

## Il contributo del GPS nelle previsioni di eventi meteorologici significativi

Danilo PICCARDO, Domenico SGUERSO(\*)

(\*) Dipartimento di Macchine, Sistemi Energetici e Trasporti, Università degli Studi di Genova, tel +390103532421, fax +300103532555, e-mail: [domenico.sguerso@unige.it](mailto:domenico.sguerso@unige.it)

### Riassunto

La precisione delle misure GPS è influenzata da differenti effetti agenti sul segnale osservato; uno di questi è la rifrazione troposferica. Lo studio della variabilità spazio/temporale di tale effetto, se da un lato consente di migliorare la precisione del posizionamento, dall'altro offre importanti informazioni per la previsione di eventi meteorologici rilevanti.

Nel presente lavoro si adotta una strategia che, a partire dalla stima del contenuto d'acqua precipitabile complessivamente presente in atmosfera proveniente dall'inversione delle osservazioni GPS, analizza le condizioni di saturazione dei singoli strati atmosferici per valutare il vapore acqueo effettivamente precipitabile alle differenti quote.

A tal fine sono stati costruiti modelli di profili atmosferici di *mixing ratio* (*mr*) e di *mixing ratio* a saturazione (*mrs*), ottenuti a partire da radiosondaggi effettuati nell'ambito del progetto Mesoscale Alpine Programme (MAP).

La previsione di eventi meteorologici significativi è stata ottenuta con successo nelle sperimentazioni condotte per la città di Genova nel trimestre Settembre – Novembre 1999; in particolare per l'evento rilevante del 3 Novembre 1999, si è ottenuto un anticipo di 5 ore, stimando un'altezza di pioggia di 36 mm contro i 53.4 mm osservati al suolo.

La strategia affrontata, ottenuta a partire da osservazioni puntuali, vuole fornire un contributo integrativo allo studio delle previsioni di eventi meteorologici significativi. Particolare interesse assumerà una analisi spaziale che, a partire da un continuo sviluppo delle reti di Stazioni Permanenti GPS, permetta delle stime dei gradienti atmosferici orizzontali abbinate a quelle verticali.

### Abstract

The precision of GPS measurements is influenced by different effects acting on the observed signal; one of these is troposphere refraction. The study of spatial/temporal variability of such effect either allows to improve the positioning precision, and offers important information to forecast significant meteorological events.

In the present work a strategy was tested so that, starting from the estimation of precipitable water contents altogether present in atmosphere by means of the inversion of GPS observations, the saturation conditions of single atmospheric layers may be analysed to evaluate real precipitable water vapour at different altitude.

At this purpose models of atmospheric profiles of *mixing ratio* (*mr*) and of *saturated mixing ratio* (*mrs*) were built starting from radiosounding performed during the Mesoscale Alpine Programme (MAP).

The forecast of significant meteorological events was tested with success in the experimentation for Genoa city during the quarter September-November 1999; in particular, concerning the relevant event on 3<sup>rd</sup> November 1999, an advantage of 5 hours was obtained, estimating rain height of 36 mm versus 53.4 mm observed at the ground.

The analysed strategy, using punctual GPS observations, wants to provide an integrative contribution to study the forecast of significant meteorological events. Particular interest will assume spatial analysis that, following the continuous development of GPS Permanent Station Networks, will allow to estimate horizontal atmospheric gradients associated to the vertical ones.

### **Introduzione**

La precisione delle misure GPS<sup>1</sup> è influenzata da differenti effetti agenti sul segnale osservato; uno di questi è la rifrazione troposferica. Lo studio della variabilità spazio/temporale di tale effetto, se da un lato consente di migliorare la precisione del posizionamento, dall'altro offre importanti informazioni per la previsione di eventi meteorologici rilevanti. Dalle osservazioni GPS è possibile infatti stimare il contenuto d'acqua precipitabile PWV<sup>2</sup>, definito come quantità d'acqua che si otterrebbe condensando il vapore acqueo contenuto in un'immaginaria colonna d'aria con superficie di base unitaria, che si estende dalla stazione GPS fino al limite della troposfera. Tale grandezza rappresenta pertanto il limite superiore del quantitativo di vapore acqueo che potenzialmente potrebbe precipitare.

Il lavoro si propone di valutare il quantitativo di vapore acqueo coinvolto alle differenti quote e di valutare le condizioni per la precipitazione, ottenendo così una stima del vapore acqueo effettivamente precipitabile. Ciò è possibile confrontando i profili di *mixing ratio*<sup>3</sup> (mr) e di *mixing ratio* a saturazione (mrs), in quanto un loro sovrapporsi indica saturazione; ma per conoscere tali profili occorrerebbero frequenti lanci di radiosonde per i diversi siti oggetto di indagine. Essendo questa una procedura onerosa, si sono individuate relazioni analitiche che bene rappresentino tali andamenti in particolare negli strati a bassa quota, poiché maggiormente significativi. Tali modelli, funzione di alcuni parametri, sono stati tarati in funzione delle informazioni locali provenienti dai dati meteorologici osservati al suolo, dalle osservazioni GPS e, non ultimo, dal tratto dei profili di *mrs* ottenuto per quote elevate (superiori ai 3000 m) in regioni limitrofe.

Campo di indagine è la città di Genova per il trimestre Settembre – Novembre 1999, periodo nel quale si ha la disponibilità dei dati provenienti da radiosondaggi effettuati nell'ambito del progetto MAP<sup>4</sup> in differenti momenti particolarmente significativi, ossia precedenti, contemporanei e successivi ad eventi meteorici di particolare intensità. A questi è stato possibile associare le osservazioni GPS della stazione permanente situata presso l'Istituto Idrografico della Marina, facente parte della rete GPS nazionale GeoDAF gestita dall'Agenzia Spaziale Italiana, oltre ai dati meteorologici al suolo rilevati dall'Osservatorio Meteorologico del DIP.TE.RIS<sup>5</sup>.

L'obiettivo è quello di verificare se sia possibile prevedere eventi meteorici significativi ed eventualmente con quale anticipo, stimando inoltre il volume d'acqua potenzialmente coinvolto nella precipitazione.

### **Dati meteo-idrologici osservati e legame con PWV relativi alla città di Genova**

I dati utilizzati per l'elaborazione numerica sono relativi al periodo compreso tra il 07-09-99 e il 16-11-1999, trimestre oggetto di indagine del progetto MAP.

Per valutare il possibile legame esistente tra PWV e le precipitazioni effettivamente verificatesi si sono considerati in particolare i valori di pressione, temperatura, umidità relativa, altezza di pioggia e radiazione solare dell'Osservatorio Meteorologico del DIP.TE.RIS, Via Balbi 5. Gli stessi parametri, con in aggiunta la temperatura di rugiada, sono forniti dai radiosondaggi del progetto MAP e da quelli lanciati presso l'aeroporto di Cuneo. La stima del ritardo troposferico zenitale è

---

<sup>1</sup> GPS= Global Positioning System

<sup>2</sup> PWV= Contenuto di acqua precipitabile valutabile grazie a misure GPS, Precipitable Water Vapor

<sup>3</sup> *Mixing ratio*= rapporto di mescolanza

<sup>4</sup> MAP= Mesoscale Alpine Programme

<sup>5</sup> DIP.TE.RIS = Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse dell'Università degli studi di Genova, [www.dipteris.unige.it](http://www.dipteris.unige.it)

effettuata dall’Agenzia Spaziale Italiana. La scelta relativa alla stazione dell’Osservatorio meteorologico è motivata dalla vicinanza della stazione permanente GPS presso Istituto Idrografico della Marina, posta ad una distanza di circa 5.4 Km dall’aeroporto di Genova dal quale sono state effettuate le campagne di radiosondaggio del progetto MAP.

Un parametro spesso utilizzato nello studio dei processi atmosferici, utile a valutare il contenuto di vapore acqueo presente in una massa d’aria secca, è il già citato  $mr$ , definito come rapporto tra la massa di vapore acqueo (espressa in grammi) e la massa d’aria secca (espressa in chilogrammi) con la quale il vapore è mescolato nello stesso volume.

Infine l’integrale del *mixing ratio* sull’intero profilo atmosferico è legato al PWV, contenuto d’acqua precipitabile ottenuto tramite inversione delle osservazioni GPS, attraverso la seguente relazione:

$$PWV = \frac{1}{\rho_{Acqua}} \int_{h_{GPS}}^h mr \rho_{Aria\ secca} dh \quad [1]$$

dove le grandezze sono così espresse:  $[mr] = g/kg$ ,  $[\rho_{Acqua}] = g/m^3$ ,  $[\rho_{Aria\ secca}] = kg/m^3$ .

Analogamente si definisce il *mixing ratio* a saturazione come il rapporto tra il massimo quantitativo di vapore acqueo che la massa di aria secca può contenere a saturazione. Il rapporto tra  $mr$  e  $mrs$  fornisce l’umidità relativa.

Diverse sono le relazioni esistenti in letteratura che forniscono i valori di  $mr$  e  $mrs$  a partire dalle quantità osservate; nel presente lavoro si sono adottate le seguenti espressioni semplificate<sup>6</sup>:

$$mr = 621.97 \left( \frac{e}{P - e} \right) \quad [2] \quad e = 6.11 \times 10^{\frac{7.5Td}{237.7+Td}} \quad [4]$$

$$mrs = 621.97 \left( \frac{es}{P - es} \right) \quad [3] \quad es = 6.11 \times 10^{\frac{7.5T}{237.7+T}} \quad [5]$$

dove:  $e$  = pressione di vapore acqueo,  $es$  = pressione di vapore acqueo a saturazione,  $P$  = pressione,  $u$  = umidità relativa,  $T$  = temperatura,  $Td$  = temperatura di rugiada.

L’applicazione della [2] e della [3] per differenti altezze permette di valutare i profili di  $mr$  e  $mrs$ .

### Modelli per i profili di $mr$ e $mrs$

Si sono analizzati i profili di  $mr$  e  $mrs$  in differenti condizioni atmosferiche per individuare una relazione analitica che descriva con sufficiente approssimazione il comportamento degli strati atmosferici a basse quote in quanto di maggior interesse. Sono stati presi in considerazione un modello lineare a tratti ed uno esponenziale, quest’ultimo privilegiato in quanto meglio approssima le condizioni di pioggia intensa:

$$mr = a e^{bh} \quad [6]$$

dove  $a$  e  $b$  sono i parametri da determinarsi in funzione delle informazioni disponibili. Il parametro  $a$  rappresenta il valore del  $mr$  al suolo e si ottiene a partire dai dati dell’Osservatorio Meteorologico.

$$PWV = \frac{1}{\rho_{Acqua}} \int_{h_0}^h a e^{bh} \rho_{Aria\ secca} dh \quad [7]$$

<sup>6</sup>Fonte: NOAA, www.wrh.noaa.gov

Risolvendo l'integrale [7] dove l'estremo superiore è stato imposto pari a 10000m, mentre quello inferiore pari a 87 m, quota s.l.m.m. dell'antenna della Stazione Permanente GPS presso l'Istituto Idrografico della Marina è possibile ricavare il parametro  $b$  per iterazioni. Noti i valori di  $a$ ,  $b$  ed individuato il passo in quota secondo il quale valutare il modello (scelto pari a 10 metri), si ottiene il profilo di  $mr$ .

Si procede analogamente per il profilo del  $mrs$ :

$$mrs = a_s e^{b_s h} \quad [8]$$

Il parametro  $b_s$ , non può essere calcolato come per il caso precedente in quanto non si ha la corrispondente informazione a saturazione derivante dai dati GPS.

Si è deciso pertanto di imporre il profilo di  $mrs$  per quote superiori ai 3000 m pari a quello derivante da radiosondaggi in aree limitrofe. Questa scelta è valida sotto l'ipotesi di poter considerare stabile il profilo di  $mrs$  per quote elevate (superiori alle massime orografie delle montagne circostanti, dell'ordine appunto dei 3000 m), e pertanto sufficientemente rappresentativo di quello in studio. Il parametro  $b_s$  si valuta imponendo al modello i valori di  $mrs$  al suolo e alla quota di 3000 m.

Per i sei radiosondaggi a disposizione in differenti situazioni meteorologiche si sono applicati i modelli di  $mr$  e  $mrs$  che bene rappresentano i profili osservati.

### Previsione di eventi meteorologici significativi

Si sono individuate alcune giornate particolarmente significative in relazione alle situazioni meteorologiche per le quali si elencano le corrispondenze con i radiosondaggi a disposizione.

Eventi di pioggia particolarmente significativi:

- 15/9/99 alle ore 15:00 cadono 36,2 mm di pioggia,
- 25/10/99 alle ore 5:00 cadono 30,8 mm di pioggia,
- 3/11/99 alle ore 5:00 cadono 53,4 mm di pioggia.

Per ogni evento si sono avute a disposizione i profili osservati tramite radiosondaggi antecedenti e successivi le precipitazioni particolarmente utili sia per la validazione dei modelli analitici sopra descritti, che per confermare le condizioni di potenziale pioggia, segnalata dalla sovrapposizione dei profili di  $mr$  e  $mrs$ .

Per il giorno 3/11/99 le curve, riportate in figura 1, tendono a sovrapporsi sino a cinque ore antecedenti l'evento meteorologico osservato, che porterà alla caduta di ben 53.4 mm/h di pioggia. Anticipando ancora l'evento meteorico si è osservato come le curve si allontanano. Tali comportamenti sono evidenti anche nel confronto tra i modelli dei profili ottenuti tramite osservazioni meteo e GPS integrate.

Il generarsi di un evento piovoso è però un processo assai complesso che coinvolge differenti variabili. Si è proceduto pertanto ad un ulteriore confronto tra profilo da radiosondaggio e modelli esponenziali, per una quantificazione delle condizioni di saturazione (condizioni necessarie ma non sufficienti), valutando cioè il contenuto d'acqua precipitabile a saturazione relativo a quegli strati atmosferici per i quali si è verificata la coincidenza tra il profilo di *mixing ratio* e quello a saturazione. Il risultato è riportato in tabella 1.

Radiosondaggio	Modello esponenziale	Acqua precipitata
33 mm	36 mm	53 mm

Tabella 1 – Valutazione del contenuto d'acqua precipitabile a saturazione relativo all'evento del 3/11/99 alle ore 6:00

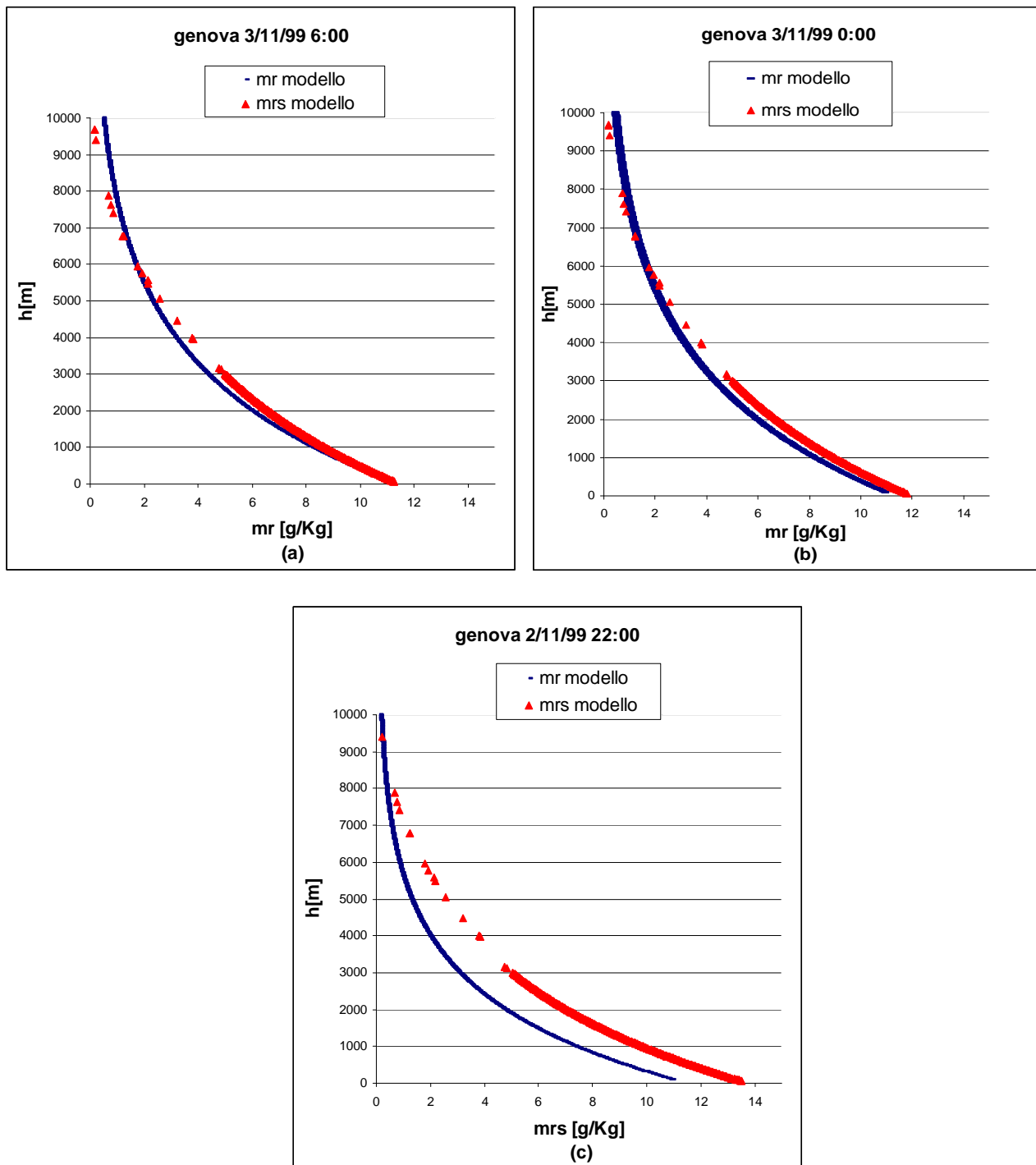


Figura 1 - Andamento dei profili di modello mixing ratio e mixing ratio a saturazione del 3/11/99 (a) durante l'evento (6:00), (b) e (c) rispettivamente 5 e 7 ore antecedenti

## Conclusioni

Molteplici sono gli studi presenti in letteratura relativi all'impiego delle misure GPS per la previsione di eventi meteorici significativi; in particolare si vuole ricordare Crespi et al. (1999, 2004) e Walpersdorf et al. (2005). La strategia revisionale si basa per lo più sull'analisi delle serie temporali del contenuto d'acqua precipitabile PWV derivato da osservazioni GPS. Nelle prove effettuate, relative al trimestre Settembre-Novembre 1999 per la città di Genova, si sono però rilevate alcune incongruenze con i valori di pioggia effettivamente osservati al suolo.

Il presente lavoro propone pertanto un confronto dei profili di *mixing ratio* e *mixing ratio a saturazione* ottenuti da radiosondaggi per evidenziare il verificarsi di una situazione meteorologica

particolarmente significativa. L'obiettivo è stato pertanto quello di valutare la possibilità di modellare tali andamenti sulla base di osservazioni GPS, di dati meteorologici al suolo e di eventuali profili di radiosondaggi disponibili in sito o che possano comunque fornire informazioni utili alla conoscenza degli strati atmosferici.

A tal fine si sono introdotti due differenti andamenti, uno lineare a tratti ed uno esponenziale; quest'ultimo risulta di più semplice impiego e meglio approssima gli eventi estremi. Come per il profilo di *mixing ratio*, anche quello a saturazione osservato tramite radiosondaggi, ha un andamento prevalentemente di tipo esponenziale.

I modelli realizzati sembrano restituire buoni risultati, con un comportamento tanto migliore quanto maggiori sono le intensità di pioggia. In situazioni opposte i profili, sebbene con andamento significativamente differente da quello esponenziale, risultano peraltro notevolmente distanziati, evidenziando l'assenza di pioggia.

Le prove effettuate in corrispondenza dell'evento meteorologico di maggiore intensità, verificatosi il 3/11/99, evidenziano una buona corrispondenza tra le curve di modello realizzate sino a cinque ore prima dell'evento, mentre anticipi ulteriori rilevano scostamenti tra i profili in accordo con quanto osservato dai radiosondaggi effettuati in sito nell'ambito del progetto Mesoscale Alpine Programme.

Sarà interessante valutare le potenzialità che tale metodo potrà avere se applicato a reti di Stazioni Permanenti GPS dislocate sul territorio con scala di bacino, tale da permettere stime dei gradienti orizzontali degli strati atmosferici secondo modelli semplificati; questo potrà essere di particolare interesse per il monitoraggio di bacini idrici particolarmente significativi ritenuti a rischio.

### **Ringraziamenti**

Si ringrazia ARPA-Liguria nelle persone di Elisabetta Trovatore, Veronica Bonati, Laura Pedemonte.

Si ringraziano inoltre i dipartimenti DIPTERIS e DIFI dell'Università degli Studi di Genova, ed in particolare la Sig.ra Francesca Guercio Skara e il Prof. Corrado Ratto per l'importante contributo relativo alle campagne di misure meteorologiche.

Un particolare ringraziamento va al Dott. Federico Cassola per i preziosi suggerimenti forniti sulle tematiche atmosferiche.

### **Bibliografia**

Crespi M., Di Paola S., Guercio R., *Il contributo del GPS nell'interpretazione di eventi meteorici rilevanti:primi risultati*, Asita, Napoli, 1999- Volume I.

Crespi M., Luzietti L., Frattali Mascioli F. M., Rizzi A., *Impiego meteorologico del GPS per la previsione di precipitazioni critiche*, Asita, Roma, 2004 – Volume I.

Walpersdorf A., *State of the art of GPS geodesy in*, 2005.