

## **SISTEMA MODELLISTICO SPARTA**

*APRILE 2020*

*Report tecnico:  
Sistema modellistico SPARTA*

***Autori:***

*Caterina Busillo  
Francesca Calastrini  
Francesca Guarnieri*

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
1 Il sistema modellistico SPARTA	7
2 Modello meteorologico WRF	10
3 Modello chimico CAMx	13
4 Emissioni	18
5 Condizioni iniziali e al contorno	20
6 Implementazione di pre/postprocessori per CAMx	22

## Introduzione

Il sistema modellistico di qualità dell'aria, sviluppato dal Consorzio LaMMA per rispondere alle richieste previste dall'Accordo tra Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Regione Toscana e Comune di Firenze (ex. DM. 16/10/2006), dal 2015 è entrato formalmente a far parte del "Programma di Valutazione della Qualità dell'Aria" della Regione Toscana (Allegato B alla D.G.R. 964/2015).

La prima release risale al 2013, in cui il sistema WRF-CAMx, utilizzando come input i dati di analisi ECMWF, le emissioni dell'inventario regionale IRSE - aggiornamento 2007- e condizioni al contorno fornite da ENEA (modello di riferimento nazionale MINNI), è stato applicato all'anno di riferimento 2007. Il sistema modellistico è stato valutato positivamente, corrispondendo ai requisiti richiesti dal Ministero dell'Ambiente (*Il sistema modellistico WRF-CAMx. PROT: 22/2014-Consorzio LaMMA*).

Successivi aggiornamenti hanno riguardato l'introduzione nella catena di modelli dell'aggiornamento dell'inventario regionale IRSE - anno di riferimento 2010 - (*Sistema modellistico WRF-CAMX-Aggiornamento IRSE 2010 e Applicazione agli anni 2007 e 2010. Prot. 710/15 Consorzio Lamma*) e la possibilità di utilizzare le condizioni al contorno ottenute dal modello CHIMERE - PREV'AIR (*Sistema modellistico WRF-CAMX - Simulazione dell'anno 2014. Prot. 92/2016 Consorzio Lamma*).

Dal 2015 la catena modellistica viene utilizzata per effettuare stime di lungo periodo, come supporto alla Regione Toscana nella realizzazione del "Piano Annuale di Valutazione della Qualità dell'Aria", in ottemperanza ai compiti istituzionali previsti dalla normativa nazionale e comunitaria (*Applicazione agli anni 2014, 2015, 2016, 2017; Prot. 92/2016, Prot. 261/16, Prot. 543/2017, Prot. 536/2018 Consorzio Lamma*).

Con il sistema modellistico, inoltre, possono essere elaborate analisi di scenario, come supporto per la pianificazione di interventi di mitigazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico (supporto a PRQA). In questo modo, a fronte delle mutazioni degli scenari emissivi, è possibile valutare l'efficacia delle misure di contenimento delle emissioni in atmosfera e quindi ottenere una stima ex-ante dei costi-benefici delle politiche di risanamento (*Sistema modellistico WRF-CAMx - simulazione scenario BAU 2020. Approfondimenti QC7 - QC9. - Prot. 231/17 Consorzio Lamma*).

Il sistema di modelli è stato utilizzato per la valutazione della rappresentatività spaziale delle stazioni di monitoraggio della rete regionale, in linea con il metodo basato su stime modellistiche indicato da ENEA, nell'ambito delle attività svolte dal gruppo di lavoro ARPAT-LaMMA, coordinato dalla Regione Toscana (*Rappresentatività spaziale delle*

*stazioni della rete di monitoraggio di qualità dell'aria toscana - Contributo di ARPAT e LAMMA al gruppo di lavoro regionale gestito dalla Regione Toscana sulla rappresentatività spaziale delle stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria della rete regionale).*

I risultati ottenuti con il sistema modellistico sono stati sottoposti ad un processo di verifiche, sia attraverso il confronto con i dati di concentrazione dei principali inquinanti atmosferici misurati nella rete di monitoraggio gestita da ARPAT, sia nell'ambito di campagne di misura finalizzate ad individuare l'origine e la composizione del particolato atmosferico, (Progetto Regionale PATOS - *Verifica del sistema modellistico WRF-CAMX attraverso il confronto con le misure di speciazione chimica del particolato. Prot. 412/15 Consorzio Lamma*).

Successivamente alla catena di analisi, è stata implementata una configurazione finalizzata alla previsione giornaliera della concentrazione di PM10, PM2.5, NO2, O3, dust (polvere desertica) sul territorio regionale. Allo scopo, il modello CAMx viene inizializzato dalle previsioni prodotte dal modello WRF-ARW: tale modello è operativo presso il Consorzio LaMMA per il servizio delle previsioni meteo giornaliere e attualmente permette di effettuare una previsione a 48 ore (oggi, domani), ma a breve sarà operativa una previsione a 72 ore (oggi, domani, dopodomani). Le condizioni iniziali e al contorno sono fornite da PREV'AIR, a partire dai dati di concentrazione del modello CHIMERE a scala continentale. Le mappe relative alle concentrazioni stimate dei principali inquinanti sono pubblicate quotidianamente sul sito del Consorzio Lamma (*Sistema previsionale wrf-camx Prot. 54/2017 Consorzio Lamma*).

Il sistema integrato di previsione e analisi della qualità dell'aria, denominato SPARTA (**S**istema Integrato di **P**revisioni e **A**nalisi della **Q**ualità dell'**A**ria per la **R**egione **T**oscan**A**), è stato presentato nel 2017, nell'ambito della "Giornata di studio sull'inquinamento atmosferico", organizzata dal CNR-IBIMET, dal Dipartimento di Fisica dell'Università di Firenze, dalla Sezione Fiorentina dell'INFN (*Workshop "Giornata di studio sull'inquinamento atmosferico" - Area di Ricerca CNR, Sesto Fiorentino, 28 marzo 2017*).

Nel corso del 2018-2019 il sistema SPARTA è stato aggiornato, sia per quanto riguarda il modello meteo (aggiornamento della versione, nuova configurazione), sia per quanto riguarda il modello chimico (aggiornamento della versione, potenziamento con l'introduzione del modulo di source-apportionment), e successivamente è stato sottoposto a un processo di verifica dei risultati ottenuti. La configurazione aggiornata è stata applicata per la prima volta all'analisi dell'anno 2018, i cui risultati sono descritti nel report "*Sistema modellistico WRF-CAMX. Simulazione dell'anno 2018. Prot. 00000589 del 22-07-2019, Consorzio Lamma*".

NOTA: tutti i documenti citati, identificati da protocollo Consorzio LaMMA, sono scaricabili <http://www.lamma.rete.toscana.it/meteo/qualita-dellaria>

## 1 Il sistema modellistico SPARTA

Il sistema integrato di previsione e analisi della qualità dell'aria SPARTA, basato sul modello chimico CAMx e sul modello meteo WRF-ARW, consente di ottenere due tipi di prodotti, previsioni e analisi dei principali inquinanti atmosferici, su un dominio che copre la Toscana. Il seguente schema a blocchi rappresenta la struttura del sistema integrato.

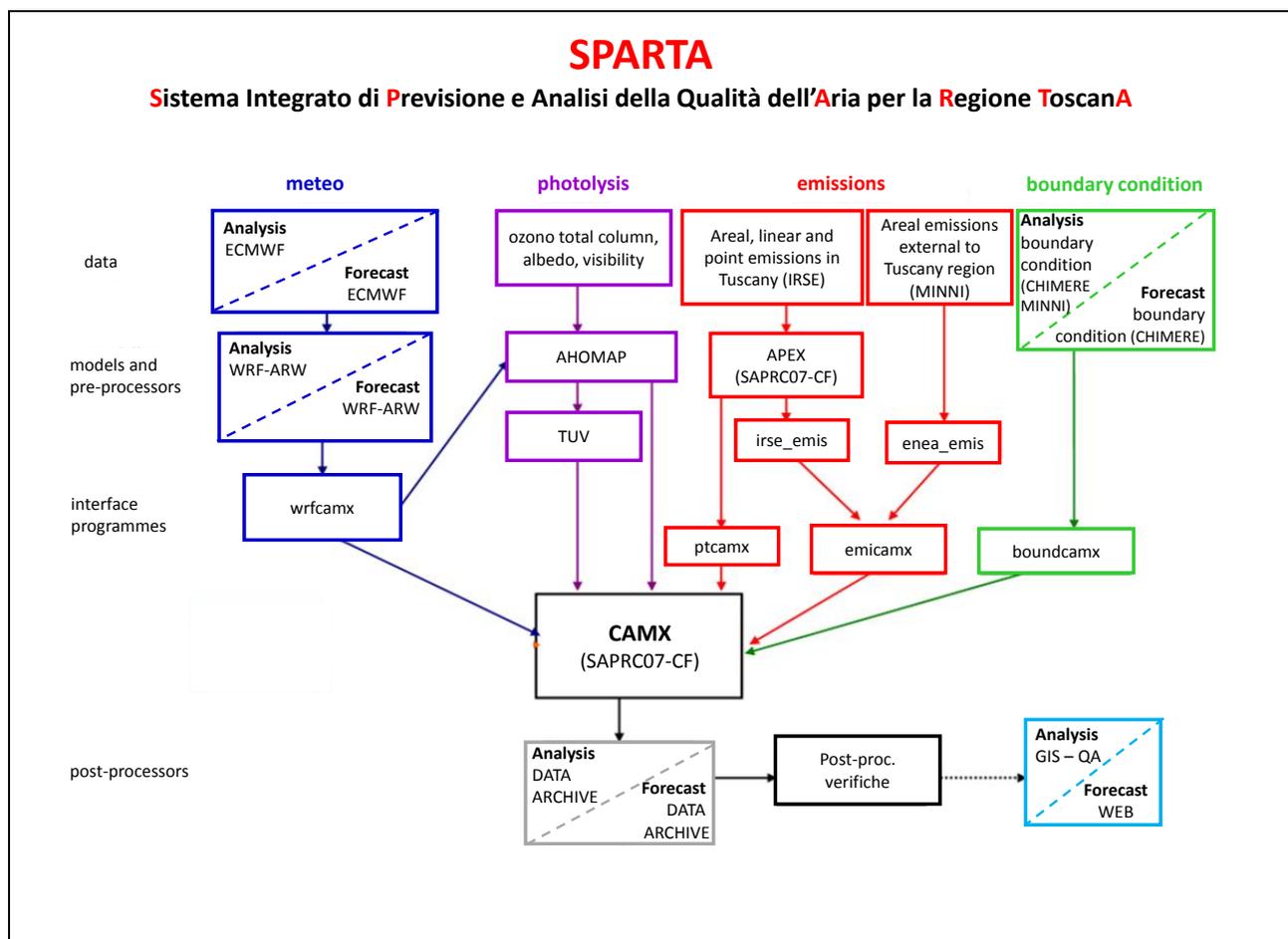


Figura 1 – Schema del sistema modellistico SPARTA.

La catena previsionale utilizza come input meteo le previsioni operative elaborate quotidianamente dal Consorzio Lamma per il servizio meteo regionale e come condizioni iniziale e al contorno le previsioni del modello chimico CHIMERE (fornite da PREV'AIR). Per quanto riguarda la catena modellistica di analisi, l'input meteorologico è fornito dal modello WRF-ARW a 3 Km di risoluzione, inizializzato da dati di analisi ECMWF: tali dati, oltre ad essere utilizzati per la modellistica della qualità dell'aria, vanno a popolare

l'archivio meteo del Consorzio Lamma (*Sistema previsionale wrf-camx - Sistema previsionale wrf-calmet - Archivio meteorologico ad alta risoluzione. Prot. 54/2017 Consorzio Lamma*).

L'aggiornamento della catena di modelli ha previsto l'allineamento del modello meteo utilizzato per le analisi al modello previsionale, sia in termini di versione (versione 3.9), sia come configurazione, adottando lo stesso dominio di calcolo.

La catena modellistica utilizza il modello CAMx, sviluppato da ENVIRON International Corporation, con cui vengono simulati il trasporto, la dispersione, le trasformazioni chimiche e la deposizione secca e umida di inquinanti aeriformi ed aerosol. Il dominio di calcolo copre il territorio toscano, con una risoluzione orizzontale di 2km e con livelli verticali che variano da 10 a 10500 m.

L'aggiornamento della versione (versione 6.5) ha previsto anche l'aggiornamento del modulo chimico (SAPRC07-CF) e la possibilità di utilizzare l'ultima versione del modulo per la stima del source-apportionment.

Come condizioni iniziali e al contorno possono essere utilizzati sia i dati di analisi forniti da PREV'AIR (modello CHIMERE a scala continentale), sia i dati di concentrazioni del modello di riferimento nazionale MINNI (ENEA): attualmente vengono utilizzate le analisi/previsioni fornite da PREV'AIR. Dal giugno 2017 il modello europeo CHIMERE è stato aggiornato e in particolare la risoluzione orizzontale del modello è stata aumentata passando da 0.5° a 0.25°.

Per entrambe le catene i dati di emissione derivano dall'inventario IRSE, disaggregate su base spaziale (1 Km come risoluzione massima), su base temporale oraria, con speciazione chimica dei VOC e del PM: i dati sono relativi all'ultimo aggiornamento disponibile, il 2010. Per utilizzare i dati IRSE si è resa necessaria l'acquisizione di una specifica interfaccia, che rappresenta un'applicazione mirata alle richieste della catena modellistica. Per la consultazione e l'elaborazione dei dati IRSE, sono stati sviluppati specifici processori per estrarre serie storiche puntuali, effettuare medie temporali su tutto il dominio; inoltre sono stati implementati moduli per la validazione e la verifica di congruenza tra i dataset relativi ad aggiornamenti successivi.

Dopo la fase di post-elaborazione, le stime modellistiche vengono validate attraverso il confronto con i dati misurati nelle stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria della rete regionale.

Per la visualizzazione e la fruizione dei risultati ottenuti dal sistema modellistico (modalità analisi), in particolare per gli elaborati grafici, è stato sviluppato un modulo per il trasferimento in ambiente GIS, per fornire layer informativi alla piattaforma GIS-QA. Il sistema "GIS-QA", utilizzato anche per gli elaborati meteo, ha le caratteristiche di

un servizio client che si attiva a partire da una pagina web dedicata del sito del Consorzio LaMMA. Per quanto riguarda la modalità previsionale, le mappe relative alle concentrazioni stimate di PM10, PM2.5, NO2, O3 e dust sahariano sono pubblicate quotidianamente sul sito del Consorzio Lamma (<http://www.lamma.rete.toscana.it/modelli/modello-camx>).

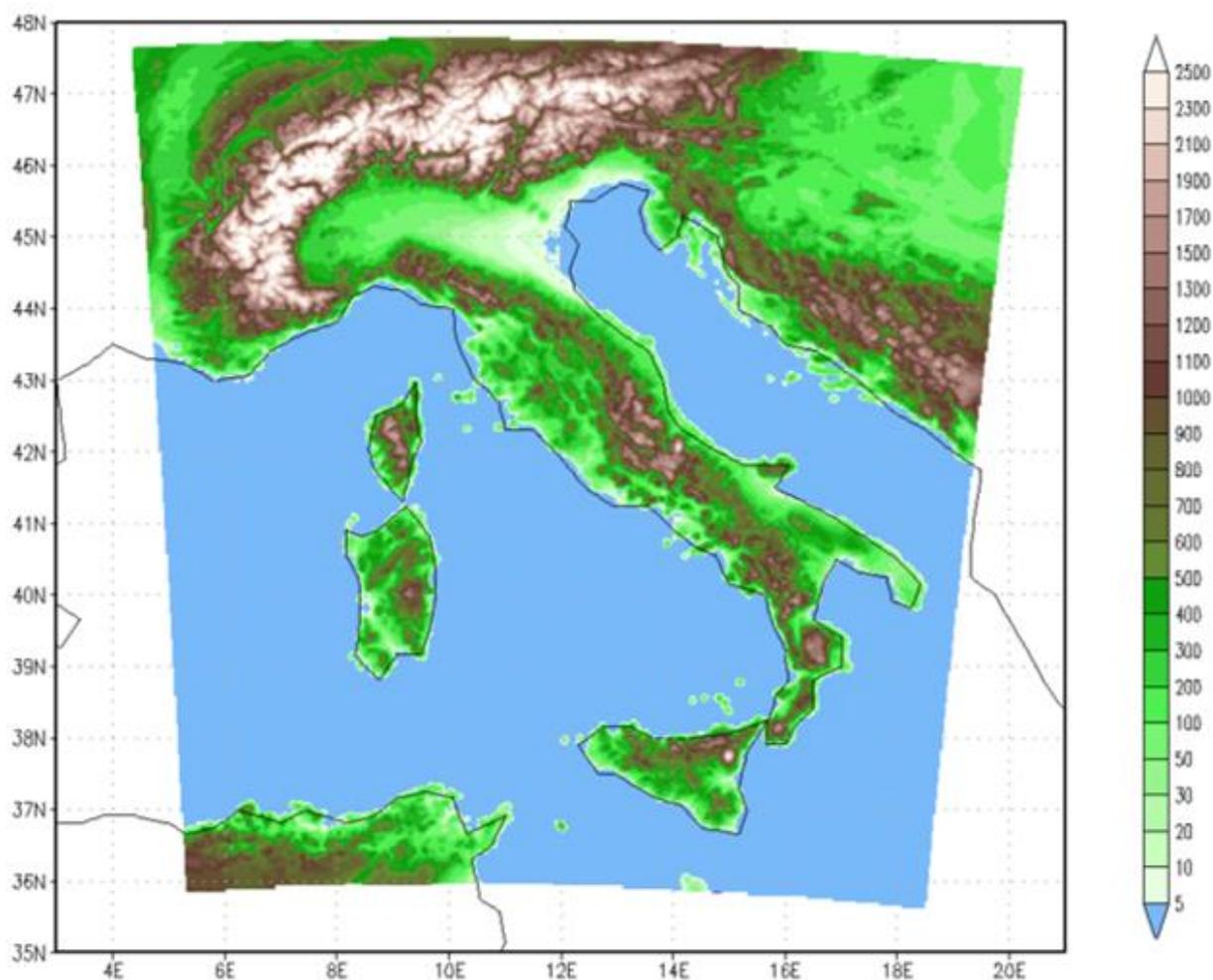
## 2 Modello meteorologico WRF

Il modello WRF (Weather & Research Forecasting model, [www.wrf-model.org](http://www.wrf-model.org),) è stato sviluppato dalla NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e da NCEP (National Centre for Environmental Prediction).

Le caratteristiche principali del modello sono:

- equazioni di Navier-Stokes non idrostatiche (con opzione per ipotesi idrostatica) per fluido compressibile.
- Applicazioni regionali e globali (da pochi metri a centinaia di km di risoluzione).
- Inclusione completa di Coriolis e di tutti i termini di curvatura.
- Possibilità di utilizzare più griglie con multipli livelli di annidamento in modalità one-way o two-way.
- Griglie innestate in movimento per seguire il tragitto del vortice.
- Coordinate di tipo "terrain-following" con possibilità di variare la spaziatura con l'altezza.
- Diverse proiezioni geografiche (Stereografica Polare, Lambert, Mercatore, latitudine longitudine)
- Staggeraggio della griglia Arakawa.
- Opzioni di integrazione temporale Runge-Kutta di secondo e terzo ordine.
- Schemi di avvezione (sia orizzontale che verticale) dal secondo al sesto ordine.
- Usa "time-split" a piccoli passi per le onde acustiche e gravitazionali.
- Opzioni a fisica completa per radiazione superficiale, convezione cumuliforme, microfisica, ecc.

La configurazione adottata per il sistema integrato SPARTA prevede che il modello WRF-ARW.v3.9 venga inizializzato con i dati di previsione/analisi ECMWF, ad una risoluzione 12 km circa, ([http://www.ecmwf.int/products/data/operational\\_system/](http://www.ecmwf.int/products/data/operational_system/)), utilizzati anche come forcing ogni 6 ore. Il modello è configurato su una griglia di calcolo con una risoluzione orizzontale di circa 3 Km sull'intero territorio nazionale (400x440 celle) (Fig. 2).



**Figura 2 – Dominio di calcolo del modello WRF-ARW a 3 km di risoluzione orizzontale.**

Per quanto riguarda la struttura dei livelli verticali, è stato scelto un sistema di coordinate verticali terrain-following, tale da migliorare la descrizione nei bassi strati, con il primo livello corrispondente a circa 20 metri. Il time-step è pari a 40 secondi.

Per quanto riguarda la parametrizzazione del PBL è stato adottato lo schema Yonsei University – YSU, schema non locale in cui la chiusura di ogni variabile non prognostica è ottenuta da relazioni semi-empiriche delle variabili prognostiche, relative a punti griglia distanti da quello in cui si vuole stimare la variabile non prognostica. Questo schema risulta generalmente più accurato degli schemi locali in quanto si basa sul principio che le proprietà di uno strato del PBL possano mescolarsi con quelle degli altri strati e non solo con quelle degli strati adiacenti, come avviene invece negli schemi locali. E' uno schema K di primo ordine, pertanto conserva le equazioni prognostiche solo per la variabile media e parametrizza i termini delle perturbazioni secondo la K-theory.

Di seguito le caratteristiche principali della configurazione adottata sono riportate in tabella 1.

**Tab. 1 - Principali caratteristiche della configurazione adottata.**

<b>Numero griglie</b>	1 (400x440)
<b>Tipo di nesting</b>	NO nesting
<b>Risoluzione orizzontale</b>	3km
<b>Parametrizzazione convettiva</b>	Kain-Fritsch
<b>Livelli verticali</b>	35 sigma
<b>Time-step</b>	40 s
<b>Parametrizzazione PBL</b>	Schema Yonsei University – YSU
<b>Parametrizzazione superficiale</b>	Unified Noah land-surface model : schema unificato NCEP/NCAR/AFWA di suolo, temperatura e umidità in quattro livelli, oltre che di copertura nevosa
<b>Parametrizzazione radiativa (LW/SW)</b>	LW: schema RRTM (modello di trasferimento radiativo rapido) SW: schema Dudhia.
<b>Microfisica</b>	New Thompson et al.: nuovo schema con processi di formazione ghiaccio, neve e graupel adatto per simulazioni ad alta risoluzione.

### 3 Modello chimico CAMx

Il modello di chimica e trasporto CAMx, Comprehensive Air quality Model with extensions, è stato sviluppato da ENVIRON International Corporation (<http://www.camx.com/>), e rappresenta uno dei modelli di riferimento a livello internazionale per lo studio dell'inquinamento atmosferico. Il modello si basa sull'equazione generale del trasporto, o di continuità, riferita ad un sistema di coordinate fisso o euleriano e in coordinate verticali terrain following.

La variazione nel tempo della concentrazione, in ogni punto griglia e per ogni specie considerata, è espressa come la somma dei contributi dovuti alla avvezione orizzontale, al trasporto verticale, alla diffusione turbolenta orizzontale e verticale, alla chimica, che dipende dal meccanismo scelto, alle emissioni delle sorgenti presenti, alla rimozione dovuta alla deposizione secca e umida. L'equazione di continuità è risolta con un metodo numerico che, separando i termini dell'equazione in moduli - tecnica dello splitting - ne computa in serie il singolo contributo ad ogni passo temporale. In prima battuta viene valutato il contributo alle emissioni da sorgente, poi il trasporto orizzontale, il trasporto verticale, la diffusione verticale, la diffusione orizzontale, la deposizione umida, la chimica. I processi di trasformazione chimica in fase gassosa sono effettuati sulla base di meccanismi chimici ridotti, che permettono una trattazione semplificata raggruppando i composti organici in classi omogenee. Inoltre è possibile includere la chimica del particolato sia organico che inorganico, che viene descritto attraverso 20 composti:

- aerosol secondario inorganico: solfato, nitrato, ammonio;
- aerosol marino: sodio, cloro;
- carbonio elementare e organico primario;
- aerosol cristallino (fine e grosso);
- altro aerosol primario inerte (fine e grosso);
- aerosol secondario organico.

Per alcuni composti, aerosol cristallino e altro aerosol primario, sono previste due frazioni granulometriche: fine inferiore a 2.5  $\mu\text{m}$  e grosso, tra 2.5 e 10  $\mu\text{m}$ . I composti secondari, il carbonio elementare e l'organico primario sono assegnati alla frazione fine, mentre l'aerosol marino alla frazione grossa.

La deposizione secca è trattata calcolando per ogni specie una velocità di deposizione, funzione del land use e delle condizioni meteorologiche locali, ed è inclusa nel calcolo

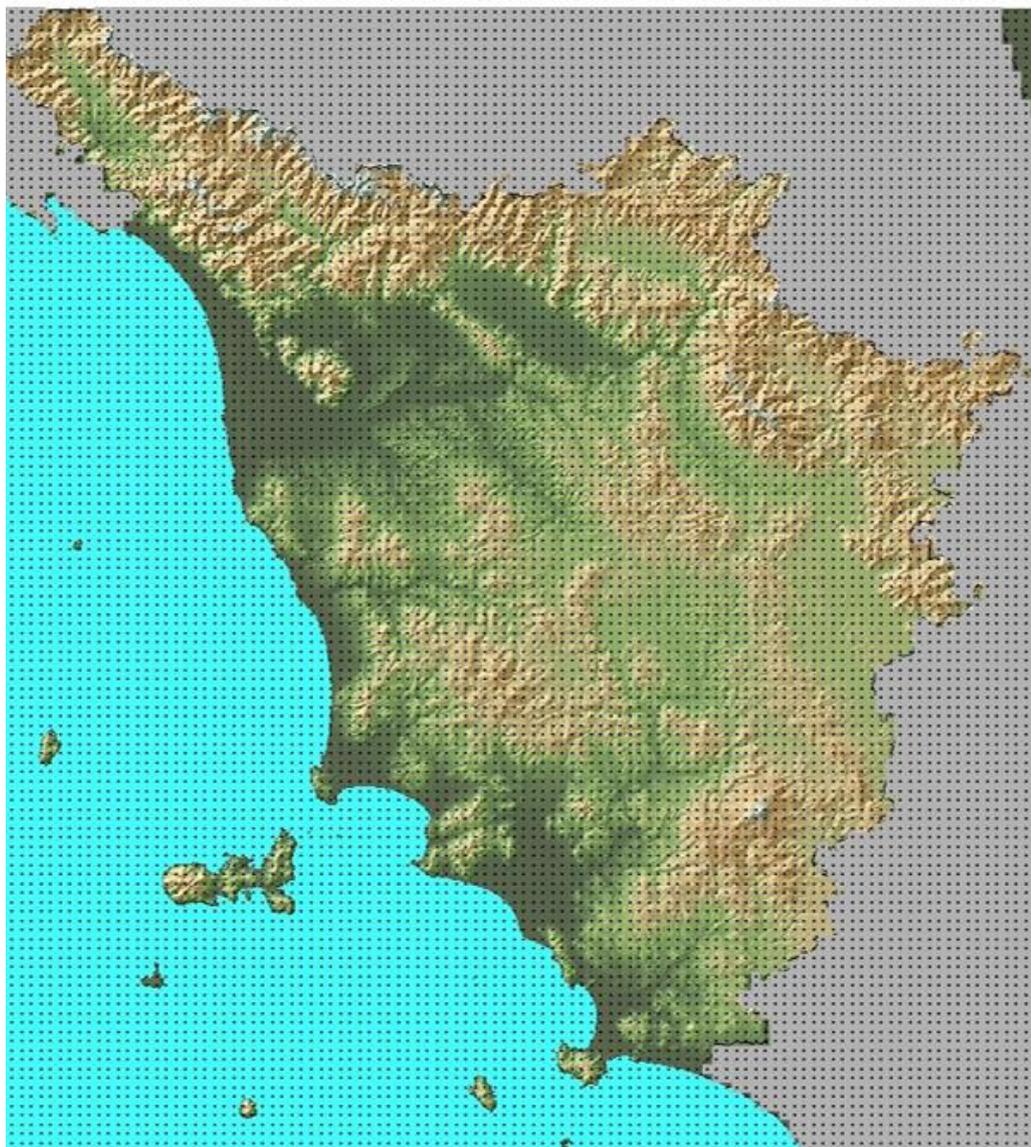
della diffusione verticale. In particolare, per quanto riguarda l'aerosol, la deposizione secca avviene per diffusione, impatto e deposizione gravitazionale e viene stimata utilizzando l'approccio di Slinn e Slinn (1980). Per quanto riguarda la deposizione umida, viene utilizzato l'approccio di Seinfeld e Pandis (1998).

L'input meteorologico, costituito da campi tridimensionali di vento, di temperatura, di pressione, dai coefficienti di diffusione verticale, dalla concentrazione media di vapore d'acqua, dalla copertura nuvolosa, dalla pioggia, può essere fornito da un modello prognostico.

Per il calcolo dei ratei delle reazioni fotochimiche sono necessari input relativi a albedo, spessore della colonna di ozono stratosferico, opacità dell'aria; in presenza di copertura nuvolosa il valore dei ratei viene corretto.

Il modello fornisce in uscita le stime di concentrazione media oraria e le quantità depositate al suolo, relative alla rimozione secca ed alla rimozione umida, per ogni specie inquinante simulata.

Nella configurazione adottata, CAMx.v6.5 è stato configurato su di un dominio di calcolo che copre l'intera regione Toscana, con una estensione di 220x248 Km<sup>2</sup>. Il dominio, in coordinate UTM (32), è costituito da 110 per 124 celle quadrate di 2 Km di lato. Nella simulazione sono stati considerati 18 livelli verticali, da 20 m a 10500 m, con una risoluzione più alta in prossimità del suolo (Fig. 3).



**Fig. 3 – Dominio di calcolo del modello CAMx a 2 km di risoluzione orizzontale.**

I file che costituiscono l'input meteorologico, forniti da WRF-ARW.v3.9, sono stati interpolati (da circa 3 Km a 2 Km), proiettati in coordinate UTM e opportunamente formattati. Ciascun file contiene le stime orarie delle variabili per ogni giorno della simulazione.

Il meccanismo chimico adottato è SAPRC07 più aerosol (SAPRC07+CF). Le emissioni areali, con disaggregazione temporale oraria e speciazione chimica, sono state ottenute dall'Inventario Regionale IRSE, alla risoluzione iniziale di 1Km in coordinate UTM, poi ricampionate a 2 Km. Sul territorio esterno alla regione Toscana, ma interno al dominio di calcolo, sono state utilizzate le emissioni del modello MINNI, a 4 Km di risoluzione e interpolate a 2 Km. Le emissioni puntuali disaggregate temporalmente su base oraria, sono anch'esse fornite da IRSE.

Come condizioni iniziali e al contorno sono attualmente utilizzati i dati forniti da PREV'AIR (modello CHIMERE a scala continentale) a 0.25° di risoluzione.

**Tabella 2. Principali caratteristiche della configurazione adottata per l'anno 2018.**

<b>Modello</b>	CAMx versione 6.5
<b>Periodo</b>	ANNO 2018
<b>Risoluzione temporale</b>	oraria
<b>Dominio di calcolo</b>	Dimensioni: 220x248 Km <sup>2</sup> ; 110 x 124 celle Risoluzione spaziale: 2 Km Coordinate: UTM (32) 554 km E; 4677 Km N
<b>Livelli verticali</b>	18 livelli; da 10 m a 10500 m
<b>Input meteo</b>	WRF; variabili su base oraria, risoluzione 3 Km, con interpolazione 2 Km, anno 2018
<b>Deposizione secca</b>	Attivata - Slinn e Slinn (1980)
<b>Deposizione umida</b>	Attivata - Seinfeld e Pandis (1998)
<b>Chimica</b>	SAPRC07+CF
<b>Concentrazioni iniziali e al contorno</b>	CHIMERE (MELCHIOR), (day-1), anno 2018, risoluzione 0.25°.
<b>Emissioni areali Simulazione 2018-2010</b>	IRSE 2018-2010: database aggiornato al 2010 variabili su base oraria; risoluzione 1 Km, con interpolazione 2 Km, MINNI - area esterna alla Toscana: variabili su base oraria; risoluzione 4 Km, con interpolazione 2 Km
<b>Emissioni puntuali</b>	IRSE 2018-2010: database aggiornato al 2010 variabili su base oraria
<b>Specie in output</b>	23 specie: NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub> , PNO <sub>3</sub> , PSO <sub>4</sub> , PNH <sub>4</sub> , POA, PEC, FPRM, CPRM, CCRS, FCRS, SOA1, SOA2, SOA3, SOA4, SOPA, SOPB, NA, PCL

Le specie o composti chimici modellizzati sono 23: NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>, aerosol secondario inorganico (PNO<sub>3</sub>, PSO<sub>4</sub>, PNH<sub>4</sub>) aerosol marino (NA, CL), carbonio elementare, (PEC), organico primario (POA), aerosol crostale (CCRS, FCRS), altro aerosol primario inerte (FPRM, CPRM), aerosol secondario organico (SOA1, SOA2, SOA3, SOA4, SOPA, SOPB). La stima di concentrazione di PM<sub>10</sub> è stata ottenuta come somma di tutte le classi di aerosol, mentre per ottenere le stime di PM<sub>2.5</sub> sono stati

sommati solo i composti con granulometria fine (aerosol secondario organico e inorganico, PEC, POA, FCRS, FPRM). Nella tabella 2 sono riportate le principali caratteristiche dell'attuale configurazione, applicata all'anno 2018, prima applicazione dopo l'aggiornamento della catena di modelli.

## 4 Emissioni

Il modello CAMx può trattare emissioni diffuse (areali) e emissioni derivanti da sorgenti puntuali (camini). Le emissioni sono espresse dal flusso di massa per unità di tempo, in particolare come grammi moli/ora per i gas e grammi/ora per l'aerosol: di conseguenza è necessario che le emissioni in ingresso siano disaggregate sia su base temporale oraria, che su base spaziale (emissioni areali). Per la simulazione di inquinanti secondari, attivando la chimica, è necessario inoltre che le emissioni relative a VOC e al particolato siano disaggregate secondo la codifica SAROAD e poi riaggregate, in accordo con il meccanismo chimico scelto (SAPRC07 + CF).

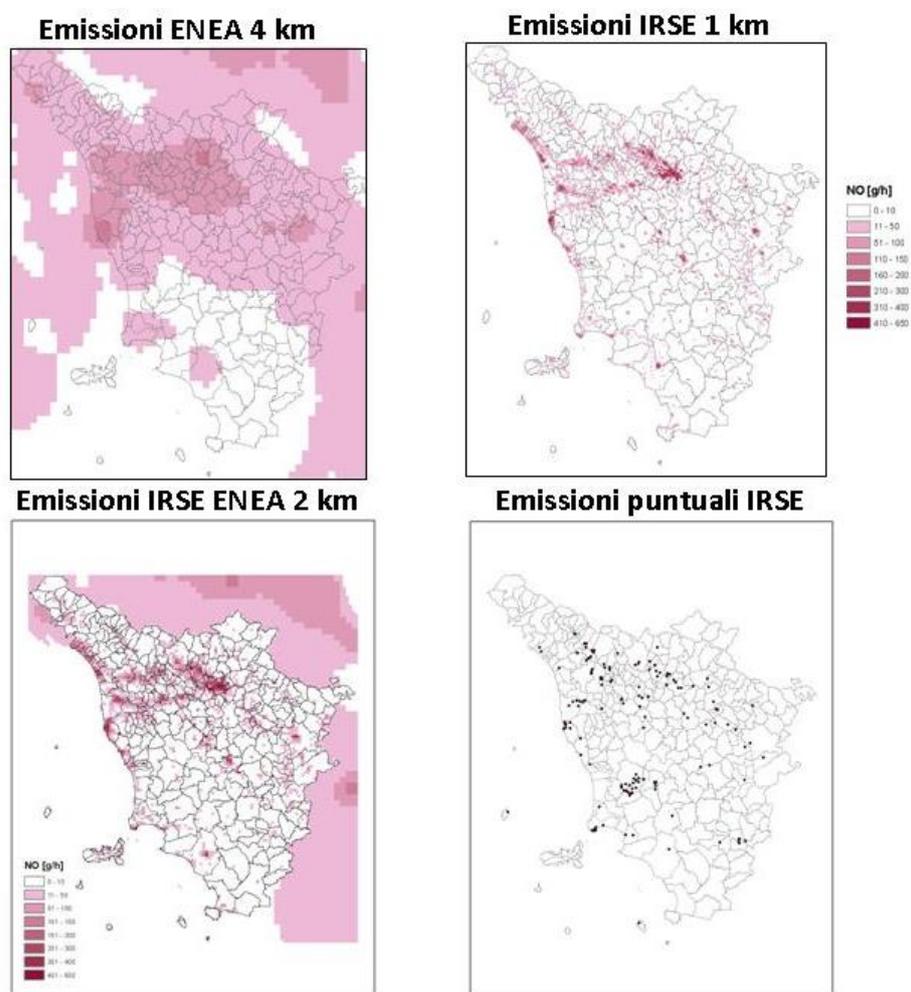
Le emissioni, sia areali che puntuali, relative al territorio della regione Toscana sono fornite dall'inventario regionale IRSE, gestito dal software APEX (Techne Consulting, <http://www.techne-consulting.com/joomla/it/>).

Tale software non era predisposto per effettuare la disaggregazione spaziale, temporale e la "speciazione" chimica. Per questo motivo il Consorzio Lamma ha richiesto un upgrade alla società Techne Consulting, in base a queste specifiche esigenze. L'interfaccia sviluppata permette di estrarre file con disaggregazione temporale oraria, disaggregazione spaziale pari a 1 Km e speciazione chimica dei VOC e del particolato, in accordo con il meccanismo chimico SAPRC07 + CF. Le emissioni puntuali, anche queste disaggregate su base oraria e con speciazione chimica, sono fornite in due file distinti, uno relativo al rateo d'emissione di ciascun camino, l'altro con le caratteristiche dei camini presi in esame (coordinate geografiche, altezza e diametro del camino, velocità e temperatura dei fumi).

I dati emissivi sono relativi all'ultimo aggiornamento disponibile, anno di riferimento 2010, in attesa dell'aggiornamento dell'inventario regionale delle emissioni, previsto entro il 2020.

Il dominio di calcolo include anche delle aree che sono esterne alla regione Toscana e che tuttavia non possono essere trascurate nel computo delle emissioni: per questo sono state utilizzate le emissioni del modello MINNI, fornite da ENEA per l'anno di riferimento 2010. Si tratta di file relativi alle emissioni su base oraria di un'area maggiore rispetto al dominio di calcolo a una risoluzione di 4 Km, quindi è stato necessario interpolare i file per passare da 4 a 2 Km di risoluzione. Il meccanismo chimico adottato nell'applicazione del modello MINNI per l'anno 2010 è SAPRC07, analogo a quanto adottato per il modello CAMx.

A titolo di esempio, sono riportate le mappe relative al rateo emissivo, cumulato su 24 ore per NO, ENEA e IRSE.



**Fig.4 – Mappe relative al rateo emissivo, cumulato su 24 ore per NO (emissioni diffuse) e localizzazione dei camini (emissioni puntuali).**

## 5 Condizioni iniziali e al contorno

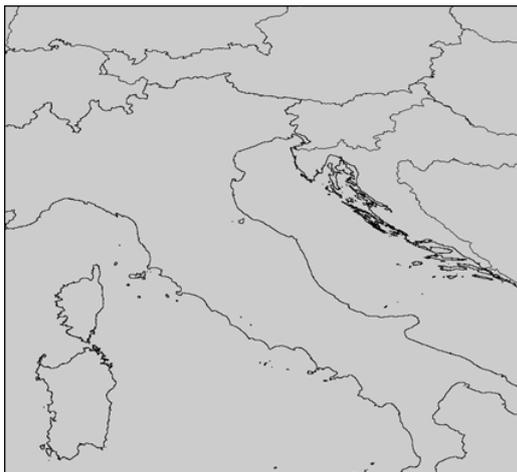
Il modello CAMx richiede campi di concentrazione utilizzati come condizioni iniziali e al contorno: le condizioni iniziali sono fornite da un campo tridimensionale relativo a un tempo precedente all'inizio della simulazione, mentre le condizioni al contorno, che devono essere fornite per tutto il periodo della simulazione, sono relative ad una cornice intorno al dominio di calcolo. In entrambi i casi si considerano i livelli verticali e le specie chimiche modellizzate o un sottoinsieme di queste.

Inizialmente, la catena di modelli WRF-CAMx è stata applicata per gli anni 2007 e 2010 utilizzando come condizioni iniziali e al contorno le stime ottenute dal modello MINNI a 4 Km di risoluzione spaziale orizzontale, con 18 livelli verticali (da 20 a 10500 m) e risoluzione temporale oraria.

Nel caso in cui la simulazione si riferisca ad anni diversi da questi, dal 2014 e successivi, non è possibile utilizzare questo tipo di input. Si è reso necessario valutare altre opzioni, cioè la possibilità di utilizzare condizioni iniziali e al contorno ottenute da altri modelli sia nazionali che internazionali.

Sulla base di considerazioni di tipo tecnico e soprattutto economico, è stato scelto di utilizzare i campi di concentrazione stimati dal modello CHIMERE (<http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>) a scala continentale, forniti gratuitamente attraverso il portale PREV'AIR (<http://www2.prevoir.org/>). Questo modello, oltre a essere riconosciuto a livello internazionale, fornisce le condizioni al contorno a numerosi modelli utilizzati presso centri di ricerca e istituzioni pubbliche. Inoltre la fornitura, sempre puntuale e completa, è a carattere non oneroso, fattore determinante per la scelta. Trattandosi di un modello che opera a scala continentale (il dominio copre gran parte dell'Europa), la risoluzione spaziale inizialmente era bassa, cioè 0.5° (circa 50 Km); tuttavia, dal giugno 2017 il modello CHIMERE è stato aggiornato e in particolare la risoluzione orizzontale è stata aumentata passando da 0.5° a 0.25°.

Per ottenere la fornitura dati è stata effettuata la procedura di registrazione al portale PREV'AIR, che prevede la formalizzazione della richiesta fornendo alcune specifiche tecniche come l'estensione del dominio e il formato dei dati: la scelta effettuata prevede il formato netcdf, sul dominio riportato in Fig. 4, che copre l'area compresa fra 7.5°E e 18.5°E e fra 38.5°N e 48.5°N, su 8 livelli verticali.



**Figura 4. Dominio della fornitura dati CHIMERE**

Nell'ottica di rendere operativa la catena modellistica, sono state predisposte varie procedure atte a automatizzare la run del modello a partire dallo scarico dei dati di input fino alla visualizzazione e valutazione dei risultati.

Quindi, giornalmente vengono scaricati, archiviati e processati i dati previsionali di CHIMERE da + 24h a +72h, oltre alle analisi relative al giorno precedente (day-1) con le quali si ricostruisce l'analisi di interi anni, costituendo un vero e proprio archivio. Infatti, dovendo effettuare simulazioni di anni passati, analogamente all'input meteorologico, anche per le condizioni al contorno vengono utilizzati i dati di analisi precedentemente archiviati.

Al fine di utilizzare come condizioni iniziali e al contorno i campi tridimensionali di concentrazione prodotti da CHIMERE, sono state messe a punto alcune procedure di conversione e formattazione. In particolare, dal momento che il meccanismo chimico su cui si basa il modello francese è MELCHIOR, i files relativi alle specie gassose e alle specie aerosol forniti come input sono stati convertiti al fine di associare le specie di CHIMERE (MELCHIOR) a quelle di CAMx (SAPRC07).

## 6 Implementazione di pre/postprocessori per CAMx

L'implementazione della catena modellistica ha richiesto non solo l'allineamento delle versioni dei modelli, dei preprocessori e dei moduli di interfaccia, ma anche la realizzazione di alcuni di questi. Infatti alcuni preprocessori sono forniti direttamente da ENVIRON International Corporation, altri sono stati appositamente implementati. In particolare, sono stati compilati e modificati il preprocessore wrfcamx, che produce gli input meteo, utilizzando i file netcdf in uscita dal modello ad alta risoluzione WRF-ARW, a 3 Km, e i preprocessori ahomap e tuv, che producono due file necessari per il calcolo dei ratei delle reazioni fotochimiche, utilizzando come input dati di ozono forniti da TOMS (<ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/data/>).

I moduli di interfaccia per la gestione delle emissioni e delle condizioni al contorno sono stati invece sviluppati appositamente. La messa a punto dei moduli per fornire dell'input emissivo al modello è stata realizzata attraverso numerosi passaggi. Il modulo di interfaccia per l'inventario IRSE, sviluppato da Techne Consulting in ambiente LINUX, fornisce in uscita, per le emissioni areali, file giornalieri in formato netcdf corrispondenti a matrici di flusso di massa per unità di tempo (g/h per le polveri e gmol/h per i gas) di 220x248 celle di 1km di lato per 24 ore, per specie e composti chimici considerati dal meccanismo chimico SAPRC07 + CF. Questi file giornalieri sono poi ricampionati (da 1 a 2 Km) e formattati sia nei formati richiesti dal modello che come file netcdf. Questo secondo formato è necessario nel caso in cui si vogliono considerare anche le emissioni su aree esterne alla regione Toscana: per queste aree infatti sono utilizzate le emissioni ottenute dal modello MINNI. Dopo aver effettuato un passaggio dalle specie modellate in MINNI a quelle utilizzate in CAMx, uniformato le unità di misura, interpolato per passare da 4 a 2 Km di risoluzione, i file netcdf ottenuti sono sovrapposti ai file elaborati da IRSE in modo da ottenere una copertura completa del dominio di calcolo; infine il file netcdf ottenuto viene formattato per CAMx.

Le emissioni puntuali, fornite da IRSE in due file distinti, uno relativo al rateo di emissione e l'altro alle caratteristiche dei camini, sono disaggregate su base oraria e con speciazione chimica. E' stata sviluppata una apposita interfaccia per formattare questi file in un unico file giornaliero nei formati di CAMx.

Anche per le condizioni al contorno fornite dal modello MINNI o dal modello CHIMERE è stata sviluppata una apposita interfaccia per il modello CAMx, con la funzione di

effettuare sia l'interpolazione alla risoluzione finale di 2 Km, sia, se necessario, la conversione delle specie chimiche.

Sono stati sviluppati dei post-processor in grado di elaborare i file di uscita del modello in modo da renderli fruibili per l'analisi delle performance modellistiche e per la visualizzazione del dato stesso.

In particolare, sono state elaborate le mappe medie di concentrazione di PM10, PM2.5, NO2, SO2, O3, con periodi temporali variabili (medie giornaliere, mensili, stagionali, annue), e i campi meteorologici ottenuti da WRF, utilizzati come input meteorologico modellistico ([www.wrf-model.org](http://www.wrf-model.org)). Per quanto riguarda la visualizzazione delle emissioni, è stato realizzato un apposito processore che permette di elaborare file relativi a emissioni areali IRSE, MINNI o all'unione dei due tipi. Inoltre, si possono estrarre le serie storiche di singoli punti, in corrispondenza delle stazioni di monitoraggio della rete regionale gestite da ARPAT, per la validazione del modello.

Infatti, è stato elaborato un post-processore per l'analisi e la valutazione modellistica.

Per effettuare una valutazione quantitativa delle prestazioni della catena modellistica sono stati utilizzati alcuni indicatori statistici (tab.7), comunemente utilizzati in letteratura. Nella seguente tabella sono elencati gli indicatori scelti.

**Tab. 7 – Indicatori statistici.**

NOME	FORMULA	NOTE
MEDIA OSSERVAZIONI	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$	
MEDIA MODELLO	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$	
NORMALIZED MEAN BIAS	$\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)}{\sum_{i=1}^N X_i}$	Valori tra -1 e inf. Valore ottimo = 0
NORMALIZED MEAN ERROR	$\frac{\sum_{i=1}^N  Y_i - X_i }{\sum_{i=1}^N X_i}$	Valori tra 0 e inf. Valore ottimo = 0
FRACTIONAL BIAS	$\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)}{\sum_{i=1}^N \frac{(Y_i + X_i)}{2}}$	Valori fra -2 e +2 Valore ottimo=0
FRACTIONAL ERROR	$\frac{\sum_{i=1}^N  Y_i - X_i }{\sum_{i=1}^N \frac{(Y_i + X_i)}{2}}$	Valori fra 0 e 2 Valore ottimo 0
STANDARD DEVIATION MODELLO	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}$	
STANDARD DEVIATION OSSERVAZIONI	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$	
ROOT MEAN SQUARE ERROR	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}$	Valore ottimo = 0
CORRELATION	$\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$	Valori tra -1 e 1 Valore ottimo = 1
BIAS	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)$	Valore ottimo = 0
INDEX OF AGREEMENT (WILLMOTT)	$1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N ( X_i - \bar{X}  +  Y_i - \bar{X} )^2}$	Valori fra 0 e 1 Valore ottimo =1

$N$  = numero osservazioni presenti

$X_i$  = dati osservati

$Y_i$  = dati simulati

Infine, per la visualizzazione e la fruizione dei risultati ottenuti dalla simulazione modellistica, in particolare per gli elaborati grafici (mappe e grafici), è stato sviluppato un modulo per il trasferimento di questi in ambiente OpenGIS, per fornire layer informativi alla piattaforma GIS-QA. Il sistema "GIS-QA", già operativo per gli elaborati meteo, ha le caratteristiche di un servizio client che si attiva a partire da una pagina web dedicata del sito del Consorzio LaMMA. Attraverso tale pagina ogni utente, autorizzato previo rilascio di account, può accedere via web al servizio.