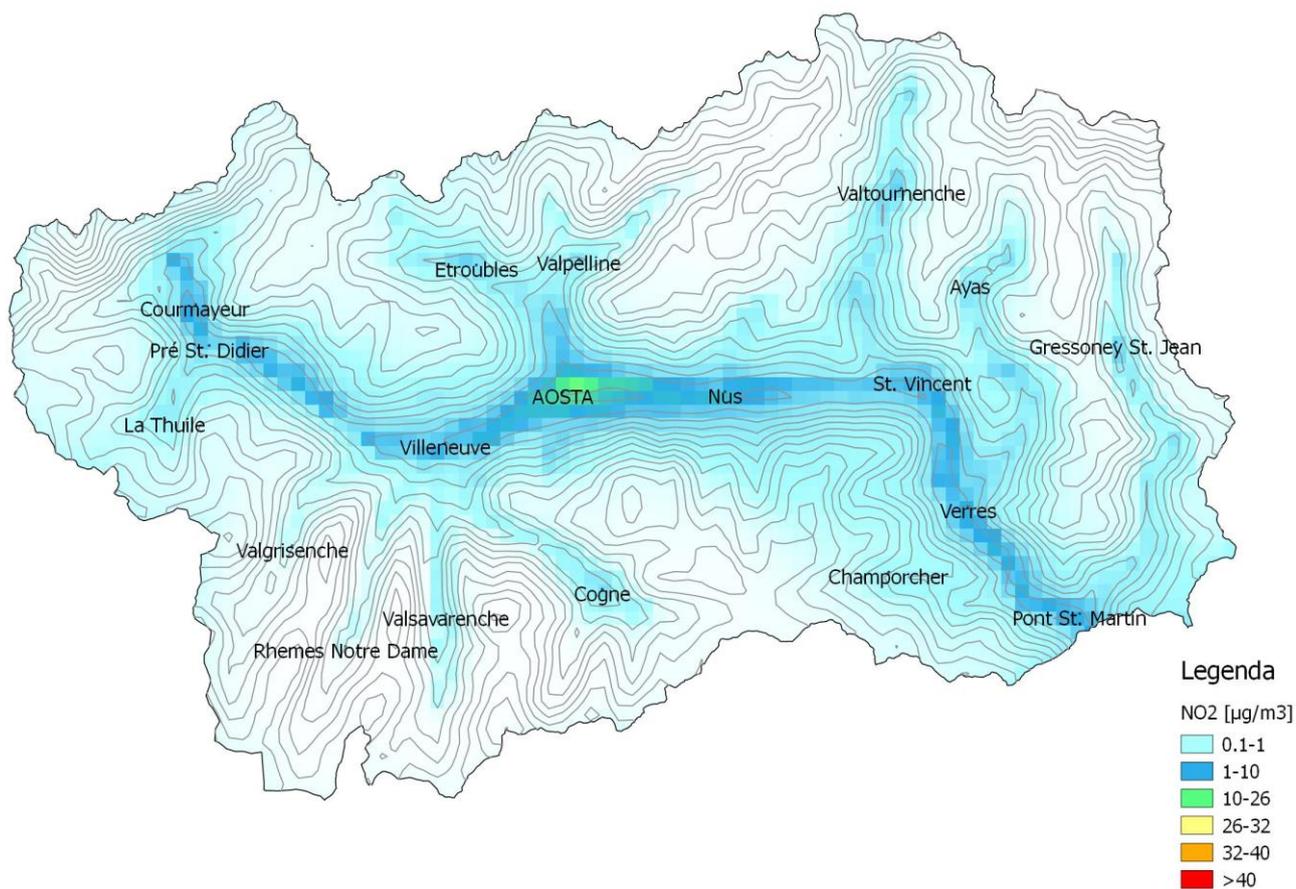


Figura 1: concentrazioni medie annuali di NO₂ (anno 2022)

► Biossido di zolfo

Le concentrazioni medie annuali del biossido di zolfo risultano più consistenti nel bacino del capoluogo e lungo l'asse della vallata principale, sono comunque molto basse, se comparate al limite normativo di $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Le emissioni maggiori di tale inquinante provengono dal riscaldamento residenziale a gasolio.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

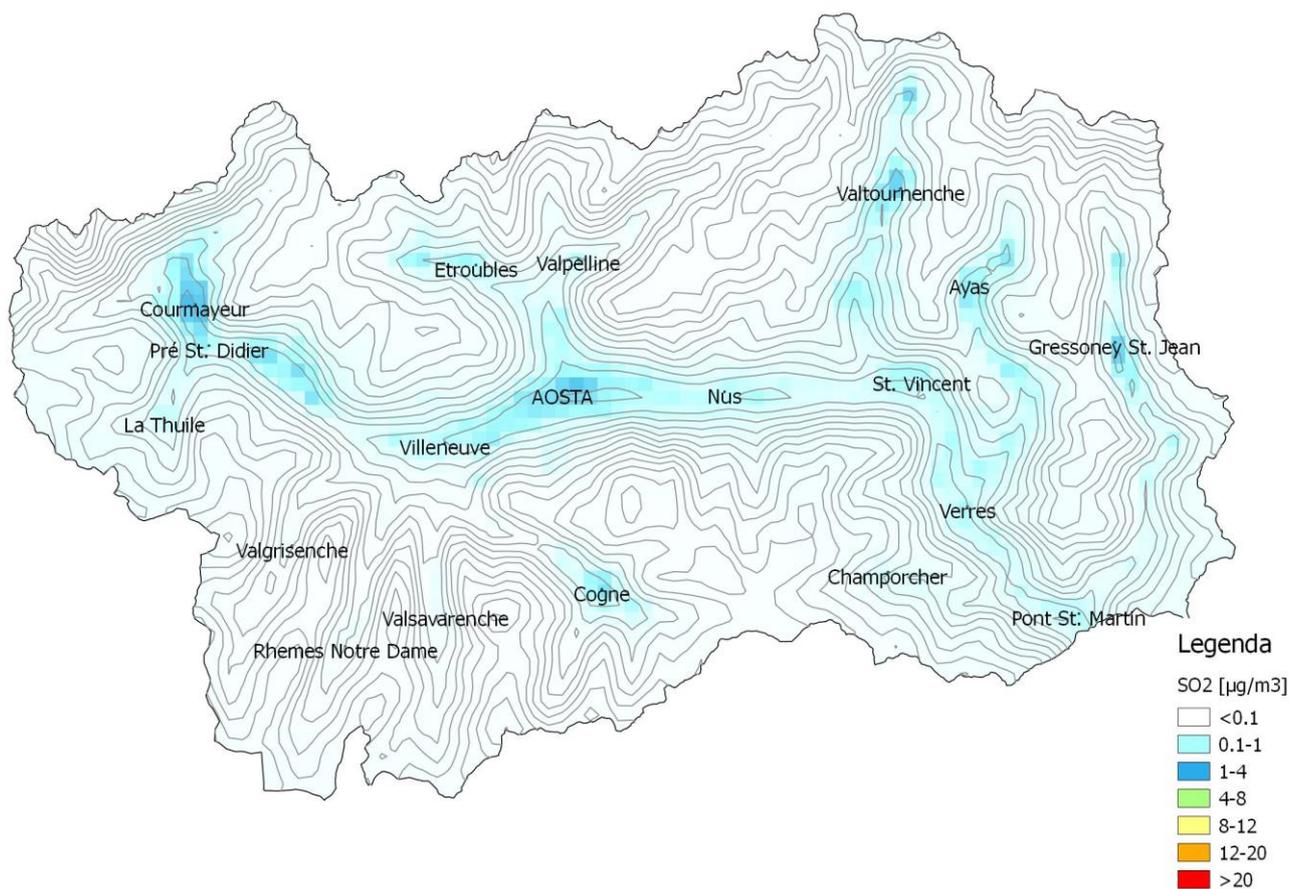


Figura 2: concentrazioni medie annuali di SO₂ (anno 2022)

➤ **Monossido di carbonio**

Rispetto al biossido d'azoto nella mappa della media annuale del monossido di carbonio si notano concentrazioni non trascurabili anche nelle vallate laterali.

Tale inquinante, difatti, è particolarmente legato alle emissioni da riscaldamento domestico, in particolare in relazione al combustibile legnoso.

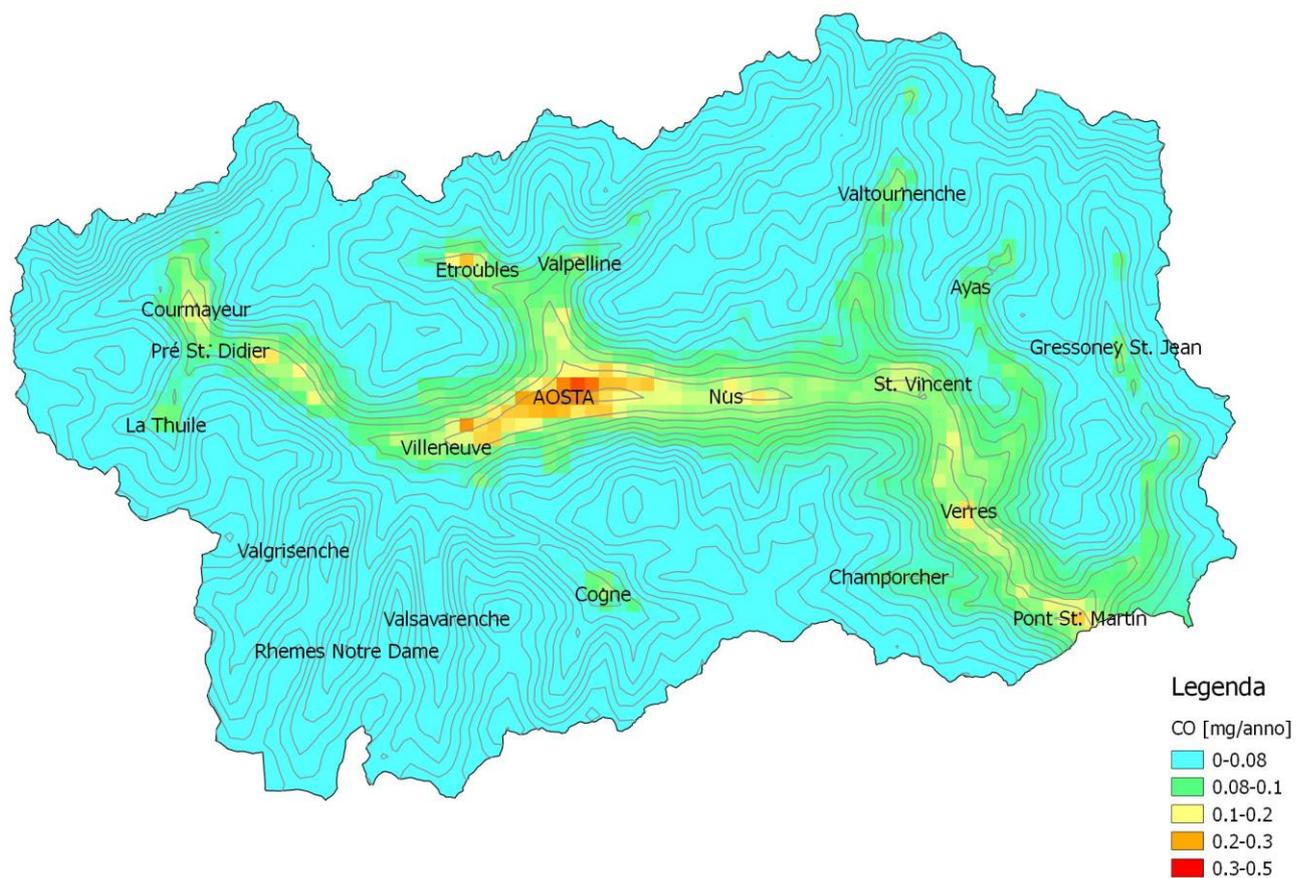


Figura 3: concentrazioni medie annuali di CO (anno 2022)

► Polveri PM10

I valori più elevati di concentrazioni delle polveri in atmosfera si trovano nelle aree maggiormente antropizzate, in corrispondenza della vallata centrale e, in particolare, del bacino del capoluogo.

La stagione estiva presenta concentrazioni molto inferiori a quelle della stagione invernale perché priva dell'apporto delle emissioni da riscaldamento domestico (in particolare quello a combustibile legnoso) e delle condizioni climatiche sfavorevoli alla dispersione tipicamente invernali (venti deboli e basso irraggiamento solare).

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo ed alle sue soglie di valutazione.

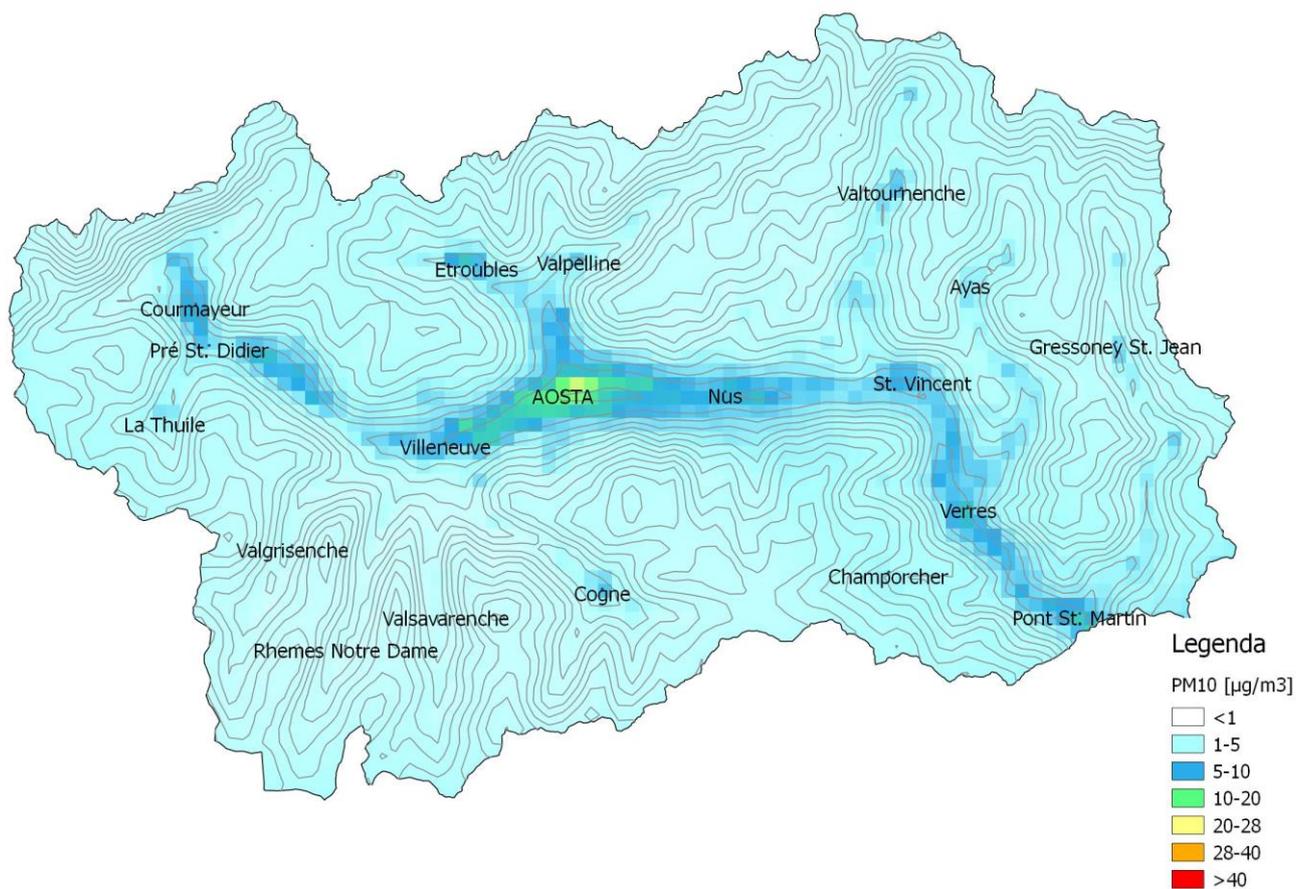


Figura 4: concentrazioni medie annuali di PM10 (anno 2022)

➤ Polveri PM2.5

Per la granulometria più fine delle polveri, il PM 2.5, non si rilevano particolari differenze rispetto alla distribuzione territoriale delle concentrazioni del PM10, i loro valori risultano inferiori al limite normativo in tutto il territorio regionale.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

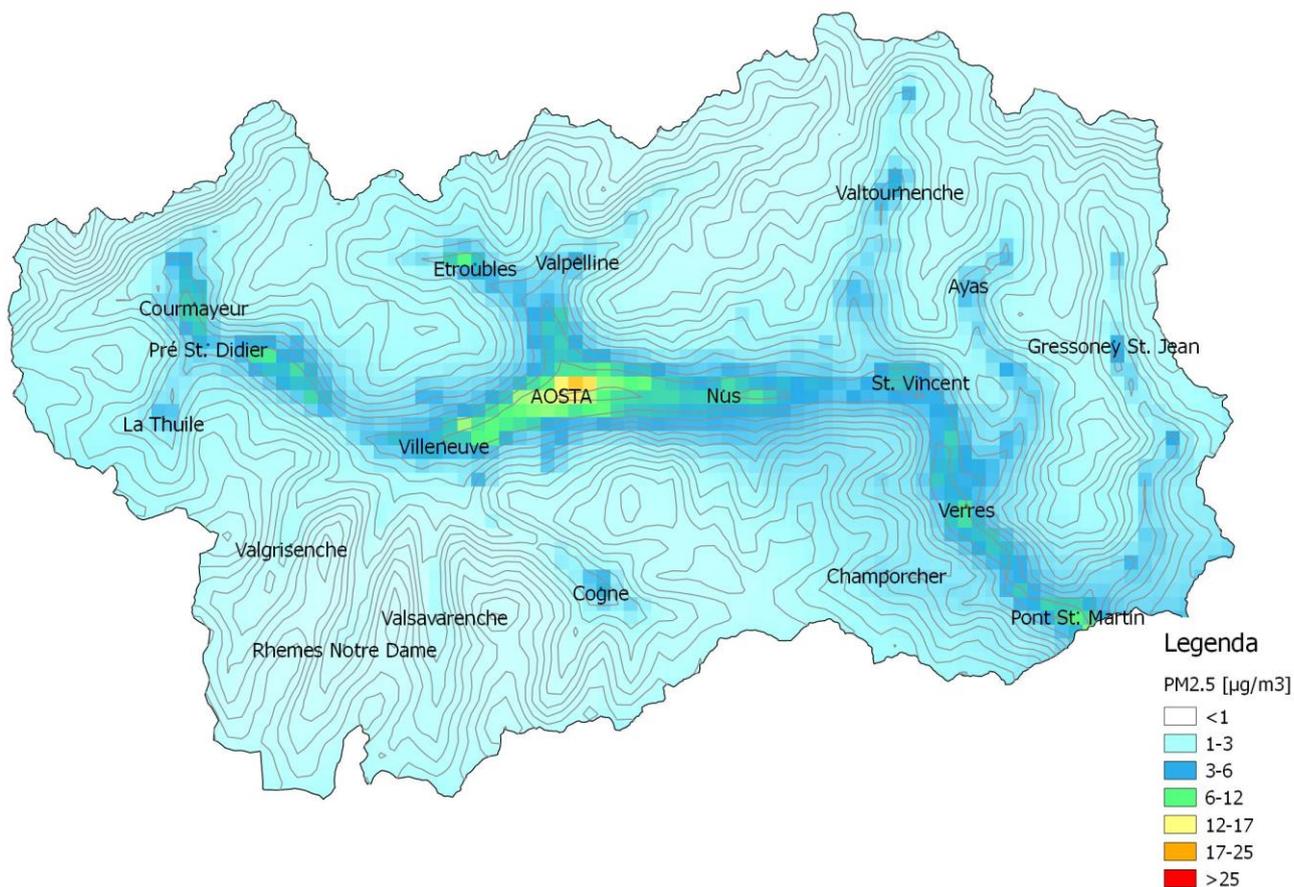


Figura 5: concentrazioni medie annuali di PM2.5 (anno 2022)

➤ Ozono

L'ozono è l'unica sostanza che si discosta dal comportamento degli altri inquinanti primari in maniera speculare. Esso registra, difatti, per la media annuale valori più elevati in alta montagna rispetto al fondovalle, poiché qui non avviene la reazione di distruzione da parte degli altri inquinanti che hanno contribuito alla sua formazione (in particolare gli ossidi d'azoto).

Anche a scala stagionale la situazione è speculare a quella degli altri inquinanti: le concentrazioni maggiori non si registrano in inverno, ma in estate, nel periodo a maggiore insolazione, in quanto è proprio grazie a quest'ultima che l'ozono si forma.

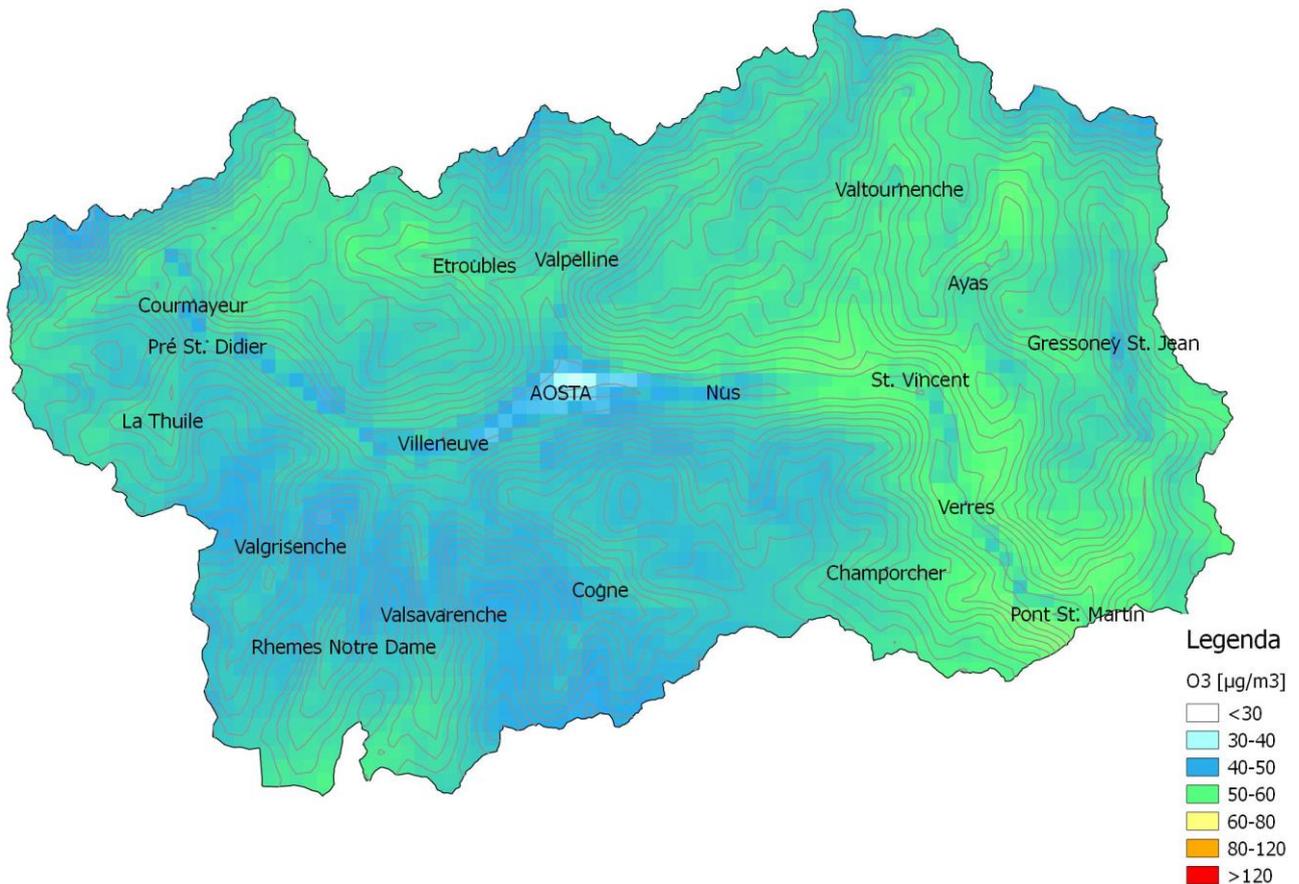


Figura 6: concentrazioni medie annuali di ozono (anno 2022)

➤ Benzene

Inquinante particolarmente legato al traffico stradale di tipo urbano, il benzene registra valori consistenti solo nel bacino del capoluogo.

Non presenta particolari differenze a livello stagionale.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

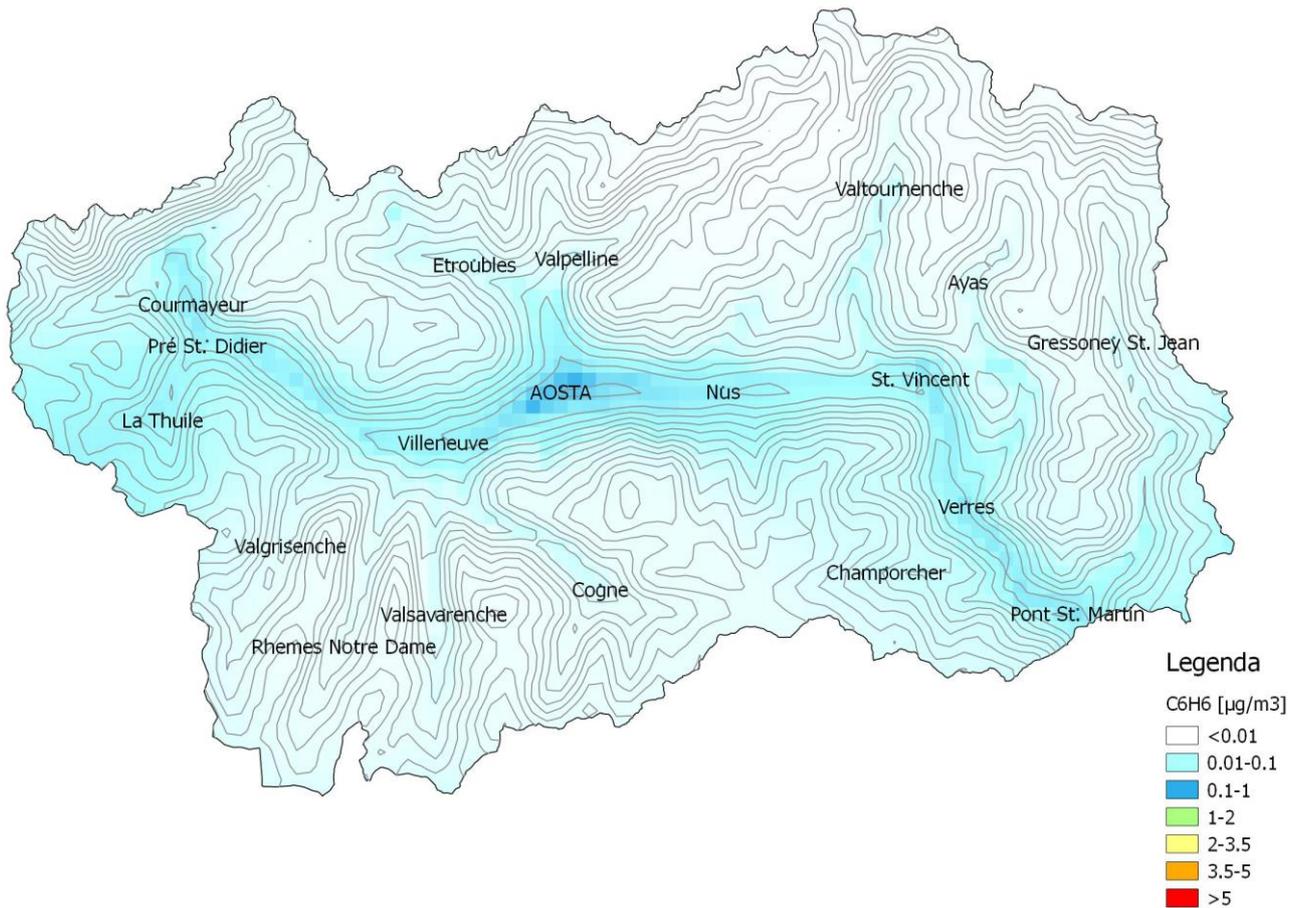


Figura 7: concentrazioni medie annuali di benzene (anno 2022)

➤ Ammoniaca

Le concentrazioni medie annuali di ammoniaca risultano più consistenti nel bacino del capoluogo e nelle aree adibite a pascolo in quanto l'allevamento bestiame risulta la principale sorgente di emissione di tale sostanza per la Valle d'Aosta.

Non presenta particolari differenze a livello stagionale.

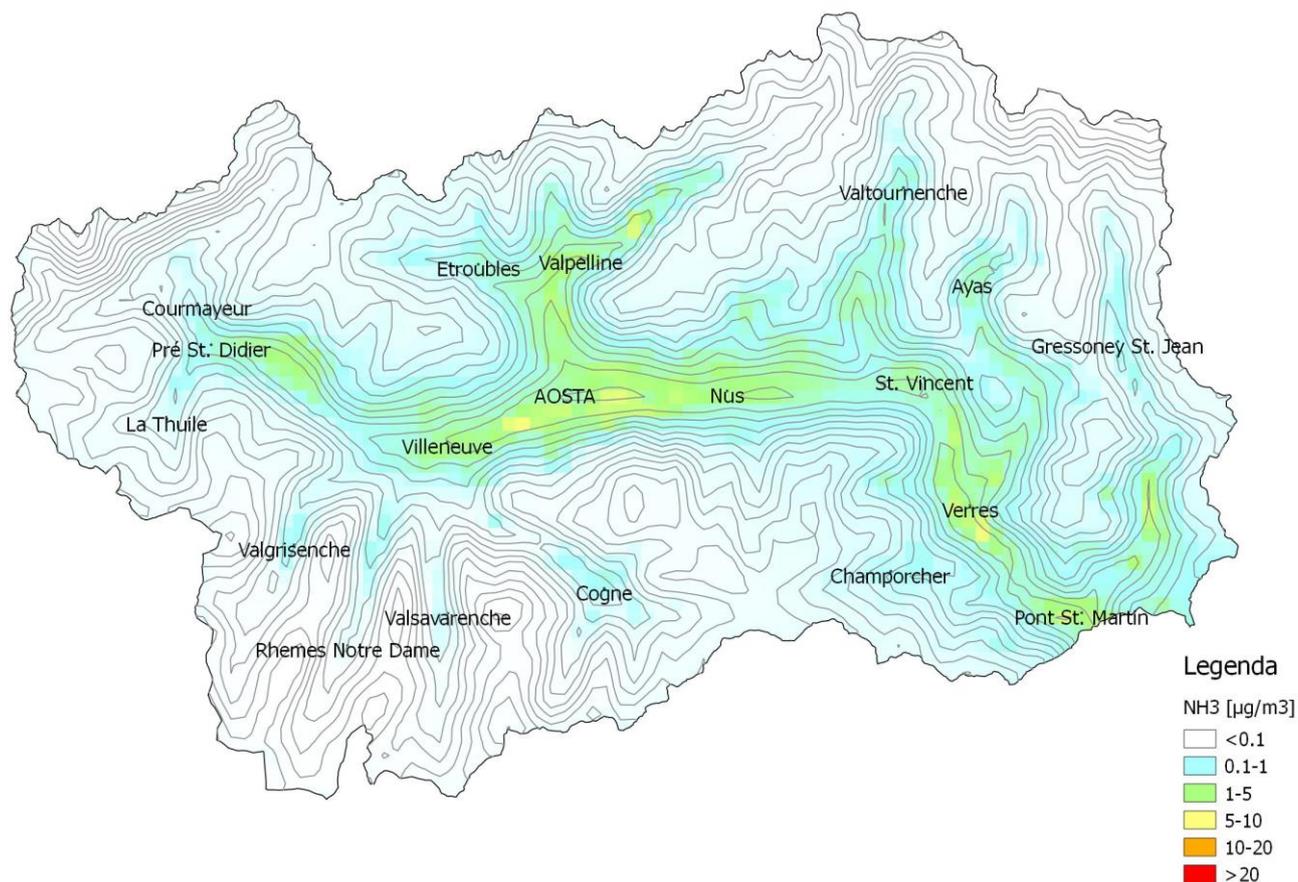


Figura 8: concentrazioni medie annuali di NH_3 (anno 2022)

➤ Metalli

1. Arsenico

Dall'Inventario Regionale delle emissioni l'arsenico risulta emesso principalmente dal settore riscaldamento residenziale a gasolio e da quello delle attività industriali. Le concentrazioni di tale metallo risultano presenti in particolare nella conca di Aosta e, in minor misura, dal confine piemontese.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

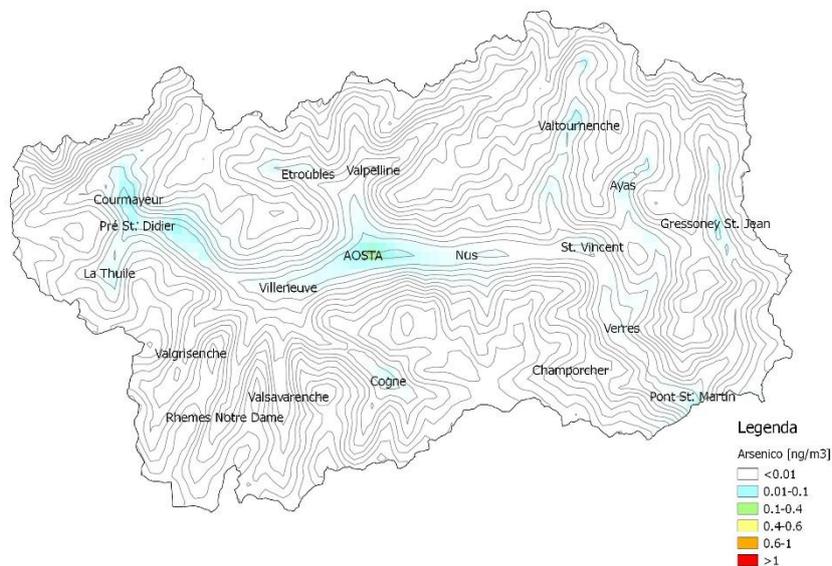


Figura 9: concentrazioni medie annuali di Arsenico (anno 2022)

2. Cadmio

Il Cadmio è emesso principalmente dal riscaldamento domestico a legna e, in minor misura, dall'industria. Le concentrazioni di tale metallo si situano soprattutto nel fondovalle centrale.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

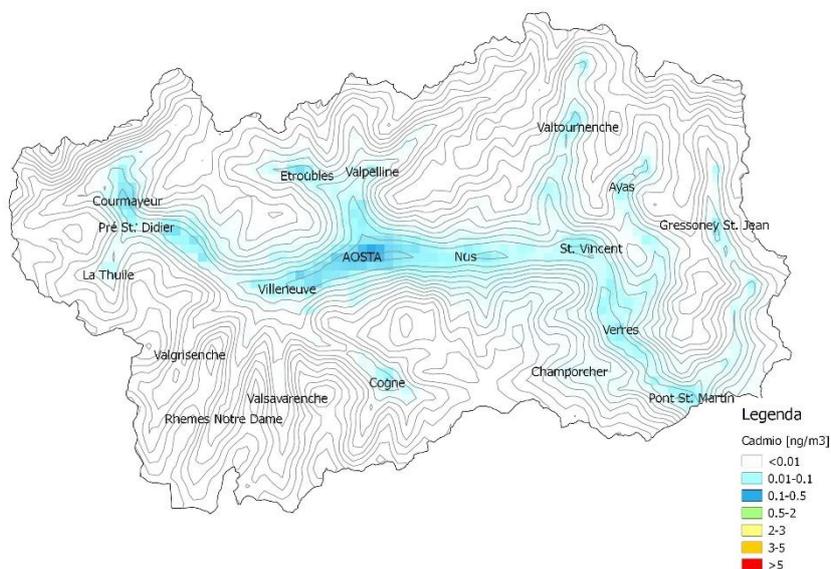


Figura 10: concentrazioni medie annuali di Cadmio (anno 2022)

3. Nichel

Il Nichel viene emesso principalmente dall'industria e in parte dal riscaldamento domestico a legna. Le concentrazioni di tale metallo si situano in particolare nel bacino del capoluogo, in corrispondenza del polo siderurgico.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

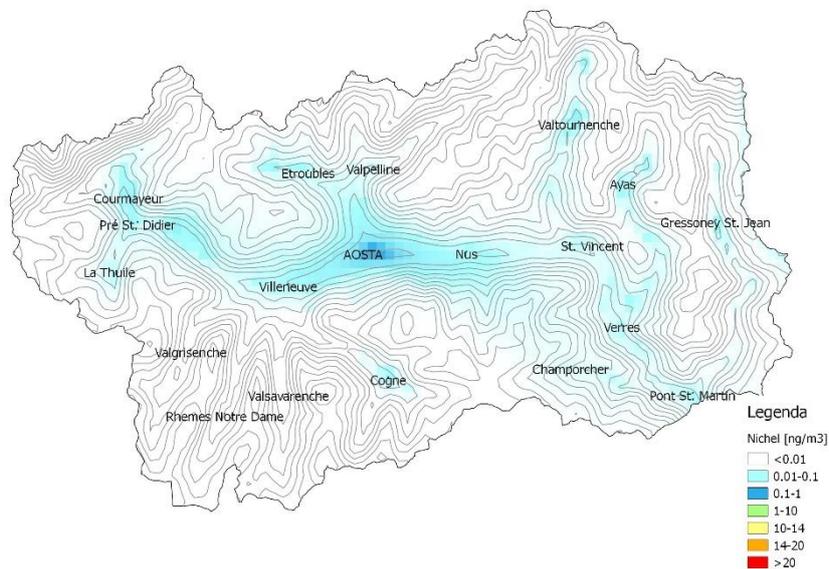


Figura 11: concentrazioni medie annuali di Nichel (anno 2022)

4. Piombo

Il Piombo viene emesso dal riscaldamento domestico a legna e dai veicoli anche se in minor misura.

Le concentrazioni di tale metallo si situano in particolare nella vallata centrale e nel capoluogo, seguendo le principali vie di traffico stradale.

I livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

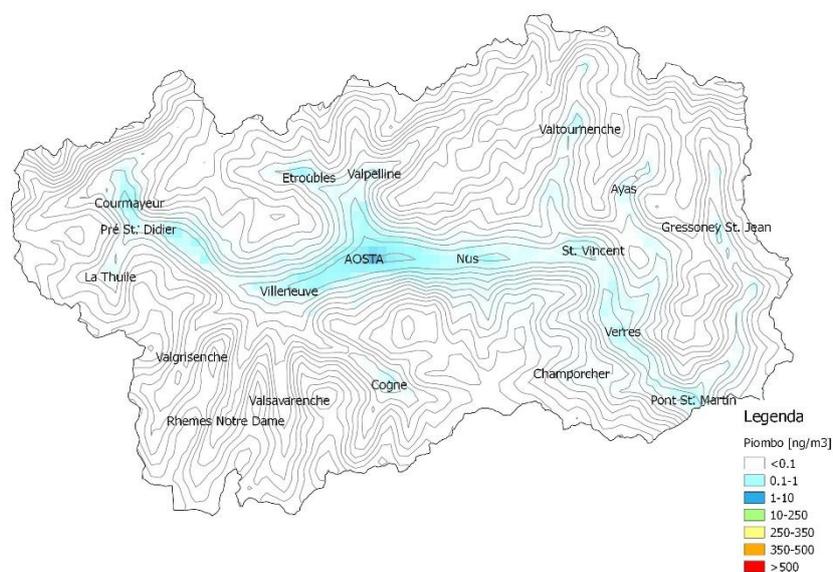


Figura 12: concentrazioni medie annuali di Piombo (anno 2022)

➤ **Idrocarburi policiclici aromatici (benzo-a-pirene)**

Gli Idrocarburi Policiclici Aromatici, dei quali il benzo-a-pirene è l'unico normato, sono legati particolarmente alle emissioni in atmosfera provocate dalla combustione della legna e, quindi, del settore riscaldamento residenziale.

Le concentrazioni di tali sostanze in aria risultano difatti presenti in particolare lungo tutti i fondovalle nei pressi degli abitati.

Per il benzo-a-pirene i livelli di concentrazione dal giallo al rosso si rapportano al limite normativo e le sue soglie di valutazione.

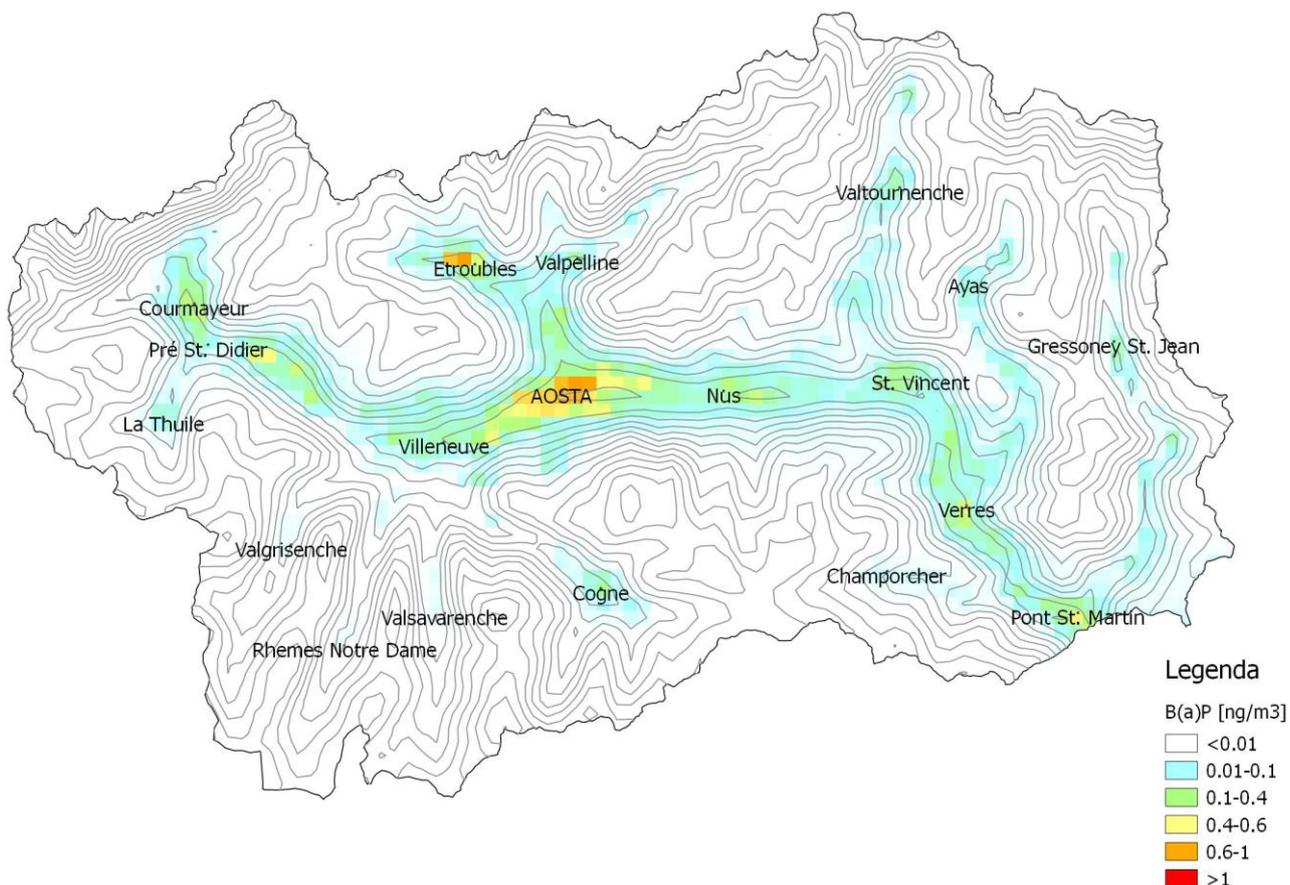


Figura 13: concentrazioni medie annuali di Benzo-A-Pirene (anno 2022)

Confronto dei risultati modellistici con le misure locali

I risultati delle simulazioni annuali elaborate vengono confrontati con i dati misurati presso le stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria di ARPA Valle d'Aosta.

Viene di seguito illustrata l'analisi statistica per valutare il confronto tra i dati misurati e quelli simulati e quindi la prestazione generale del codice di calcolo nel riprodurre le concentrazioni di inquinanti in aria.

Il decreto legislativo 155/10, oltre agli obiettivi di qualità (vedere tabella seguente), stabilisce anche come ricavare l'incertezza del modello. Tale metodo prevede che per ciascun punto si confrontino dati ottenuti dalle stazioni di misurazione con quelli ottenuti dalle simulazioni definendo l'errore relativo (ER) come:

$$ER = \frac{|O_{VL} - M_{VL}|}{VL}$$

dove O_{VL} è la concentrazione misurata più vicina al valore limite (o al valore obiettivo) e M_{VL} è la corrispondente concentrazione fornita dal modello nella distribuzione quantile-quantile.

In generale, i migliori risultati di confronto tra le concentrazioni simulate e quelle misurate si ottengono quando le stazioni di misurazione sono rappresentative di una porzione di territorio all'incirca pari alla risoluzione del modello, che per la simulazione regionale è di 1 km.

Per determinare l'incertezza del modello è, pertanto, necessario operare, per quanto possibile, il confronto delle concentrazioni simulate con i dati ottenuti da un set di stazioni di misurazione aventi rappresentatività spaziale congruente con la risoluzione spaziale del modello.

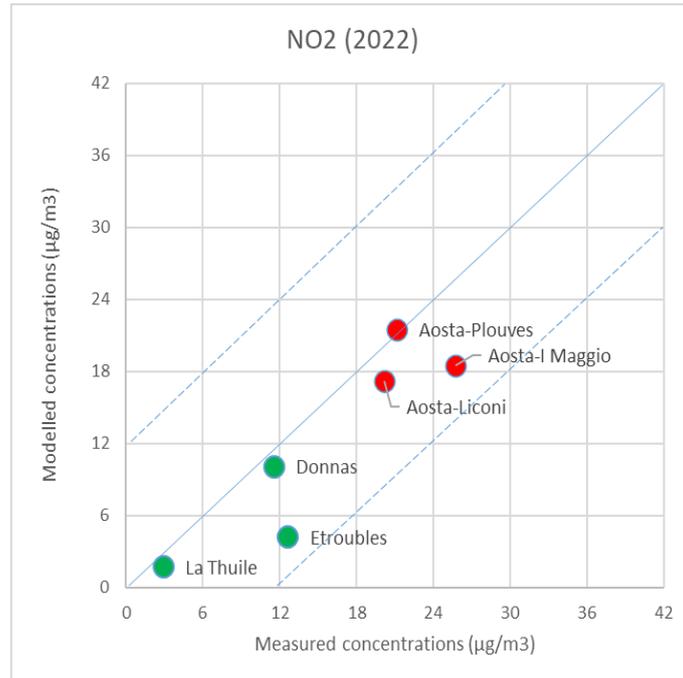
| Incertezza | NO₂, SO₂ | PM10 | CO | O₃ | C6H6 | As, Cd, Ni | Pb | B(a)P |
|-----------------------|---------------------------------------|-------------|-----------|----------------------|-------------|-------------------|-----------|--------------|
| media annuale | 30% | 50% | | | 50% | 60% | 50% | 60% |
| media mobile su 8 ore | | | 50% | 50% | | | | |

Incerteza del modello riportata nel DLgs 155/10 (allegato I Tabella I)

Nei grafici seguenti sono riportate le incertezze del modello per la simulazione annuale di qualità dell'aria del 2022 per inquinanti e stazioni di monitoraggio, comprese le due campagne annuali col laboratorio mobile ad Issogne e Quart. Nei grafici di confronto delle concentrazioni misurate e da modello vengono segnate in rosso le stazioni del capoluogo Aosta.

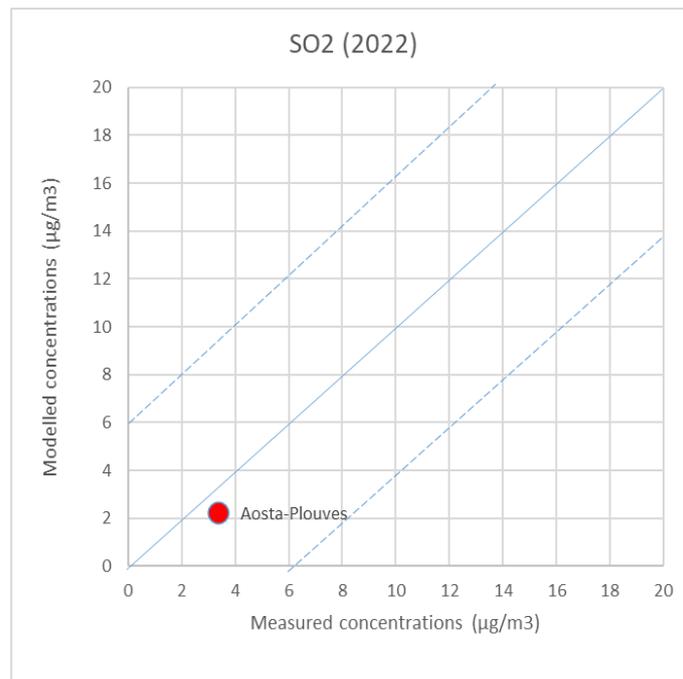
Macroinquinanti:

- **media annuale NO₂ (µg/m³)**



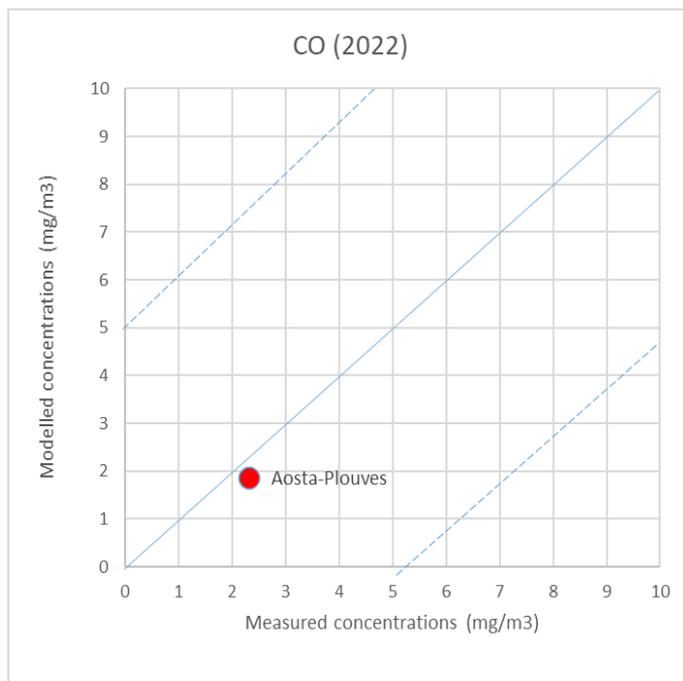
Per il biossido di azoto i valori in uscita dal modello sono vicini a quanto misurato e sono tutti sostanzialmente in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.

- **media annuale SO₂ (µg/m³)**



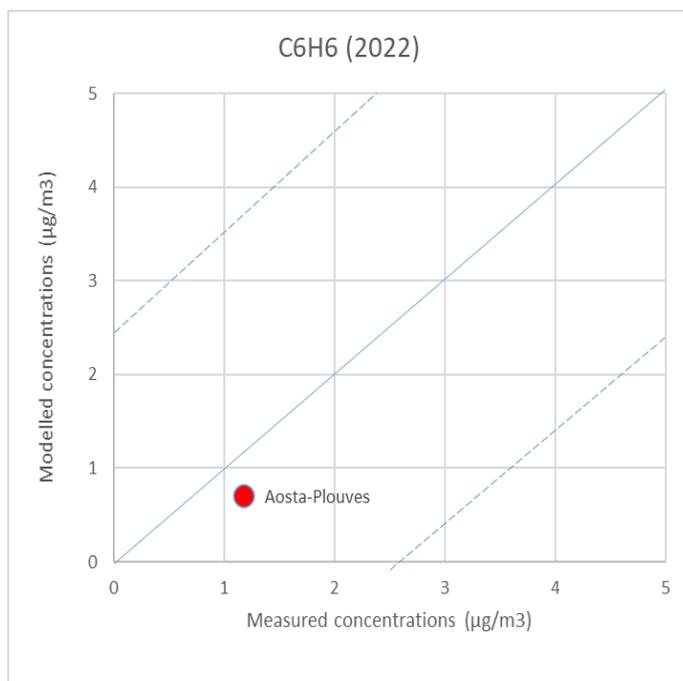
Il biossido di zolfo è di poco sottostimato dal modello ed è ampiamente in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.

- **media mobile su 8 ore CO (mg/m³)**



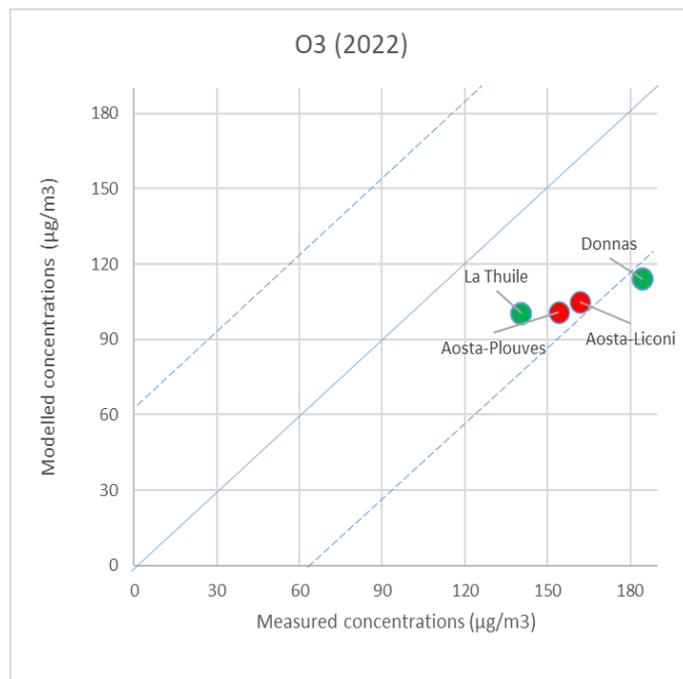
Il confronto tra le medie mobili mensili del monossido di carbonio da una lieve sottostima e risulta del tutto in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.

- **media annuale C₆H₆ (µg/m³)**



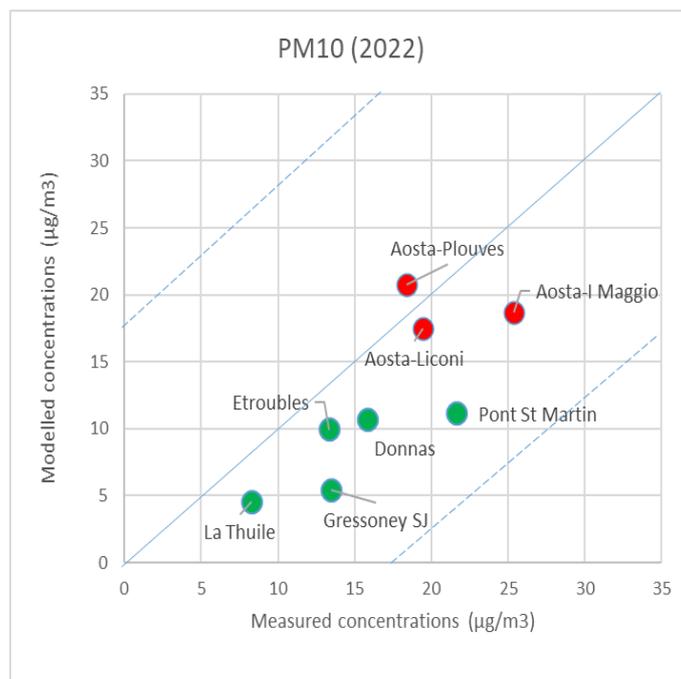
Il benzene simulato risulta prossimo a quello misurato e rispetta decisamente il limite di incertezza fissato dal Decreto.

- **media mobile su 8 ore O₃ (µg/m³)**



Le medie mobili su 8 ore dell'ozono sono sottostimate dal modello e superano l'incertezza ammessa dal Decreto per la stazione ARPA di Donnas all'ingresso della Valle.

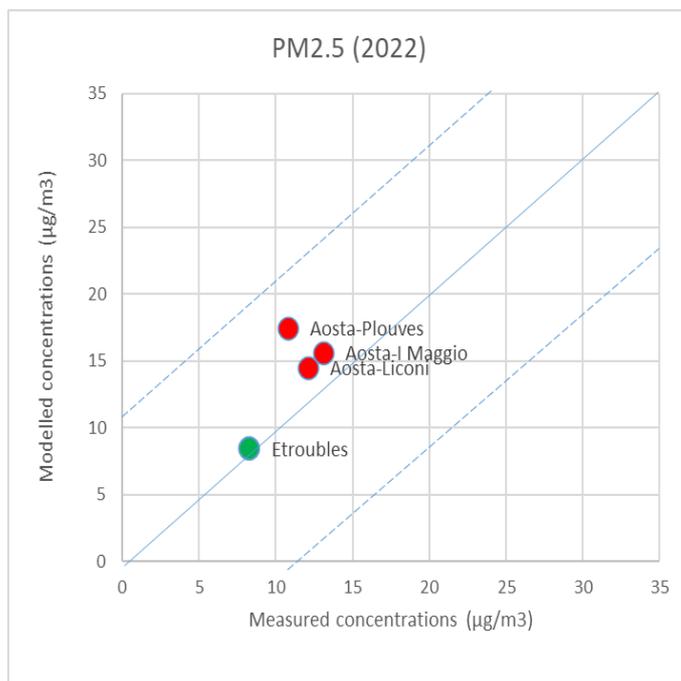
- **media annuale PM₁₀ (µg/m³)**



Le polveri PM10 sono generalmente sottostimate dal modello nell'abitato di Aosta e nel resto della Regione.

I valori simulati risultano comunque pienamente in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.

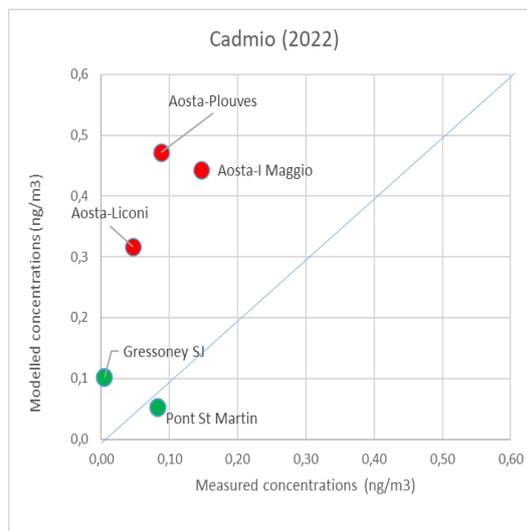
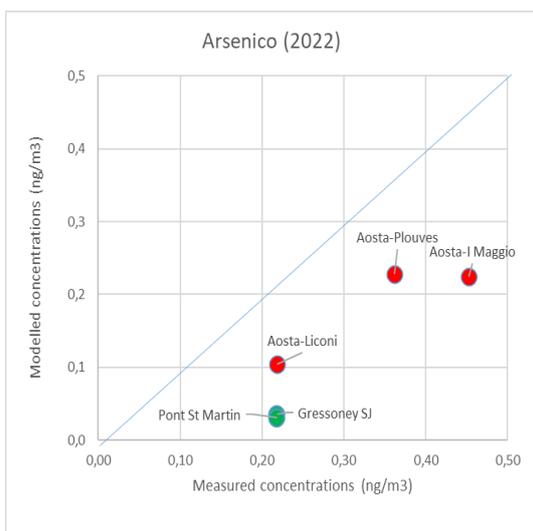
- **media annuale PM_{2.5} (µg/m³)**



Le polveri PM_{2.5} sono sovrastimate dal modello, in particolare in Aosta, ma risultano in linea con l'incertezza fissata dal Decreto.

Microinquinanti:

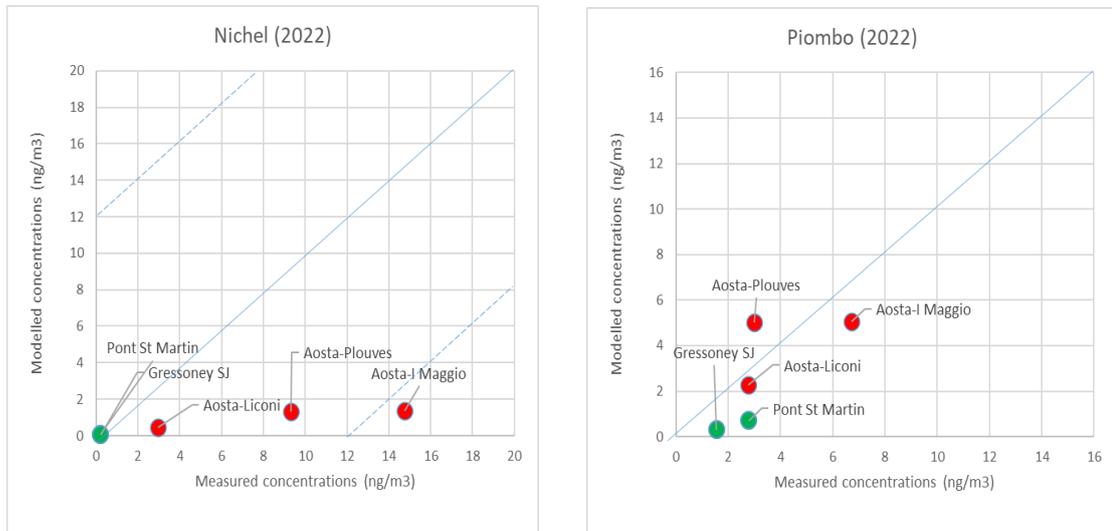
- **medie annuali Arsenico e Cadmio (ng/m³)**



L'arsenico è sottostimato in particolare nelle stazioni situate presso il polo industriale del capoluogo dal modello, ma in linea con l'incertezza consentita.

Il cadmio presenta sovrastime soprattutto nel capoluogo, ma risulta comunque in linea con l'incertezza ammessa dal Decreto.

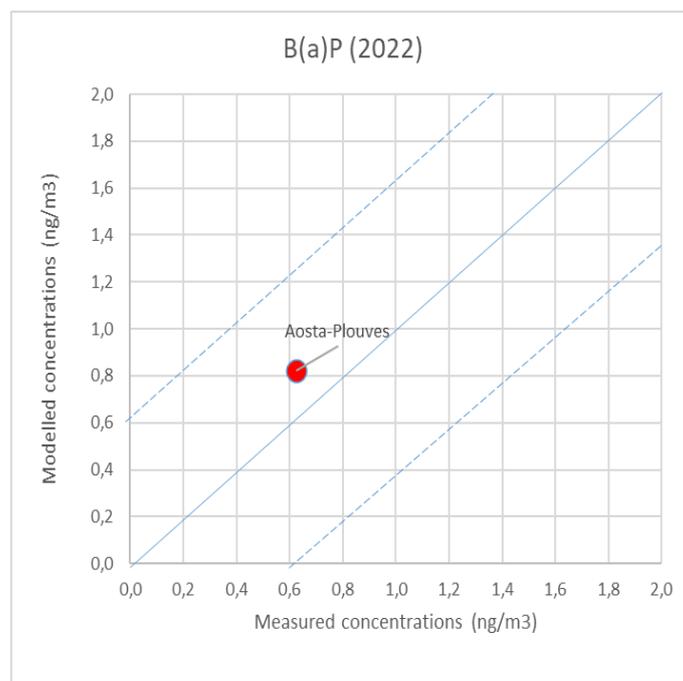
- **media annuale Nichel e Piombo (ng/m³)**



Il nichel è fortemente sottostimato dal modello, in particolare nel capoluogo, superando l'incertezza fissata dal Decreto per la stazione industriale di I Maggio. Probabile sottostima delle emissioni dell'impianto siderurgico dovuta alla mancanza della quota delle sorgenti diffuse dello stabilimento.

Il piombo risulta in linea con l'incertezza prevista ed è anch'esso sottostimato, in minor misura per le stazioni di Aosta.

- **media annuale B_(A)P (ng/m³)**



Il benzo-a-pirene è ben riprodotto dal modello, con incertezza inferiore a quanto fissato dal Decreto.

APPENDICE

La catena modellistica operativa utilizzata

ARPA Valle d'Aosta nelle simulazioni modellistiche per la qualità dell'aria utilizza la suite ARIA Regional¹, creata appositamente per lo studio dell'inquinamento atmosferico a scala regionale (domini variabili da 30 a 500-1000 Km di lato) in territorio complesso.

La figura seguente descrive schematicamente la catena modellistica del codice FARM.

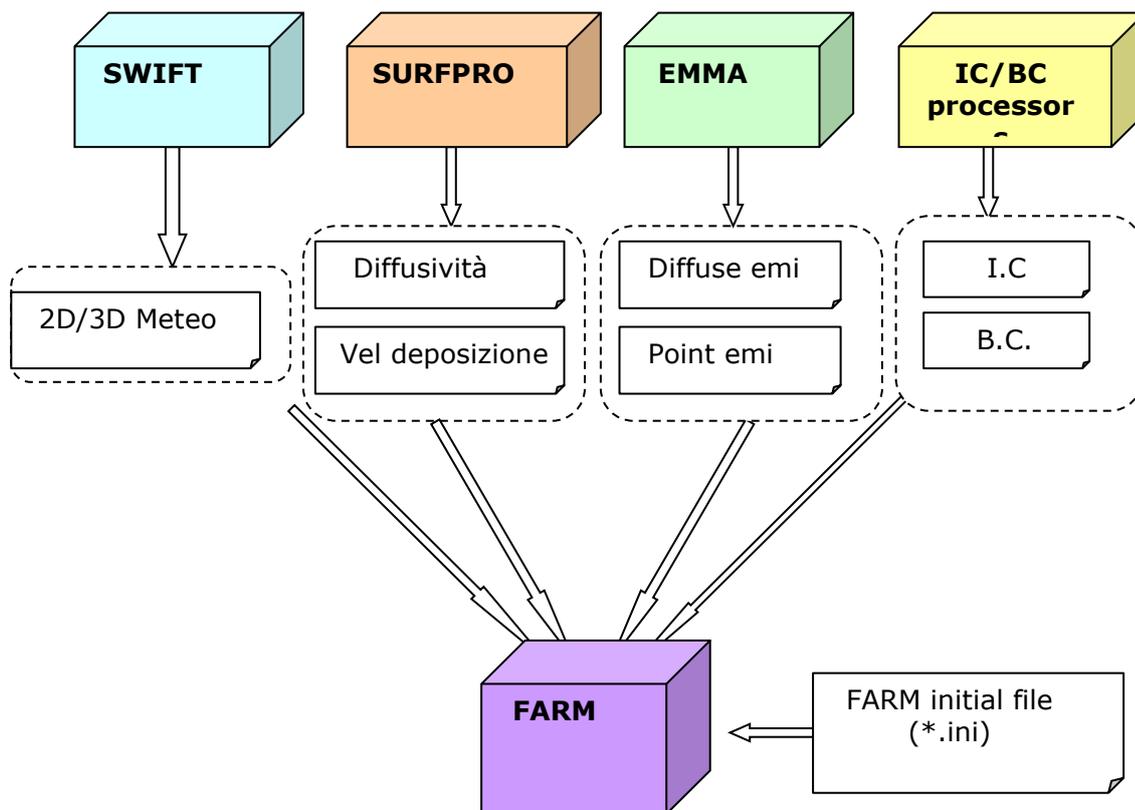


Figura 14: catena modellistica per le simulazioni di dispersione di inquinanti utilizzata da ARPA Valle d'Aosta.

¹ sviluppata dalla società francese ARIA Technologies, distribuita in Italia dalla società ARIANET

Meteorologia e turbolenza

SWIFT

Il preprocessore meteorologico utilizzato nella catena modellistica è SWIFT, codice sviluppato dalla società francese ARIA Technologies. Si tratta di un modello per i campi di vento 3D per terreni complessi. Esso produce i campi di vento a partire da una rete di monitoraggio meteo. Al software sono necessari due tipi di dati in ingresso: le informazioni topografiche e di uso del suolo del sito da studiare e i dati meteorologici, i quali devono includere i dati dei venti, della temperatura e dell'umidità relativa nei livelli prossimi al suolo (ovvero i dati misurati dalle stazioni meteorologiche) e un profilo verticale delle precedenti tre variabili. Per una ricostruzione 3D dei campi di vento sono richiesti almeno dati meteo di un punto di misura e un profilo verticale. Quest'ultimo è necessario per poter definire la stratificazione termica dell'atmosfera.

SWIFT è uno strumento per lo studio dei venti su scala locale (raggio di 5-50 km) e regionale (raggio di 50-500 km).

I parametri fondamentali per la ricostruzione del campo di vento sono:

- I venti su scala locale (velocità e direzione), nei livelli prossimi al suolo e sopra i 1000m;
- Topografia e rugosità del suolo;
- Temperatura e umidità.

Il codice è in grado di modellizzare rapidamente i campi di vento a partire da osservazione in sito, attraverso la prima equazione di Navier-Stokes, il bilancio di massa e tenendo conto degli effetti del terreno sulle masse fluide.

I campi di vento sono calcolati su una griglia spaziale tridimensionale: per il livello orizzontale viene utilizzato un sistema di coordinate cartesiane, con dimensione delle celle fisse, mentre la griglia verticale è terrain-following, ovvero segue l'andamento del terreno.

SURFPRO

La parte inferiore dell'atmosfera è chiamata strato limite terrestre (planetary boundary layer, PBL) e si estende da 1 a 2 km sopra la crosta terrestre. Lo spessore del PBL dipende dalle condizioni meteorologiche e dall'ora del giorno, infatti esso cresce con la luce solare.

SURFPRO (SURFace-atmosphere interface PROcessor) è un codice sviluppato per stimare la griglia dei campi dei parametri di turbolenza del PBL. Il modulo è in grado di calcolare la diffusività orizzontale e verticale dei vortici turbolenti e la velocità di deposizione in funzione della copertura del suolo, delle condizioni atmosferiche (velocità del vento, temperatura, stabilità, radiazione solare) e delle caratteristiche chimiche delle specie.

Un database dell'uso del territorio, sotto forma di griglia, è l'informazione fondamentale su cui si basa il modulo per i calcoli. L'acquisizione dei dati meteorologici e i calcoli dei moduli interni si basano sul file di input dei campi di vento nelle 3 componenti spaziali U, V e W.

Emissioni degli inquinanti in atmosfera

La stima delle emissioni parte dai dati contenuti nell'Inventario Regionale delle emissioni. Tale inventario costituisce una serie organizzata di dati relativi alle quantità di inquinanti introdotti nell'atmosfera da sorgenti naturali e/o da attività antropiche. L'inventario contiene una stima quantitativa di tali flussi di materia dalle sorgenti all'atmosfera, inclusa la loro ripartizione territoriale, la loro evoluzione nel tempo ed una caratterizzazione puntuale delle sorgenti più significative. Si parla di una stima in quanto le variabili coinvolte sono così numerose che non è possibile condurre un calcolo preciso.

EMMA

Per la stima delle emissioni, FARM si affida a un preprocessore emissivo sviluppato da ARIANET: EMMA. Questo codice necessita di diversi file in input per poter generare lo scenario emissivo richiesto:

- una serie di "fichiers client", contenenti i dati elementari delle emissioni delle sorgenti areali, lineari e puntuali;
- file cartografici, che descrivano la geometria delle sorgenti areali;
- un file che descriva i parametri delle sorgenti puntuali;
- un file che specifichi le specie chimiche utilizzate dal codice;
- file per la modulazione temporale (oraria, settimanale e mensile);
- dati di disaggregazione spaziale, come i file contenuti i tematismi territoriali (uso del suolo)
- i dati di speciazione dei COVNM;
- i dati di speciazione del particolato;
- un file dell'orografia.

Per quanto riguarda le polveri, sono dati in ingresso al preprocessore emissivo i profili di speciazione delle polveri e dei COVNM per ogni tipo di sorgente (fonti: EPA (programma Speciate), CARB (California Sir Resource Board) ed elaborazioni di dati di letteratura).

Condizioni iniziali ed al contorno

Il modello FARM, tra i files di input, necessita della descrizione delle condizioni iniziali (IC, Initial Conditions) e quelle al contorno (BC, Boundary Conditions) per poter risolvere le equazioni differenziali. Queste vengono calcolate in base a simulazione già effettuate normalmente elaborate su di un dominio comprendente la griglia di calcolo in esame.

Per la presente simulazione le IC e le BC sono state estrapolate dalla simulazione a scala nazionale con FARM elaborata da Arianet srl per l'anno 2018 (progetto "Qualearia").