

Studio della quota di volo mediante GNSS, altimetro radar e barometro per rilievi di spettroscopia gamma da velivolo

Albéri Matteo ^{(a),(b)}, Baldoncini Marica ^{(a),(b)}, Callegari Ivan ^(c), Mantovani Fabio ^{(a),(b)}, Raptis
Kassandra Giulia Cristina ^(a), Realini Eugenio ^(d), Reguzzoni Mirko ^(e), Rossi Lorenzo ^(e),
Sampietro Daniele ^(d), Strati Virginia ^(f).

^(a) Università di Ferrara, Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Via Saragat 1, 44121 - Ferrara, Italia.

^(b) Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, sezione di Ferrara, Via Saragat 1, 44121 - Ferrara, Italia.

^(c) Department of Applied Geosciences, German University of Technology in Oman, GUtech, P.O. Box 1816, -
Athaibah, PC 130, Sultanate of Oman.

^(d) Geomatics Research & Development (GReD) srl, Via Cavour 2, 22074 - Lomazzo (CO), Italia.

^(e) Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA), Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133
- Milano, Italia.

^(f) Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Legnaro, Viale dell'Università 2, 35020 - Legnaro
(PD), Italia.

Riassunto

Lo studio della distribuzione dei radionuclidi terrestri (^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K) realizzato mediante tecniche di spettroscopia gamma da velivolo è influenzato dalla quota a cui il rivelatore si trova rispetto al suolo. Un'incertezza del 10% a 100 m di altezza origina un errore nella stima del segnale gamma del ^{208}Tl , appartenente alla catena di decadimenti del ^{232}Th , dell'ordine del 7%. L'impiego di una nuova classe di spettrometri montati a bordo di UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) per raffinate misure in contesti ostili o remoti rende necessaria un'accurata stima in *real time* della quota di volo.

Il Radgyro è un velivolo dedicato a *survey* multiparametrici, capace di trasportare strumentazione pari ad un *payload* massimo di 120 kg, tra cui quattro spettrometri gamma NaI(Tl). Una stazione inerziale con ricevitore integrato GNSS (*Global Navigation Satellite System*) restituisce l'assetto del velivolo con una frequenza massima di 400 Hz. Il velivolo è dotato di un *network* di tre ricevitori GNSS posizionati alle estremità della carena del velivolo. Un altimetro radar a 24 GHz rileva la quota con una frequenza di 60 Hz. La misura di pressione e temperatura consente di ricavare la quota barometrica a 2 Hz.

Con l'obiettivo di studiare le incertezze associate alle misure della quota di volo acquisite dagli altimetri in relazione ai dati GNSS, sono stati realizzati tre voli sul mare in un *range* di altezze comprese tra 31 m e 249 m, per un totale di 4702 secondi di volo effettivo. Al termine dello studio è possibile concludere che l'errore complessivo delle abbondanze di K, U e Th aumenta di 7.7%, 0.5% e 2.7% rispettivamente, a causa delle incertezze della quota di volo.

Abstract

The study of the distribution of the terrestrial radionuclides (^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K), performed by using airborne gamma-ray spectroscopy techniques, is influenced by the height of the detector with respect to the ground. An uncertainty of 10% at a flight height of 100 m originates an estimation error of the order of 7% in ^{208}Tl gamma signal, a daughter isotope of the ^{232}Th decay chain. The use of a new class of spectrometers mounted on board of UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), for refined measurements in hostile places and boondocks, necessitates an accurate real-time estimation of the flight height.

The Radgyro is an aircraft dedicated to multiparameter surveys and it is able to carry a set of instruments for a maximum payload of 120 kg, among which four NaI(Tl) gamma-ray spectrometers. An inertial station with an integrated GNSS (*Global Navigation Satellite System*)

receiver provides the aircraft trim with a maximum frequency of 400 Hz. The aircraft is equipped with a network of three GNSS receivers positioned on the extremities of the hull of aircraft. A 24 Ghz radar altimeter detects the height with a frequency of 60 Hz. The measurement of pressure and temperature permit to infer the barometric height at 2 Hz.

With the aim to study the uncertainties related to the flight height through the measurements acquired by the altimeters in comparison with the GNSS data, three flights were performed on the sea with a flight height range of 31-249 m, for a total time of 4702 seconds of effective flight.

At the end of this study, we can affirm that the abundances error of K, U and Th increases of the 7.7%, 0.5% and 2.7% respectively, as a result of uncertainties related to the flight altitude.

Motivazioni scientifiche

La spettroscopia gamma da aereo, *Airborne Gamma-Ray Spectrometry* (AGRS), è un metodo di *remote sensing* che consente di quantificare le concentrazioni dei principali radioisotopi naturali (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th) ed artificiali (e.g. ^{137}Cs) presenti nei primi decimetri del suolo. Lo studio della distribuzione spaziale di questi radionuclidi permette di monitorare la radioattività ambientale (Callegari et al. 2013, Strati et al. 2014), realizzare mappe di interesse geochimico (Xhixha et al., 2015) e studiare il *fallout* nucleare (Saito et al., 2014) o la presenza di sorgenti radioattive orfane.

La radiazione gamma misurata da rivelatori a scintillazione (tipicamente ioduri di sodio attivati al tallio NaI(Tl)) produce segnali di corrente che vengono processati da un'elettronica di *readout* il cui output permette di costruire uno spettro continuo di energia. Nell'ultimo decennio, il miglioramento delle tecniche d'analisi spettrale ha consentito non solo di identificare i radionuclidi con elevata accuratezza (Caciolli et al., 2012), ma anche di ottenere risposte in *real-time* (Kock et al. 2012). L'avvento dei velivoli UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) sta dando ulteriore impulso ai metodi AGRS, in settori nuovi come l'agricoltura di precisione o il monitoraggio di emergenze nucleari. La possibilità di misurare la radioattività impiegando UAV in situazioni caratterizzate da un elevato pericolo per la vita umana, ha stimolato lo sviluppo di prototipi dotati di rivelatori CdZnTe (tellururo di cadmio zinco) (Martin et. al, 2015).

Le linee guida dell'IAEA (*International Atomic Energy Agency*) suggeriscono di compiere rilievi ad una velocità di crociera di circa 100 km/h ad un'altezza di volo 100 m rispetto al suolo (IAEA, 2003). Assumendo di sorvolare una zona pianeggiante, circa il 90% del segnale è prodotto dai radionuclidi presenti nel suolo in un raggio di circa 250 m: pertanto, in un'ora di volo è possibile investigare una superficie di circa 50 km².

Nel caso dell'uso di UAV questi parametri sono differenti dal momento che i rivelatori sono più leggeri e meno efficienti; per queste ragioni vengono effettuati voli radenti (tipicamente ad altezze dell'ordine di 1-5 m) a velocità inferiori (3.6 km/h) per acquisire un segnale con maggiore significatività statistica. In questo caso la determinazione precisa della quota è cruciale ed è affidata ad altimetri laser con un'accuratezza di 10 mm a 30 m d'altezza dal suolo. (Martin et. al, 2015).

Lo sviluppo tecnologico degli UAV permetterà in futuro capacità di carico sempre maggiori e la possibilità di trasportare rivelatori dotati di maggior ingombro e volume. In questo contesto, la necessità di condurre un'analisi *real-time* nell'ottica di un intervento rapido rende necessaria un'accurata stima della quota di volo, non solo per ragioni di navigazione, ma anche per le ripercussioni che ha l'incertezza altimetrica sull'accuratezza delle misure di spettroscopia gamma.

Se escludiamo possibili incertezze dovute alla calibrazioni, la principale sorgente di errore nella spettroscopia gamma è legata alla statistica di acquisizione (IAEA, 2003). Per un'acquisizione effettuata con un rivelatore NaI(Tl) da 33 litri a 100 m d'altezza e considerando le concentrazioni tipiche di radioisotopi della crosta terrestre (2% K, 2.5 ppm di U, 9 ppm di Th), i valori tipici dei *rate* di conteggi in cps (*counts per second*) e gli errori percentuali associati (σ) di tipo poissoniano sono: 253.7 cps ($\sigma = 3\%$) per K, 66.3 cps ($\sigma = 12.3\%$) per U e 53.5 cps per il Th ($\sigma = 13.7\%$) (IAEA 2003).

Un'altra importante fonte d'incertezza delle misure risiede nel *background* dovuto a quattro differenti sorgenti: la radiazione cosmica, il radon atmosferico (che influenza principalmente la

misura dell'uranio), la radioattività intrinseca del rivelatore e quella del velivolo; tali contributi devono essere opportunamente quantificati e sottratti. In seguito a quest'analisi, in condizioni di concentrazioni medio-alte di radon atmosferico (36 cps dei conteggi della finestra dell'uranio), le incertezze percentuali sulle concentrazioni raggiungono i valori tipici di 10.4% per K, 58% per U e 16.1% per Th (IAEA, 2003).

In fase di analisi dati bisogna tener conto inoltre che la radiazione gamma emessa dai radionuclidi presenti nel suolo subisce un'attenuazione dovuta all'interazione con la materia. A seguito di ciò, nelle misure di spettroscopia gamma *airborne* è necessario applicare una correzione che prenda in considerazione la morfologia del territorio e la quota di volo:

$$N = N_0 e^{-\mu z} \quad [1]$$

dove μ è il coefficiente di attenuazione lineare (in metri) per un dato intervallo di energia, N_0 il *rate* di conteggi (in cps) alla quota di riferimento z , ovvero la quota del velivolo rispetto al suolo.

Per quantificare l'effetto dell'incertezza sulla quota nella stima delle abbondanze dei radionuclidi a terra è necessario propagare le incertezze sulle misure della quota e sulle misure associate ai conteggi spettrali. Gli effetti dell'incertezza statistica delle misure delle abbondanze riportate a terra sono date dalla seguente equazione:

$$\left(\frac{a_t}{a_v}\right)^2 = \left(\frac{a_v}{a_v}\right)^2 + \left(\frac{\mu z}{z}\right)^2 \quad [2]$$

dove a_t e a_v rappresentano rispettivamente l'abbondanza del radionuclide calcolata a terra e in volo, a_t e a_v sono gli errori assoluti, μ è il coefficiente di attenuazione lineare e z rappresenta l'incertezza assoluta sulla quota.

Con l'obiettivo di studiare l'effetto delle incertezze della quota sulla determinazione delle abbondanze a terra, sono stati realizzati tre voli sul mare. Senza alcun *post-processing* si intende confrontare i valori di quota acquisiti dai diversi sensori, senza l'impiego del modello di elevazione digitale (DEM) e trascurando le variazioni mareali e del moto ondoso dell'area sorvolata (< 0.4 m) (Florent Lyard et al., 2006).

Strumenti e metodi

Il velivolo utilizzato per il rilievo è denominato Radgyro, un autogiro sperimentale dedicato a misure di geofisica multiparametriche *airborne* (Tufarolo et al., 2014). A bordo del Radgyro è installata una rete di sensori in grado di rilevare le onde elettromagnetiche provenienti dal terreno nei seguenti *range* spettrali: 13000 - 7500 nm (termico infrarosso), 1000 - 400 nm (vicino infrarosso), 750 - 380 nm (visibile), $3 \cdot 10^{-3}$ - $4 \cdot 10^{-4}$ nm (gamma). Durante i sorvoli la posizione del Radgyro viene acquisita attraverso una coppia di antenne GPS e da un sistema di navigazione inerziale. Per la stima della quota di volo il Radgyro è dotato inoltre di un radar altimetro e di un sensore di pressione e temperatura.

Il Radgyro ha una lunghezza di 5.20 m, un *mast* di 2 m ed un rotore in alluminio di 8.5 m. Il propulsore ad elica è alimentato da un motore turbo benzina da 120 Cv. L'autogiro è dotato di un serbatoio in grado di contenere 75 litri di carburante ed ha una capacità complessiva di carico di 130 kg, per un'autonomia di volo di circa 3 ore. La fusoliera è stata opportunamente modificata per ospitare nella carlinga la strumentazione scientifica, ad eccezione delle fotocamere e del sistema di posizionamento inerziali, i quali sono installati in due vani aerodinamici paralleli alla fusoliera.

All'interno del vano principale del velivolo è alloggiata la strumentazione dedicata alle misure di spettroscopia gamma, costituita da quattro scintillatori a ioduro di sodio NaI(Tl), ognuno di dimensioni pari a 10 cm × 10 cm × 40 cm, per un volume totale di circa 16 litri (Guastaldi et al.,

2013). I rivelatori sono disposti longitudinalmente al velivolo uno accanto all'altro ed ognuno di essi è accoppiato ad un fotomoltiplicatore, orientato nella stessa direzione. Il sistema è inoltre dotato di uno scintillatore NaI(Tl) di forma cubica avente volume pari a 1 litro, alloggiato sul piano alveolare superiore, grazie al quale è possibile monitorare la presenza di radon atmosferico. I fotomoltiplicatori di ciascun rivelatore sono alimentati a 12V attraverso una *Power Unit* e sono gestiti da un digitalizzatore multicanale a integrazione di carica che permette l'acquisizione dei segnali evento per evento. L'elettronica è a sua volta interfacciata via USB al computer che acquisisce simultaneamente i dati provenienti dai vari sensori.

Sul velivolo sono presenti tre tipologie di altimetri (GNSS, altimetro radar, sensore di pressione e temperatura), ognuno caratterizzato da differenti caratteristiche tecniche e prestazioni.

Il sistema di acquisizione GNSS è costituito da tre ricevitori *u-blox EVK-6* a singola frequenza. Le antenne GPS, denominate GPS18 e GPS19, sono posizionate sulle alette d'estremità del piano di coda mentre l'antenna denominata GPS17 si trova all'interno della cabina del velivolo. In fase di acquisizione vengono prodotti per ogni antenna due file ASCII contenenti rispettivamente le informazioni temporali (tempo GPS e tempo del computer) e le informazioni di posizionamento nel formato NMEA GGA. La frequenza di campionamento dei dati temporali e di posizionamento è di 1Hz.

Nel vano laterale di destra è alloggiata la stazione inerziale *MTi-G-700 GPS/INS* (IMU) grazie alla quale è possibile monitorare l'assetto del velivolo durante il sorvolo. Lo strumento è dotato di un ricevitore GNSS che acquisisce il segnale GPS con una frequenza massima di 4 Hz, mentre gli angoli di rollio, beccheggio e imbardata, vengono registrati con una frequenza massima di 400 Hz.

Sotto la carlinga del velivolo è posizionato il radar altimetro *Smartmicro® Micro Radar Altimeter* in grado di misurare la quota di volo rispetto al suolo in un *range* compreso tra 0.5 m e 500 m. Tale strumento utilizza un sensore radar che emette alla frequenza di 24 GHz che stima la minima distanza in un cono di apertura di circa 20°. I dati di elevazione vengono acquisiti ad una frequenza di circa 60 Hz. L'accuratezza sulla misura altimetrica è del 3% con un valore massimo di 0.5 m.

All'interno dell'autogiro è alloggiato il sensore di pressione e temperatura *Toradex Oak USB Sensor Atmospheric Pressure* utilizzato per la stima dell'altezza barometrica del velivolo.

Il sensore è interfacciato ed alimentato con il computer di bordo via USB, ha una risoluzione di 10 Pa ed un'accuratezza di ± 2 °C. Per la stima dell'altezza viene adottata la formula ipsometrica che tiene conto della variazione di temperatura atmosferica:

$$z_{PT} = \frac{T_o}{L} \left[\frac{P}{P_0} \right]^{\frac{LR}{g}} - 1 \quad [3]$$

dove g è l'accelerazione di gravità in m/s^2 , R è la costante dei gas perfetti in $J/(kg K)$, T_0 e P_0 rispettivamente la temperatura (in K) e la pressione (in Pa) al livello del mare ed L è il *lapse rate*, ovvero il tasso di incremento di temperatura nell'atmosfera pari a $-6.5 K / km$.

Descrizione del rilievo

Sono stati effettuati tre voli tra Forte dei Marmi (LU) e Marina di Pisa (PI), per un tempo complessivo di circa 3h. L'aviosuperficie di partenza è situata a Viareggio (LU) (43°50'46.5"N 10°16'18.1"E, 2 m s.l.m.). I dati analizzati nel presente lavoro fanno riferimento ai 4702 secondi di sorvolo sul mare in un *range* di altezze comprese tra 31 m e 249 m. In Figura 1 sono illustrate le traiettorie dei tre voli, identificati come volo 11, volo 12 e volo 15, dove per ciascuna traiettoria sono mostrati esclusivamente i punti che rispondono ai criteri di selezione sopra citati. In Tabella 1 sono riassunti i principali parametri dei tre voli.

Tabella 1 - Quadro riassuntivo delle principali caratteristiche dei tre sorvoli sul mare. Nella prima colonna è riportato il codice identificativo del volo, nella seconda colonna la data in cui il volo è stato realizzato, nella terza colonna l'orario (CEST) di inizio e fine acquisizione dati per ciascun volo, nella quarta e quinta colonna rispettivamente la quota minima e la quota massima di sorvolo, nella sesta colonna il tempo effettivo di acquisizione per ciascun volo, nella settima colonna la massima velocità verticale registrata per ogni volo, nell'ottava e nona colonna rispettivamente la pressione in Pa e la temperatura in K al momento del decollo.

ID	Data	Orario	H min [m]	H max [m]	Tempo di acquisizione [s]	Max v vert [m/s]	P ₀ [Pa]	T ₀ [K]
11	30/03/16	17:42:10	75	249	2816	4.9	101568	291
		18:29:06						
12	31/03/16	18:13:55	126	235	1150	4.9	100925	294
		18:33:12						
15	05/04/16	19:15:19	31	62	736	2.3	100653	293
		19:27:39						

Analisi

I dati acquisiti separatamente dai vari strumenti sono stati allineati temporalmente in base al riferimento comune dato dal *time stamp* del computer di bordo e sono stati analizzati in modo tale da produrre, per ciascun sensore, un valore di quota con una risoluzione temporale di 1 secondo.

Il radar altimetro e il sensore di pressione e temperatura producono un output che utilizza un sistema di riferimento temporale relativo, avente come zero l'istante in cui l'acquisizione dello specifico sensore è stata avviata. Per questo motivo è stato necessario utilizzare uno script che permettesse di salvare il tempo di avvio di ognuno dei due strumenti al fine di determinare l'orario assoluto di ciascuna lettura, necessario per la sincronizzazione dell'intero *dataset*. Considerando inoltre che i due sensori hanno frequenze di campionamento rispettivamente di 60 Hz per l'altimetro e 2 Hz per il sensore di pressione e temperatura, il singolo valore di quota è stato ottenuto mediando le letture registrate entro 1 secondo rispetto al baricentro temporale dell'acquisizione.

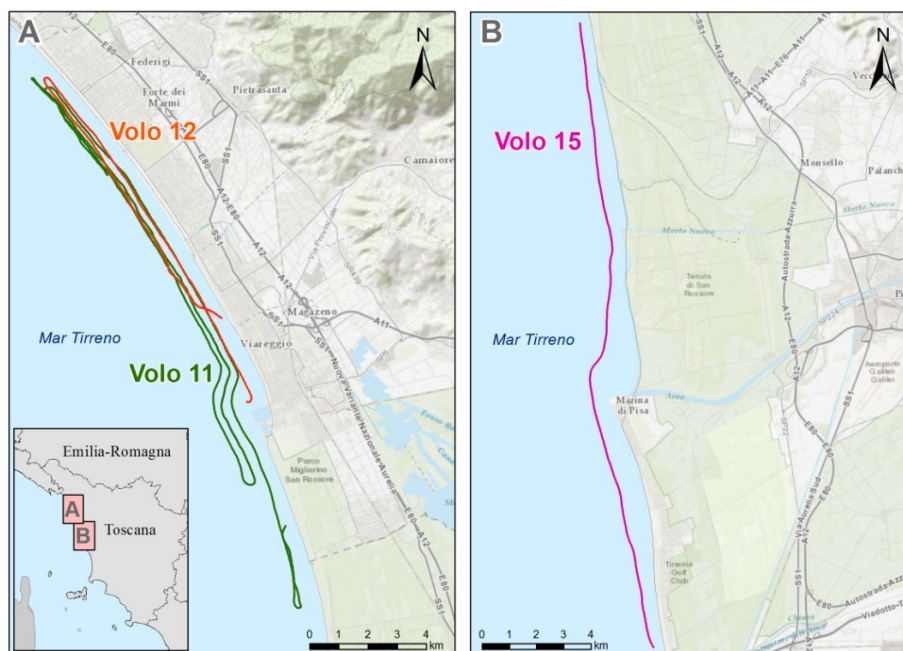


Figura 1 - Nel pannello A sono riportate le traiettorie dei voli 11 e 12, realizzati sorvolando la zona costiera tra Viareggio (LU) e Forte dei Marmi (LU), nel pannello B è riportata la traiettoria del volo 15 realizzato sorvolando la zona costiera in prossimità di Marina di Pisa (PI).

Per quanto riguarda i ricevitori GNSS, le antenne GPS17, GPS18 e GPS19 forniscono i valori di quota che entrano direttamente nel *dataset*, dal momento che la posizione, unitamente all'orario assoluto del computer sono registrati con una frequenza di 1 Hz. I dati forniti dal ricevitore GNSS del sistema di posizionamento inerziale vanno invece allineati conoscendo lo scarto temporale esistente tra l'orario del computer di bordo e l'orario UTC, nonché mediati secondo la procedura precedentemente descritta, considerando la specifica frequenza di campionamento di 4 Hz. Una volta allineati temporalmente tutti i dati altimetrici con risoluzione temporale di 1 secondo sono state effettuate le correlazioni lineari per ogni coppia di strumenti e le distribuzioni delle differenze assolute. I dati dell'antenna GPS17 non sono presenti a causa di un guasto del ricevitore.

Tabella 2 - Per ogni volo e per ogni coppia di sensori sono riportati i valori delle pendenze m e delle intercette q (in m) delle regressioni lineari con le relative incertezze, il valore del coefficiente r^2 di regressione lineare, la discrepanza media M e la deviazione standard σ dei valori stimati di quota in m . Ai GNSS u-blox EVK-6 utilizzati è stato assegnato l'ID "GPS18" e "GPS19", il GNSS del MTi-G-700 GPS/INS IMU ha l'ID "GNSS IMU", mentre l'altimetro e il sensore di pressione e temperatura hanno rispettivamente l'ID "ALT" e "P T".

	VOLO 11				VOLO 12				VOLO 15			
	GPS18	GNSS IMU	ALT	P T	GPS18	GNSS IMU	ALT	P T	GPS18	GNSS IMU	ALT	P T
GPS 19	m = 0.989 q = 0.73 dm = 0.001 dq = 0.15 r ² = 0.997 M = -0.9 σ = 2.1	m = 1.005 q = -1.06 dm = 0.001 dq = 0.16 r ² = 0.997 M = -0.4 σ = 2.2	m = 1.013 q = -2.27 dm = 0.001 dq = 0.12 r ² = 0.998 M = -0.4 σ = 1.8	m = 1.020 q = 2.42 dm = 0.001 dq = 0.18 r ² = 0.997 M = 5.5 σ = 2.6	m = 0.933 q = 12.7 dm = 0.002 dq = 0.4 r ² = 0.995 M = 1.2 σ = 2.9	m = 0.972 q = 6.2 dm = 0.002 dq = 0.3 r ² = 0.996 M = 1.4 σ = 2.1	m = 0.943 q = 9.9 dm = 0.002 dq = 0.4 r ² = 0.995 M = 0.1 σ = 2.7	m = 0.965 q = 13.1 dm = 0.002 dq = 0.4 r ² = 0.995 M = 7.0 σ = 2.3	m = 1.127 q = -7.5 dm = 0.007 dq = 0.3 r ² = 0.976 M = -1.0 σ = 1.9	m = 0.985 q = 7.4 dm = 0.006 dq = 0.3 r ² = 0.971 M = 6.6 σ = 1.4	m = 1.035 q = -4.3 dm = 0.004 dq = 0.2 r ² = 0.987 M = -2.5 σ = 1.1	m = 0.960 q = 26.2 dm = 0.008 dq = 0.4 r ² = 0.956 M = 24.2 σ = 1.8
GPS 18	/	m = 1.014 q = -1.57 dm = 0.001 dq = 0.17 r ² = 0.997 M = 0.5 σ = 2.4	m = 1.022 q = -2.84 dm = 0.001 dq = 0.11 r ² = 0.999 M = 0.5 σ = 1.8	m = 1.029 q = 1.97 dm = 0.001 dq = 0.21 r ² = 0.995 M = 6.4 σ = 3.2	/	m = 1.04 q = -6.5 dm = 0.002 dq = 0.4 r ² = 0.994 M = 0.2 σ = 2.5	m = 1.006 q = -2.1 dm = 0.003 dq = 0.5 r ² = 0.990 M = -1.1 σ = 2.8	m = 1.030 q = 0.6 dm = 0.003 dq = 0.5 r ² = 0.993 M = 5.8 σ = 2.6	/	m = 0.864 q = 14.4 dm = 0.005 dq = 0.3 r ² = 0.972 M = 7.6 σ = 1.9	m = 0.905 q = 3.2 dm = 0.005 dq = 0.2 r ² = 0.981 M = -1.6 σ = 1.5	m = 0.845 q = 33.0 dm = 0.006 dq = 0.3 r ² = 0.964 M = 25.2 σ = 2.2
IMU	/	/	m = 1.006 q = -0.87 dm = 0.001 dq = 0.17 r ² = 0.997 M = 0.0 σ = 2.3	m = 1.014 q = 3.71 dm = 0.001 dq = 0.18 r ² = 0.997 M = 5.8 σ = 2.5	/	/	m = 0.966 q = 4.5 dm = 0.003 dq = 0.5 r ² = 0.992 M = -1.3 σ = 2.8	m = 0.992 q = 7.0 dm = 0.001 dq = 0.2 r ² = 0.998 M = 5.6 σ = 1.2	/	/	m = 1.024 q = -10.5 dm = 0.007 dq = 0.4 r ² = 0.964 M = -9.2 σ = 1.7	m = 0.976 q = 19.0 dm = 0.004 dq = 0.2 r ² = 0.987 M = 17.6 σ = 1.0
ALT	/	/	/	m = 1.007 q = 4.8 dm = 0.001 dq = 0.17 r ² = 0.997 M = 5.8 σ = 2.4	/	/	/	m = 1.018 q = 3.9 dm = 0.003 dq = 0.5 r ² = 0.990 M = 6.9 σ = 3	/	/	/	m = 0.919 q = 30.7 dm = 0.008 dq = 0.4 r ² = 0.951 M = 26.7 σ = 2.0

Risultati

Nella Tabella 2 sono mostrati i coefficienti angolari (m), le intercette (q) in metri ed il coefficiente di correlazione di Pearson (r^2) con relativo errore; vengono inoltre tabulate la media (M) e la deviazione standard (σ) in metri della distribuzione delle differenze assolute delle quote restituite dai vari strumenti.

L'analisi evidenzia una correlazione forte tra i valori delle quote; le distribuzioni delle differenze assolute hanno un andamento gaussiano che ci porta a dedurre che esiste un errore sistematico assoluto sulle misure. Il sensore di pressione e temperatura è lo strumento che presenta le differenze più alte pur mantenendo una forte correlazione. La ragione è riconducibile ad una variazione delle condizioni atmosferiche verificatasi nel susseguirsi dei giorni, in particolare durante il volo 15 dove si registrano le differenze più grandi (dell'ordine dei 20 m) probabilmente a causa di un fronte di bassa pressione che ha prodotto una sovrastima nel calcolo dell'altezza ipsometrica (vedi equazione 3). La distribuzione delle velocità verticali è stata ottenuta studiando la variazione della quota prodotta dall'altimetro radar ed ha un valore massimo di 4.9 m/s come si può evincere dalla Figura 2 - Nei pannelli a), b) e c) è illustrato l'andamento dell'errore percentuale rispettivamente sulla stima delle concentrazioni di Potassio (K), Uranio (U) e Torio in funzione dell'errore assoluto sulla quota σ_H . Nel pannello d) è illustrato l'istogramma delle frequenze percentuali delle velocità verticali, riferito al tempo effettivo di acquisizione di 4702 secondi. **L'origine riferimento non è stata trovata.**

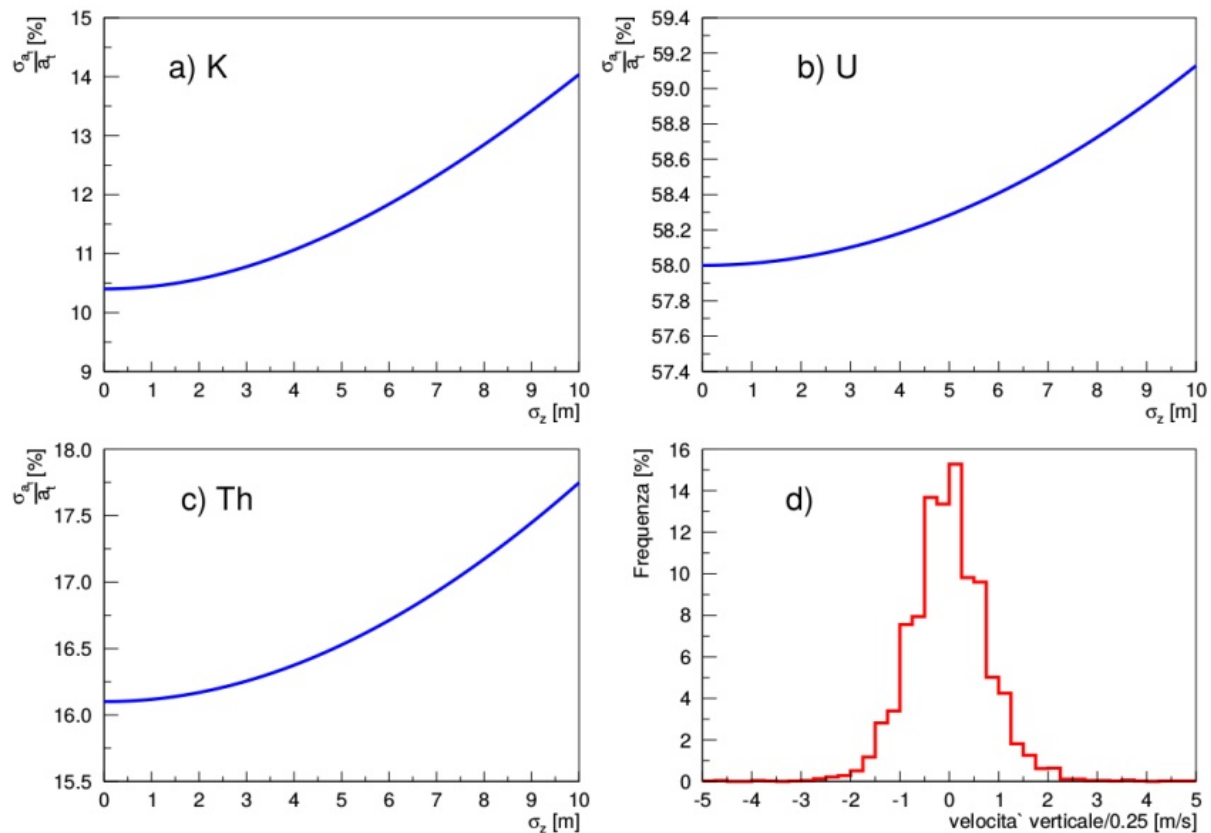


Figura 2 – Nei pannelli a), b) e c) è illustrato l'andamento dell'errore percentuale rispettivamente sulla stima delle concentrazioni di Potassio (K), Uranio (U) e Torio in funzione dell'errore assoluto sulla quota σ_H . Nel pannello d) è illustrato l'istogramma delle frequenze percentuali delle velocità verticali, riferito al tempo effettivo di acquisizione di 4702 secondi.

Conclusioni

In questo studio sono state confrontate le misure della quota di un velivolo durante 3 diversi voli sul mare per un totale di 4702 secondi, in un *range* di altezze comprese tra 31 m e 249 m. Cinque diversi *dataset* di dati con risoluzione temporale di 1 Hz ottenuti da 3 ricevitori GNSS, un altimetro radar ed un altimetro barometrico sono stati analizzati con l'obiettivo di capire quanto le incertezze sistematiche e statistiche dei sensori, senza alcun *post-processing*, possano influire sulle misure di abbondanza di radionuclidi presenti nel suolo ottenute da acquisizioni di spettroscopia gamma.

In questa fase preliminare l'analisi dei dati ottenuti dai ricevitori GNSS si è limitata alle sole stringhe NMEA. Nello studio delle regressioni lineari gli ottimi coefficienti di correlazione di Pearson segnalano una scarsa erraticità dei dati, raggiunta probabilmente grazie ai filtri implementati a bordo dell'EVK-6. Tuttavia i coefficienti angolari (m) e le intercette (q) non sono compatibili, a livello di 1σ , con i valori attesi di perfetta correlazione, ovvero $m=1$ e $q=0$. Ciò evidenzia la necessità di un *post-processing* che miri a correggere soprattutto le incertezze sistematiche. La distribuzione di tutte le differenze relative delle misure delle quote realizzate con i 3 sensori GNSS nei 3 voli presenta una deviazione standard di 3.2 m. In prospettiva questa incertezza va studiata tenendo conto della distanza dei ricevitori a bordo del velivolo, possibilmente dopo un'elaborazione delle differenze doppie di codice e fase per ciascun ricevitore rispetto ad alcune stazioni fisse.

Le incertezze associate alla quota media (141 m) e mediana (143 m) di volo ottenute dall'altimetro radar sono rispettivamente 4.2 e 4.3 m. Lo studio della correlazione lineare tra le quote acquisite con l'altimetro barometrico rispetto agli altri sensori mostra coefficienti di Pearson molto buoni, a conferma che le fluttuazioni statistiche contribuiscono marginalmente all'accuratezza della misura. Lo studio delle distribuzioni delle deviazioni standard ha mostrato una forte dipendenza dalle condizioni meteo in cui si è effettuato il singolo volo, i valori medi delle deviazioni standard variano in un *range* da 2.5 m a 4.4 m. In prospettiva è possibile correggere queste incertezze sistematiche utilizzando informazioni provenienti da sensori GNSS e altimetro radar.

Al termine di questo studio, propagando conservativamente un'incertezza della quota di 4.4 m sul calcolo del contenuto di radionuclidi nel suolo (vedi Figura 2 – Nei pannelli a), b) e c) è illustrato l'andamento dell'errore percentuale rispettivamente sulla stima delle concentrazioni di Potassio (K), Uranio (U) e Torio in funzione dell'errore assoluto sulla quota σ_H . Nel pannello d è illustrato l'istogramma delle frequenze percentuali delle velocità verticali, riferito al tempo effettivo di acquisizione di 4702 secondi., considerando una quota di volo standard di 100 m per le misure di spettroscopia gamma *airborne* (IAEA, 2003), siamo in grado di affermare che l'errore complessivo del valore delle abbondanze di K, U e Th subisce un incremento rispettivamente del 7.7%, 0.5% e 2.7%.

Evidenziamo, in conclusione, che le misure sono accomunate tutte da una bassa erraticità a testimonianza del fatto che i maggiori sforzi futuri per un ulteriore raffinamento vanno compiuti in fase di *post-processing* per studiare gli errori sistematici. I risultati ottenuti in questo lavoro ci permettono comunque di affermare che nel caso di analisi in *real-time*, dove non è possibile effettuare *post-processing*, gli errori dovuti alla quota risultano trascurabili per le analisi di spettroscopia gamma *airborne*.

Bibliografia

- Caciolli A, Baldoncini M, Bezzon GP, Broggin C, Buso GP, Callegari I, Colonna T, Fiorentini G, Guastaldi E, Mantovani F, Massa G, Menegazzo R, Mou L, Rossi Alvarez C, Shyti M, Zanon A, Xhixha G (2012), "A new FSA approach for in situ γ ray spectroscopy", *Science of The Total Environment*, 414(0): 639-645.
- Callegari I, Bezzon GP, Broggin C, Buso GP, Caciolli A, Carmignani L, Colonna T, Fiorentini G, Guastaldi E, Kaçeli Xhixha M, Mantovani F, Massa G, Menegazzo R, Mou L, Pirro A, Rossi Alvarez C, Strati V, Xhixhad G, Zanon A (2013), "Total natural radioactivity, Tuscany, Italy", *Journal of Maps*, 9(3): 438-443.
- Lyard F, Lefevre F, Letellier T, Francis O (2006), "Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004", *Ocean Dynamics*, 56: 394-415.
- Guastaldi E, Baldoncini M, Bezzon GP, Broggin C, Buso GC, Caciolli A, Carmignani L, Callegari I, Colonna T, Dule K, Fiorentini G, Kaçeli Xhixha M, Mantovani F, Massa G, Menegazzo R, Mou L, Rossi Alvarez C, Strati V, Xhixha G, Zanon A (2013), "A Multivariate Spatial Interpolation of Airborne γ -Ray Data Using the Geological Constraints", *Remote Sensing of Environment*, 137 (October): 1-11.
- IAEA (2003), "Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data", *IAEA-TECDOC-1363*.
- Kock P, Rääf C, Samuelsson C (2014), "On Background Radiation Gradients - the Use of Airborne Surveys When Searching for Orphan Sources Using Mobile Gamma-Ray Spectrometry", *Journal of Environmental Radioactivity*, 128: 84-90.
- Martin PG, Payton OD, Fardoulis JS, Richards DA, Scott TB (2015), "The use of unmanned aerial systems for the mapping of legacy uranium mines", *Journal of Environmental Radioactivity*, 143:135-140.

Saito T, Kurihara Y, Koike Y, Tanihata I, Fujiwara M, Sakaguchi H, Shinohara A, Yamamoto H (2014), "Altitude distribution of radioactive cesium at Fuji volcano caused by Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 303(2): 1613-1615.

Strati V, Baldoncini M, Bezzon GP, Broggin C, Buso GP, Caciolli A, Callegari I, Carmignani L, Colonna T, Fiorentini G, Guastaldi E, Kaçeli Xhixha M, Mantovani F, Menegazzo R, Mou L, Rossi Alvarez C, Xhixha G, Zanon A (2015), "Total natural radioactivity, Veneto (Italy)", *Journal of Maps*, 11(4): 545-551.

Kaçeli Xhixha M, Albéri M, Baldoncini M, Bezzon GP, Buso GP, Callegari I, Casini L, Cuccuru S, Fiorentini G, Guastaldi E, Mantovani F, Mou L, Oggiano G, Puccini A, Rossi Alvarez C, Strati V, Xhixha G, Zanon A (2015), "Uranium distribution in the Variscan Basement of Northeastern Sardinia", *Journal of Maps*: 1-8.