

APPLICAZIONI GEOMATICHE

Luigi Mussio
Politecnico di Milano – DICA
Piazza L. da Vinci, 32 – 20133 Milano
Tel. 02-2399-6501, Fax. 02-2399-6602
e-mail luigi.mussio@polimi.it

RIASSUNTO

Particolare attenzione è rivolta a metodologie e procedure avanzate ed innovative di trattamento delle osservazioni, analisi dei dati (a referenza spaziale, tempo – varianti e non) e geomatica applicata nell'ambito della realizzazione di cartografia tecnica e di cartografia tematica per il controllo e la gestione del territorio (o di altri oggetti). A riguardo, principali campi naturali d'interesse sono, oltre al trattamento delle osservazioni ed alla geomatica, le immagini telerilevate ed i sistemi informatici geografici (GIS) e territoriali (LIS).

PREMESSA

Fare un discorso pertinente sulla geomatica applicata è una sfida ed alcuni rischi devono subito essere messi in evidenza, per essere certamente evitati. Il primo rischio è rifugiarsi in discorsi di nicchia di cui il principale è quello di tono scienziato. Infatti la geodesia e le sue scienze affini sono importantissime, così come l'astronomia sua scienza – sorella e la matematica, essenzialmente un linguaggio artificiale (anche se in buona parte ricollegabile a strutture fisiche della mente umana e sicuramente fondato, almeno nelle sue parti più semplici ed antiche, su chiare analogie con il mondo della natura) con il quale entrambe, a lungo, hanno intrecciato stimoli, partecipazioni e benefici. Tuttavia un solo discorso scienziato è limitato e perde di vista l'obiettivo dichiarato di presentare almeno alcune applicazioni possibili della geomatica.

Pertanto il primo rischio è un discorso dall'alto, essenzialmente accademico, dove le applicazioni sono esempi centellinati, ovvero presentati in piccole dosi, forse con un po' di fastidio e quasi solo per dovere. Tuttavia un secondo rischio, altrettanto grande, è fare una grande abbuffata d'esempi, senza alcuna logica propositiva, alcuna strutturazione sistematica ed alcuna motivazione scientifico – tecnologica: una abbuffata, senza limiti, né misura, tanto per gradire, perché gli innumerevoli esempi di tutti possono essere ripetuti, disorganici e caotici. D'altra parte, se è vero, come è vero, che gli esempi sono di tutti ed innumerevoli, solo il loro raggruppamento, la loro classificazione e la loro interpretazione, ancorché basata su aggregazioni minime, fa servire davvero la presentazione degli esempi.

Altrimenti la grande carrellata d'esempi, senza limiti, né misura, suona solo come un liberi tutti di fare tutto quello che si vuole, senza progetto, senza razionamento e senza controllo, ovvero senza alcun fondamento scientifico – tecnologico cui assoggettarsi e rispondere: come in un grande bricolage. Tuttavia è ben chiaro che, se gli esempi non sono mai la pura messa in pratica di una teoria astratta che, a sua volta, proprio sugli esempi può affinarsi, correggersi ed avanzare, senza alcun fondamento scientifico – tecnologico, gli stessi esempi, da soli, diventano una povera cosa. D'altra parte, non è neppure il caso di parlare di cultura popolare, infatti è ben noto a tutti che già l'agrimensura dell'antichità, più remota, si rifaceva alla geometria ed alla misura del tempo, e ha anche contribuito alla loro fondazione.

Non un rischio, ma un'attenzione lessicologica deve essere posta all'uso dei termini: geomatica applicata ed applicazioni della geomatica; essi sono sinonimi. Capita infatti di sentire discettare dell'esistenza, o meno, delle scienze applicate e/o delle applicazioni della scienza. Tuttavia questi discorsi, fuori da una cerchia ristrettissima di filosofi della scienza e di veri scienziati che, con grande cognizione di causa, partecipano allo

stesso dibattito, sono solo discorsi di sciocchi che, senza molte vere conoscenze, fanno discorsi a vanvera. Un ottimo parallelo può essere fatto con altre parole in libertà, come a fare sistema e/o squadra, dove nel caso specifico tutto ciò significa disprezzare la ricerca di base, libera, isolata e fortuita, togliere ad essa i mezzi, ancorché minimi, di sussistenza e mettere in stato di soggezione chi la sviluppa.

Per contro, ciò significa privilegiare, sostenere e difendere, a spada tratta, progetti spesso megalomani (per lo più, votati a sicuro fallimento), purché altisonanti (cioè capaci di ben propagandare l'immagine, senza tenere debito conto dei meriti specifici), e/o attività pratiche di piccolo cabotaggio, purché immediatamente molto redditizie. Allora fare un discorso pertinente sulla geomatica applicata è presentare una raccolta ragionata d'esempi, mettendo bene in evidenza, perché questi servono a spiegare qualcosa sulla geomatica (a prescindere dall'ovvia considerazione che alcuni esempi sono presentati, perché in possesso di chi li intende presentare). Di certo, è una sfida, ma anche, e soprattutto, una bella opportunità e, di conseguenza, un rischio che vale la pena correre.

PARTE I – TECNICHE DI ACQUISIZIONE ED ARCHIVIAZIONE DEI DATI

1.1. NOVITÀ ¹

Nuove tecniche del rilevamento, quali la geodesia spaziale (sistema GPS), la topografia automatica (sistema "laser – scanning", strumenti integrati, strumentazione speciale per il controllo) e la fotogrammetria digitale (sistemi ottici: NOAA, LANDSAT, SPOT, IKONOS, ecc. e nel campo delle microonde: SAR; camere Three – lines, CCD), hanno trasformato profondamente le metodologie di acquisizione di informazioni metriche e tematiche. Contemporaneamente l'esigenza di interpretare ed integrare fra loro le informazioni acquisite è divenuta fondamentale; conseguentemente la cartografia numerica ed i sistemi informativi a referenza spaziale: geografici (GIS) e territoriali (LIS) assumono importanza ancora maggiore.

Le nuove tecniche di rilevamento stanno aprendo nuove possibilità, nel campo dell'acquisizione, dell'elaborazione e della restituzione di informazioni metriche e tematiche, e conseguentemente incentivano nuovi studi, sia sperimentali (acquisizione dei dati), che modellistico - informatici (trattamento delle osservazioni). Pertanto si comprende che le finalità degli studi e delle ricerche nell'ambito delle discipline del rilevamento devono essere duplici. Da un lato, teorico – informatiche: individuare i metodi più rigorosi ed implementare i suddetti algoritmi in programmi di calcolo. Dall'altro, operative: definire le modalità, più semplici e corrette, di acquisizione delle informazioni, per ogni diversa tecnica.

È necessario sottoporre a critica le metodologie di acquisizione e di trattamento dei dati, fino ad ora impiegate, e definire nuove metodologie. Si deve poi provvedere alla stesura, all'implementazione, alla sperimentazione ed alla documentazione di nuovi programmi. È indispensabile sottolineare che attualmente sono disponibili sul mercato, alcuni pacchetti software realizzati all'estero, non corredati dei relativi simbolici. Tuttavia non è auspicabile l'utilizzo di tali programmi (fuorché per eventuali confronti), perché l'acquisizione, a scatola chiusa, è errata metodologicamente, ostacola lo sviluppo della ricerca su basi solide e, anzi frequentemente, lascia dietro di sé numerosi dubbi non risolvibili, solo per pigrizia.

¹ Verso la conclusione della Conferenza Regionale di Cartografia – Lamezia Terme (CZ), 12 – 13 giugno 2003 – la prima parte di questo lavoro è stata presentata, una prima volta, come una delle relazioni invitate e, con un pizzico di presunzione che l'autore si vuole vezzosamente concedere, ha avuto il merito di collegare direttamente i discorsi alti sulle nuove frontiere delle discipline del rilevamento e, in particolare, della geomatica con i problemi concreti delle varie e diverse realtà calabresi, considerate tanto nelle loro purtroppo note situazioni critiche, quanto nella ben visibile prorompente volontà di sapere superare le presenti difficoltà, cogliendo positivamente tutte le moderne opportunità oggi offerte. Per questo motivo, essa è ripresentata, con ben poche modifiche, nell'occasione di un seminario del Master CARTHEMA dell'Università della Calabria – Polo di Vibo Valentia, 22 aprile 2005.

Scopo degli studi e delle ricerche da effettuarsi in questo campo è lo sviluppo di metodologie e procedure innovative nell'ambito dell'elaborazione di sequenze, immagini e mappe derivate da sensori digitali, telerilevate e non. Si tratta, da un lato, di implementare in programmi le metodologie analitiche tradizionali; dall'altro, di sfruttare i vantaggi delle procedure digitali, così da sostituire l'operatore umano in una serie di funzioni ripetitive e lente. In quest'ambito, altri interessanti contributi sono offerti dai GIS e dai LIS che vogliono costituire un'interfaccia fra i dati rappresentativi della realtà, i modelli di interpretazione della stessa e le diverse comunità interessate alla loro consultazione ed al loro utilizzo.

Le discipline del rilevamento sembravano ormai consolidate ed anche esaurite, come possibilità di ampliamento e di approfondimento. In campo geodetico, topografico fotogrammetrico e cartografico, ogni problema sembrava risolto, ogni esigenza soddisfatta. La rivoluzione culturale, scientifica e tecnologica, provocata insieme dalla conquista dello spazio e dal prorompere della geomatica, sia sul versante della strumentazione, sia su quello della teoria dei modelli e dell'informatica grafica, ha dischiuso nuovi orizzonti applicativi. Per affrontare queste nuove frontiere, occorre un modo nuovo di procedere, di considerare le cose: una nuova filosofia comportamentale, quasi una nuova disciplina: la geomatica.

L'Area Topografia e Telerilevamento a Reggio Calabria, presente ed attiva da una dozzina d'anni, ha una diretta discendenza dall'esperienza milanese. Inizialmente ha avuto un legame diretto con la matematica applicata, cosa che ne ha favorito rigore ed attenzione, e successivamente si è sviluppata autonomamente, rispondendo positivamente all'emergere rapido, costante e progressivo di esigenze vecchie e nuove. Alcune esperienze, su tematiche avanzate di geomonitoraggio e di telerilevamento, hanno affiancato altre esperienze, su tematiche consolidate di rilevamento e controllo; anche le problematiche del trattamento delle osservazioni, della cartografia tecnica e della cartografia tematica sono state affrontate ove d'interesse.

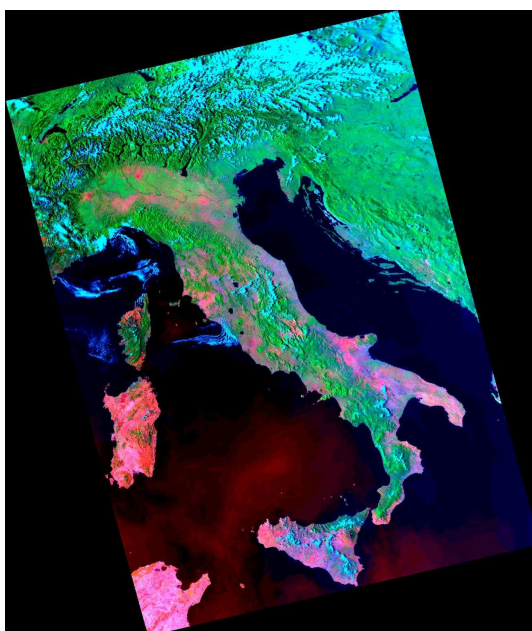


Fig. 1.1 – Un'immagine NOAA della penisola italiana e dei mari prospicienti.

1.2. L MONDO DEI GIS E DEI LIS

Il mondo dei GIS e dei LIS è un mondo complesso, fortemente strutturato ed interdisciplinare. Le banche dati ed i sistemi informativi sono strumenti indispensabili e fondamentali, per molteplici attività pubbliche e private che singoli individui, gruppi più o meno grandi di essi ed intere collettività si trovano ad operare. Dai semplici

archivi di dati ai sistemi evoluti diretti al supporto di decisioni, un'enorme quantità di dati è catalogata, elaborata ed analizzata, per ottenere informazioni ed indicazioni a fini di studio e/o di programmazione. In questo contesto, i GIS ed i LIS hanno lo stesso ruolo, operano con le stesse modalità ed assolvono gli stessi compiti, per tutto ciò che riguarda le problematiche dell'ambiente e del territorio.

Come noto, la maggiore e più rilevante differenza fra le usuali banche dati ed i comuni sistemi informativi, da un lato, ed i GIS ed i LIS, dall'altro, sta nell'essere questi ultimi a referenza spaziale. Si ricordi inoltre che basi di dati dinamiche sono capaci di cogliere, accanto alla distribuzione spaziale, anche l'andamento temporale dei fenomeni e processi tempo - varianti. Pertanto studi e progetti, sull'ambiente ed il territorio, alle varie scale d'interesse, sui manufatti e gli oggetti ivi consistenti, sui beni culturali ed ambientali e su ogni altro oggetto in esame che possa essere studiato tanto nella sua estensione spaziale, quanto nel suo andamento temporale, sono i più importanti campi d'elezione per l'utilizzo dei GIS e dei LIS.

La loro generalità, flessibilità ed interdisciplinarietà sono la ragione del loro successo e della loro diffusione. Contemporaneamente proprio queste caratteristiche fanno, degli stessi, un mondo complesso e fortemente strutturato. Infatti concorrono alla realizzazione ed alla gestione dei GIS e dei LIS: le piattaforme hardware, con tutte le periferiche del caso, i sistemi software, con le necessarie estensioni ad altri sistemi software esterni, le varie e diverse basi di dati e le amministrazioni, gli enti o gli organismi che li hanno raccolti, validati ed organizzati, i modelli di analisi ed interpretazione e l'insieme delle discipline scientifiche e tecniche che li hanno generati, le comunità spesso molto estese e variegate dei loro fruitori.

Può sembrare strano l'accostamento pesante fra GIS e LIS, da un lato, ed analisi statistica, dall'altro. Infatti tipicamente i primi fanno riferimento a problemi di cartografia numerica e subordinatamente di fotogrammetria e telerilevamento, mentre la seconda costituisce una particolare branca della statistica, della matematica o della matematica applicata. Tuttavia questo accostamento, usuale nelle Università dei paesi dell'Europa Centrale e Settentrionale, è più che opportuno e ben fruttifero, in quanto permette di valutare l'incertezza dei dati contenuti, di formulare complessi modelli interpretativi e di superare, almeno in parte, le rigidità imposte dai sistemi commerciali software, attualmente in uso.

L'avvento dei GIS e dei LIS rende superata la cartografia tradizionale. Rappresentazioni cartografiche di tipo tecnico e/o tematico, a partire da basi di dati originali, come pure derivate o elaborate, costituiscono esclusivamente uno dei possibili prodotti del sistema. Infatti la disponibilità di elaborazioni in forma numerica, opportunamente orientate per l'uso cartografico, permette la presentazione di prodotti finali nelle vesti di rappresentazioni cartografiche, per quanto riguarda il contenuto planimetrico, così come nelle forme a curve di livello o rappresentazioni 3D con eventuale ombreggiatura, per quanto riguarda l'altimetria. Altre importanti forme di rappresentazione sono costituite dall'ortoproiezione e dalla prospettivizzazione.

In entrambi i casi, il contenuto qualitativo è da considerarsi fondamentale ed almeno localmente prevalente, da rinunciare a qualsiasi rappresentazione grafica ed alla conseguente interpretazione e semplificazione. L'ortoproiezione permette di trasportare un'immagine su una carta, oppure su un modello 3D, qualsiasi sia la superficie adottata, mentre la prospettivizzazione consente di generare un'immagine virtuale. A valle di entrambe, la sovrapposizione permette di disegnare dentro ortoimmagini ed immagini, riportando su di esse elementi vettoriali d'interesse. Tutte queste operazioni sono configurate "on-line" e facilmente gestibili da sistemi evoluti e di ampia diffusione, quali quelli costituiti oggi dai GIS e dai LIS.

Un buon punto d'inizio prende avvio da un'attenta ed accurata analisi sull'organizzazione dei GIS e/o LIS,

sulla loro attualità e sulle conseguenze da essi apportati. Dopodiché occorre occuparsi della realizzazione dei GIS e dei LIS, prendendo in considerazione le componenti organizzative, i metodi di lavoro, le infrastrutture (hardware, software) di calcolo e di gestione, i dati. Oggetto d'interesse sono altresì l'acquisizione dei dati e le fonti d'informazione: rilevamenti in loco, immagini fotografiche ed elettroniche telerilevate e non, piani e carte (topografiche, tecniche, tematiche, catastali) esistenti, dati statistici (censimenti, sondaggi, inchieste), banche dati in esercizio, GIS e LIS preesistenti.

Successivamente è necessario prendere in considerazione la gestione dei dati, riguardante tanto le funzioni del sistema (realizzando visualizzazioni; compiendo estrazioni locali, selezioni logiche e in base a criteri spaziali; operando mutazioni e aggiornamento dei contenuti), quanto l'organizzazione dei dati (dalla componente descrittiva: tabelle, grafi, modelli relazionali, ecc., alla componente geometrica: strutture a raster, forme vettoriali, soluzioni miste). Anche l'esercizio del sistema, dall'inizio dell'attività all'integrità (secondi parametri di correttezza, consistenza, protezione e sicurezza) dei dati, come pure dall'aggiornamento dell'informazione all'offerta di informazioni, è posto in evidenza.

Un punto fondamentale consiste nella progettazione dei GIS e/o dei LIS, dall'analisi preliminare (pre – fattibilità e fattibilità, delimitazione ed alternative) al progetto di dettaglio delle componenti, per giungere alla messa in esercizio (gestione a lungo termine, aggiornamento dell'informazione, sua cadenza e periodicità). Tutte le tecniche d'acquisizione delle informazioni, comprendenti i rilevamenti topografici, la digitalizzazione di piani e carte, la digitalizzazione di immagini, l'integrazione di dati numerici e l'eventuale trasformazione di dati geometrici, comunque rilevati, sono oggetto d'interesse, specialmente ove queste sono considerate classiche nelle discipline del rilevamento.

Un altro punto indispensabile è costituito dalle strutture dati e dalle strategie d'implementazione, realizzando nell'ordine i modelli esterno, concettuale (secondo l'approccio entità – relazione, con gli attributi di entrambe), logico (facendo uso di strutture dati relazionali e di sistemi vettoriali, per le componenti metrica e topologica, oppure di sistemi raster, con le necessarie modalità di compressione dei dati, o in alternativa di modelli continui) e fisico. Orientamenti moderni e tendenze di ricerca, quali GIS ad oggetti, basi di dati estendibili, GIS 3D, sistemi tempo - varianti, GIS dinamici, sistemi esperti, ecc., sono argomenti, altamente sofisticati, il cui uso deve essere comunque previsto, ove necessario.

L'offerta di servizi, dalla cartografia (a tutte le scale) al catasto urbano, dei terreni, delle infrastrutture e dei beni culturali ed ambientali (ovviamente anche per la valutazione d'impatto ambientale), inoltre dal monitoraggio in continuo, per il controllo di deformazioni, alla certificazione di qualità, nel rilevamento e nella restituzione, come pure dalla documentazione delle reti, di circolazione e distribuzione e delle imprese di trasporto, alla comunicazione e telecomunicazione, oppure dalla programmazione, pianificazione, progettazione (a tutti i livelli) ai sistemi di navigazione e di guida, è da porre al centro dell'attenzione, affinché il progetto di ricerca abbia molteplici ricadute pratiche, utili per la comunità degli utilizzatori.

Infine due interessanti problemi si presentano nella fase di acquisizione dei dati telerilevati e non. Infatti un problema rilevante si ha nel passaggio da una referenza spaziale debole: i siti (talvolta gli indirizzi), ad una referenza spaziale forte: le coordinate. In questo caso, l'uso speditivo del sistema GPS risponde positivamente alla bisogna. Un altro problema rilevante è rappresentato dalle strutture raster (mappe, disegni, immagini, immagini complesse), dove la grande quantità di informazione dà problemi di validazione dei dati, di estrazione di caratteristiche morfologiche e di fusione delle informazioni. Allora metodi ad hoc, per strutture grigliate permettono di superare vantaggiosamente ogni difficoltà.

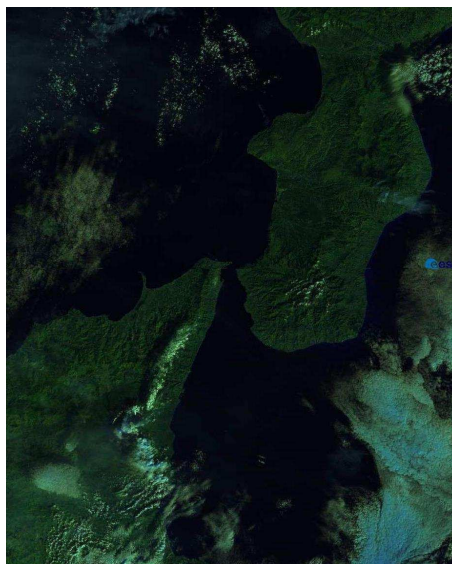


Fig. 1.2 – Un'immagine ERS1 della Calabria meridionale e della Sicilia nord-orientale.

1.3. LA GALASSIA DELLE IMMAGINI

Immagini telerilevate derivate da sensori digitali (in particolare, immagini ottiche ad alta risoluzione, il sistema “laser scanning” e la telemetria da SAR interferometrico), sequenze (ottenute da tecniche geospaziali) e mappe, come pure altre basi di dati qualitative e quantitative georeferenziate o, più in generale, a referenza spaziale, tempo – varianti e non, costituiscono basi di dati per l'applicazione di metodologie e procedure innovative nell'ambito dell'acquisizione, dell'elaborazione e della restituzione. I loro prodotti, di volta in volta intermedi o finali, a seconda delle esigenze specifiche, sono gestibili facilmente da sistemi evoluti e di ampia diffusione, quali quelli costituiti oggi dai GIS e dai LIS.

Tecniche geospaziali permettono la georeferenziazione e forniscono la conoscenza, pressoché continua dello stato di deformazione, delle tensioni sottostanti e delle sollecitazioni indotte. Queste osservazioni, per il loro alto grado di accuratezza, precisione ed affidabilità, sono da mettersi in relazione con le altre misure in continuo, di alta precisione (ad esempio, immagini, strumenti integrati, strumentazione speciale per il controllo), in modo tale da arricchire la spiegazione fornita dal modello globale. In questo ambito, sono oggetto d'interesse, tanto le compensazioni globali, quanto l'interpolazione ed approssimazione dei modelli di campi, facendo uso sia del metodo dei minimi quadrati generalizzati, sia di procedure robuste.

Le immagini ottiche (sistemi: NOAA, LANDSAT, SPOT, IKONOS, ecc.; camere Three – lines, CCD) sono prodotti acquisiti da sensori passivi, oggi giorno da affiancarsi ad altri prodotti derivati da sensori attivi. Il loro insieme, molteplice e variegato, mostra la centralità, oggi ancora più che nel passato, della galassia delle immagini. Infatti già le sole immagini ottiche permettono di operare, tanto nello spazio scale (multirisoluzione), quanto in quello delle frequenze osservate (multispettrale), come pure in un ambiente dinamico (multitemporale). Tutto ciò che ne fa un importante componente dei GIS e dei LIS, in forma raster, accanto alle mappe, alle ortoimmagini, al DEM (ai DTM's) ed altri livelli informativi tematici e/o statistici.

Il sistema “laser scanning”, metodo innovativo e promettente, richiede un'analisi critica dell'informazione effettivamente acquisibile, intrecciata ai noti problemi d'integrazione dei sensori e di fusione dei dati (GPS, INS, conoscenza del geoide locale, ecc.), all'apertura verso la terza dimensione ed alla dinamicità del metodo. Si noti, a riguardo, come la fotogrammetria sia una disciplina “classica”, basata su ordine, generalità e precisione; al contrario questo sistema entra nei dettagli e mostra come sia inevitabile tenere conto del

disordine e del fattore tempo: il suo stesso principio di funzionamento trova parte delle sue radici nel casuale (distribuzione asimmetrica degli errori, non – normalità degli stessi).

Il telerilevamento (in particolare, la telemetria da SAR interferometrico) fornisce, d'altro canto, la più estesa e dettagliata informazione. Come noto, le immagini SAR sono immagini complesse che richiedono una lunga serie di pretrattamenti ed elaborazioni per ottenere prodotti di uso comune. La coregistrazione (matching) delle immagini, per ottenere l'interferogramma, lo srotolamento (unwrapping) delle fasi di quest'ultimo e la georeferenziazione (geocoding) delle fasi srotolate, per ottenere le quote e/o la loro variazione nel tempo, sono operazioni di alta sofisticazione, pur tuttavia necessarie al fine di ottenere i risultati attesi. Il prodotto è un DEM, nell'accezione completa data a questo termine.

L'acquisizione, elaborazione e restituzione di immagini telerilevate e non, qualsiasi sia il loro tipo e natura, rappresenta un significativo punto d'arrivo. Infatti le immagini, grazie alla loro alta ripetitività ed alla loro ricchezza ed attendibilità d'informazioni contenute, completano ed arricchiscono la conoscenza dello stato di fatto e di eventuali alterazioni, dissesti o degradi, in atto. Pertanto da un lato, un sistema di riferimento permanente e globale permette la loro georeferenziazione, dall'altro le stesse immagini costituiscono documentazione permanente e forniscono il desiderato passaggio dal discreto al continuo, negli studi e nelle ricerche per operazioni di documentazione e classificazione, e sui modelli di deformazione.

Un modello digitale delle altezze (DEM) e vari modelli digitali del terreno (DTM's): pendenze, curvature; variazioni d'altezza, con velocità ed accelerazioni, oppure ampiezze, periodi, sfasamenti e smorzamenti, sono i prodotti attesi. Un modello digitale (più complesso) di superficie (DSM) è stato proposto, per rappresentare superfici qualsiasi e loro deformazioni. Data la natura, formalmente identica, di tutti questi prodotti, pur assai vari e differenti fra loro, essi sono volutamente riassunti nel solo termine DEM e ricondotti alla comune problematica della ricostruzione di superfici, figure, modelli ed oggetti. A sua volta, questa problematica rimanda alle tecniche d'interpolazione ed approssimazione.

Procedure di estrazione di caratteristiche morfologiche e di matching di sequenze, immagini e mappe, tecniche di costruzione di un DEM 2D e $\frac{1}{2}$, oppure 3D, e di produzione di ortoimmagini, con sovrapposizione di elementi vettoriali d'interesse, si effettuano con metodi deterministici, come pure con metodi stocastici e/o misti. Nel primo caso, oltre a tenere conto della geometria e/o della fisica dei sistemi, si procede alla interpolazione polinomiale e/o con il metodo degli elementi finiti. Nel secondo caso, sotto l'ipotesi che l'insieme dei dati possa essere considerato una realizzazione di un processo stocastico, la costruzione si avvale di stime di covarianza, seguite da un filtraggio ottimale.

Informazioni sussidiarie, quali pendenze, curvature e volumi, per analisi morfologiche, come pure velocità ed accelerazioni, oppure ampiezze, periodi, fasi e smorzamenti, per studi cinematici, sono ricavabili contestualmente. Inoltre al fine di permettere un'adeguata gestione delle basi di dati e di provvedere all'elaborazione dei dati stessi, si fa uso di tecniche sofisticate, messe a disposizione dall'analisi numerica e dalla statistica computazionale. Allo scopo, si fa uso di metodi veloci di numerazione, ordinamento e dissezione (basati sulla teoria dei grafi), così come di algoritmi specifici (esatti o iterativi, diretti o sequenziali) di algebra lineare, per seminati di punti (dati spot), ovvero per strutture grigliate (dati raster).

La fase dell'acquisizione dei dati ha richiesto per molti anni notevole impegno, ora invece è possibile ottenere insiemi molto vasti di dati in modo relativamente facile. Tuttavia è proprio la mole di dati ad originare una serie di nuovi problemi, poiché la numerosità del dato non significa necessariamente maggiore

informazione. L'informazione non è infatti archiviazione di dati, bensì processo di analisi critica. Talvolta anzi l'eccesso di dati crea fraintendimenti e mancanza di consapevolezza critica, sia dal punto di vista ideale sia nel mondo reale, dove si possono generare conflitti. Nell'ambito di una crescita della conoscenza critica, è pertanto necessario analizzare l'informazione stessa.

Attualmente la fine delle visioni generali (teoria della relatività) e la constatazione che ogni visione scientifica è coerente con gli strumenti tecnici a disposizione di un osservatore, in un determinato tempo e luogo (principio d'indeterminazione), hanno originato un profondo rivolgimento. Caso e necessità diventano entrambi importanti e non contrapponibili, mentre non esiste una sola verità, ma punti di vista differenti consentono l'esistenza di zone di intersezione. L'informazione contiene spesso dati correlati che devono essere trattati con particolare cura: infatti trascurare tale correlazione significa ritenere di avere una quantità di informazione superiore, a volte anche di molto, a quella effettivamente a disposizione.

Tutto il lavoro svolto, in fase d'acquisizione ed elaborazione, sarebbe limitato, se non prevedesse anche l'archiviazione dei dati acquisiti e delle loro elaborazioni. Infatti la documentazione e la catalogazione, come pure l'aggiornamento e la visualizzazione, sono requisiti indispensabili e fondamentali per poter operare nella realtà attuale. A questo proposito, i GIS ed i LIS rispondono positivamente alla bisogna. Infatti essi permettono di raccogliere, nei loro vari strati e livelli, tutte le informazioni, dai dati originali, a prodotti intermedi, fino ai risultati finali. Inoltre essi permettono, come già detto in precedenza, interrogazioni ed elaborazioni, se del caso, dando vita a nuovi prodotti derivati ed elaborati.

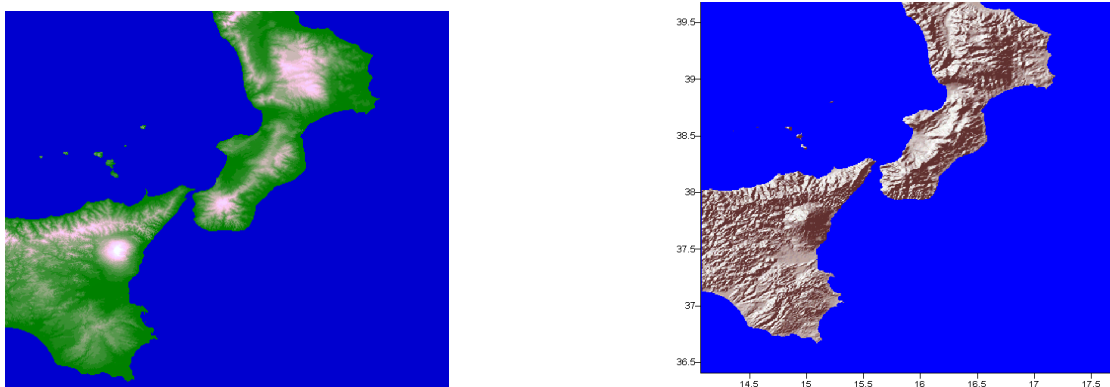


Fig. 1.3 – Il DEM della Calabria e della Sicilia Orientale: rappresentazioni a sfumo e 3D.

1.4. DAL TRATTAMENTO DELLE OSSERVAZIONI ALLA GEOMATICA

Le discipline geodetiche e cartografiche sono state, da sempre, discipline del calcolo, rinomate per la loro accuratezza, precisione ed affidabilità. Astronomi, geodeti e cartografi sono fra i fondatori di varie discipline della matematica (applicata) fra le quali una delle più importanti è la statistica: disciplina che, nel trattamento delle osservazioni, è propedeutica alla topografia, alle misure geodetiche, alla cartografia numerica, alla fotogrammetria ed al telerilevamento. La stessa disciplina, spaziando dall'analisi dei dati alla statistica computazionale, offre validi contributi a tutte quelle anime delle varie e diverse discipline che si caratterizzano per un approccio non – deterministico ai problemi d'interesse delle stesse.

Il trattamento delle osservazioni copre l'intero settore dei dati di misura ed ha avuto, per lungo tempo, una sua relativa unitarietà. Tuttavia di recente, il prevalere nella geodesia e nella topografia (riassorbita, nello stesso ambito, dall'avvento delle misure geodetiche ed, in particolare, geospaziali) di un interesse per le scienze della terra (e, fra esse, principe la geofisica) e, di contro, il prevalere nella cartografia, nella

fotogrammetria e nel telerilevamento di un'attrazione verso le scienze dell'informazione (e, fra esse, principe la geomatica) sta portando alcune differenziazioni, oltretutto entro certi limiti, come effetto di retroazione, ad un cambio di natura delle discipline stesse e d'attenzione verso gli oggetti d'interesse.

Le discipline del rilevamento sono discipline del calcolo e l'impatto maggiore dell'elettronica e dell'informatica è nel settore del calcolo: laboriose metodologie analogiche ormai sono state abbandonate e sostituite completamente da metodologie analitiche e procedure digitali praticamente computabili. Di conseguenza, un trattamento delle osservazioni, con errori relativi compresi fra 10^{-5} e 10^{-7} , deve saper gestire ed elaborare, principalmente in ambito geomatico, basi di dati la cui dimensione varia fra 10^6 e 10^{10} , determinare stime di parametri in numero variabile fra 10^4 e 10^6 e procedere all'analisi (statistica e numerica) dei dati stessi, possibilmente con livelli di affidabilità pari o superiori a 0.8.

La teoria dei modelli distingue i modelli neri dai modelli grigi. Infatti mentre un modello grigio è costituito da un fenomeno di cui si conosce una legge deterministica di comportamento, essendo questa nota per cause geometriche o fisiche o altre, un modello nero è costituito da un fenomeno di cui non si conosce alcuna legge deterministica di comportamento. Pertanto scopo di un problema di interpolazione – approssimazione, per un modello grigio, è la stima dei parametri del modello e la loro validazione statistica. Invece nel caso di un modello nero, si ha dapprima la definizione di una strategia di scelta del modello e successivamente la stima dei parametri del modello prescelto, congiuntamente alla loro validazione statistica.

Allora se si eseguono serie diffuse nello spazio e/o ripetute nel tempo di osservazioni a referenza spaziale è possibile stimare, oltre alle posizioni dei punti, anche un certo numero di parametri geometrici e/o fisici caratterizzanti la morfologia di una certa zona, come pure un certo numero di parametri cinematici caratterizzanti eventuali movimenti e/o deformazioni. Un possibile approccio deterministico e/o stocastico individua descrittori di forma, oppure leggi di moto, adatti ad interpretare il fenomeno, giustapponendo questi alle usuali equazioni di osservazione. Una soluzione d'assieme, successiva a soluzioni preliminari, da eseguirsi a passi, è fornita dalla geodesia integrata, intesa nel suo senso più ampio.

La estrapolazione e/o predizione dati permette di validare il campione e di fornire prodotti regolari per la restituzione e la visualizzazione. D'altro canto, procedure robuste e tecniche statistiche inferenziali permettono, in ogni fase, la validazione delle basi di dati in uso, provvedendo ad isolare i dati anomali dal grosso dei dati, considerati soddisfacenti, oppure a dar vita a spiegazioni sussidiarie, alternative ai modelli principali adottati. A tale proposito, tecniche di "cluster analysis", metodi di "perceptual grouping" ed algoritmi "ad hoc", cosiddetti nella letteratura specialistica: descrittori di forma, costituiscono metodologie e procedure complementari, offerte dalla matematica discreta, alla modellazione analitica al continuo.

Il problema della stima di parametri di modelli, tenuto conto delle caratteristiche delle stime (correttezza, consistenza, efficienza, sufficienza; robustezza) è centrale per la definizione di appropriati algoritmi. Stime con il metodo della massima verosimiglianza, stime con il metodo dei minimi quadrati, effettuate tanto in ambito lineare (ric conducendosi, in ogni caso, al modello delle equazioni di osservazione e di pseudo – osservazione, sovrappesate e non), quanto per problemi non - lineari nei modelli funzionale e stocastico o nella norma, e procedure di stima con metodi robusti sono applicate per l'interpolazione polinomiale, il metodo degli elementi finiti, problemi reticolari (reti di trasporto, reti di tipo geodetico, ecc.).

Richiamandosi ai differenti problemi d'interpolazione ed approssimazione, per campi irregolari (seminati di

punti), oppure per strutture regolati (dati grigliati), e di compensazione, per strutture reticolari, gli algoritmi diretti (di fattorizzazione e, se del caso, di ortogonalizzazione) ed iterativi (stabili e rapidamente convergenti, perché preceduti da algoritmi veloci di preconditionamento), ed i metodi ad hoc per strutture regolari, propri della statistica computazionale, sono applicati per la soluzione dei modelli numerici relativi. Modelli partizionati e sequenziali, tecniche multilivello e regole inferenziali sono strumenti, altamente sofisticati, il cui uso deve essere comunque previsto, ove necessario.

L'analisi multivariata, grazie all'inferenza statistica multivariata, permette di giudicare la bontà e la significatività dei risultati ottenuti. A tal fine, è necessario effettuare preliminarmente la progettazione degli esperimenti, attraverso campionamenti opportunamente stratificati, per problemi d'interpolazione ed approssimazione, e l'ottimizzazione (simulazione interattiva ed ottimizzazione matematica) della configurazione, per strutture reticolari, e successivamente uno studio puntuale dell'affidabilità delle osservazioni. Tecniche di "cluster analysis", analisi di varianza, regressione multipla (e talvolta di analisi fattoriale) consentono analisi più accurate e/o la soluzione di problemi specifici collaterali.

L'analisi fine delle basi di dati prevede la valutazione di insiemi ordinati (ovvero delle basi di dati stesse e della loro catalogazione, nello spazio e/o nel tempo, oppure in altri domini opportunamente definiti), interpretati come serie e/o lattici, estratti da realizzazioni di processi stocastici. Questa valutazione procede dapprima all'identificazione del modello stocastico (supposto continuo, stazionario in senso debole di ordine due, isotropo o decomponibile ortogonalmente e normale), mediante stime di covarianza, dopodiché all'esecuzione di stime ottimali lineari, separando il segnale dal rumore, con il metodo della collocazione, ed infine alla predizione del segnale, sulla base di quanto ottenuto con il filtraggio.

Metodologie e procedure complementari, offerte dalla matematica discreta, alla modellazione analitica al continuo, permettono l'identificazione di strutture latenti, affrontando problemi di numerazione, ordinamento e dissezione (per strutture cellulari, reticolari e relazionali), di riconoscimento di forme note e di classificazione di forme. Tecniche di segmentazione, dal riconoscimento di segnali temporali al riconoscimento di frontiere in campi a referenza spaziale, come pure dal riconoscimento di caratteristiche morfologiche di figure ed oggetti ai descrittori di forma applicati agli stessi figure ed oggetti, completano la vasta gamma di potenzialità offerte, consentendo analisi più dettagliate.

La validazione dei modelli, anche in questo caso grazie all'inferenza statistica multivariata, permette di giudicare la bontà e la significatività dei risultati ottenuti. Allora lo studio di serie temporali, la ricostruzione di linee, superfici e campi 3D, il matching di segmenti, figure ed oggetti, la valutazione degli aspetti temporali in problemi a referenza spaziale, la generalizzazione degli schemi di compensazione di strutture reticolari, tenendo conto di equazioni dinamiche, per dati tempo - varianti, e di equazioni di distribuzione, per seminati di punti e/o dati grigliati, si conclude con un giudizio statistico sulla significatività, o meno, dei parametri e/o del segnale, sull'assenza di errori grossolani e su altro ancora, ove d'interesse.



Fig. 1.4 – Carta numerica della zona nord della città di Reggio Calabria e l'elaborazione statistica dei dati.

1.5. ESEMPI E RICADUTE

Questo lavoro è dedicato alla Città di Reggio Calabria, alla sua Provincia e alla Regione Calabria, con la speranza di poter guardare, con capacità di discernimento, la realtà presente di queste terre che sono, agli autori, infinitamente care. Pertanto doti comuni ai più, quali l'impegno civile e la coscienza sociale, così come esse scaturiscono dalla responsabilità individuale e dal senso civico, hanno portato ad offrire un piccolissimo contributo. La buona volontà non è tutto, ma moltissimi tentativi sinceri e generosi, così come molti semi, possono dare frutti copiosi. Ovviamente la futurologia non è una scienza, ma per accogliere positivamente il futuro e quanto riserva, si richiede comunque bontà d'animo, umiltà e spirito di servizio.

Una terra ricca di natura, arte e cultura, con 2500 anni di storia, che ha dato i natali a Pitagora, nel Mondo Antico, Gioacchino da Fiore, nel Medioevo, Bernardino Telesio e Tommaso Campanella, agli albori dell'Età Moderna, Corrado Alvaro, agli albori dell'Età Contemporanea, non merita l'attuale triste condizione di abbandono e di degrado. Invece purtroppo essa, già terra di emigrazione, oggi è terra di disoccupazione: oltre il venti per cento della popolazione non ha lavoro (o è semi - occupata, sottoccupata, oppure è occupata in modo precario e clandestino) e questa terribile percentuale sale al quaranta per cento, se riferita ai giovani, ed addirittura al sessanta per cento della sola popolazione giovane femminile.

E' vero, essa è terra di malaffare e di malavita, dove la corruttela politica ed il clientelismo elettorale hanno troppo spesso fatto fronte comune con la criminalità organizzata. Colpita dalla piaga dei sequestri, dai sordidi commerci di armi, droga e clandestini, dalla spirale dell'intimidazione, estorsione ed infiltrazione, capace con il riciclaggio di annientare tanto la società civile, quanto l'economia reale, parte della classe politica, a lungo, ha tollerato e coperto tutto quanto, poiché è assurdo supporre l'invincibilità di queste bande, ed una società con nessuna certezza e senza alcuna speranza ha scelto vergognosamente il compromesso: una stima ragionevole ritiene circa il venti per cento della popolazione connivente o collusa.

Eppure deve essere possibile invertire la rotta e muoversi con successo per la conquista ed il consolidamento dello sviluppo sociale e del progresso civile. La difesa dell'ambiente naturale in tutti i suoi vari e diversi aspetti, la sicurezza civile, sociale ed economica della popolazione, la sua partecipazione alla vita democratica, la sua crescita culturale, l'espansione ed il rafforzamento dell'economia, dalle differenti fonti primarie ai molteplici mezzi di trasformazione, dalla rete di circolazione e di trasporto a quella di distribuzione dei beni e dei servizi immateriali, ecc. costituiscono ciascuna una pre - condizione e, nel loro complesso, le condizioni essenziali perché detti traguardi siano raggiunti ed assicurati.

Negli ultimi anni, qualche esempio preclare d'inversione di rotta è, del resto, noto e ben visibile, ed è doveroso darne qui menzione ed atto. Le nuove Amministrazioni Regionale, Provinciali e Comunali, indipendentemente dal loro specifico orientamento partitico, si stanno muovendo su nuovi binari, in un contesto concreto di riferimenti d'eccellenza nazionali ed europei. L'augurio sincero è che la dialettica politica non scada mai ad un'insulsa sequenza d'inutili conflitti e dannosi scontri, ma salga sempre a collaborazione fattiva, pur in uno spirito di sana competizione. In questo modo sarà più facile recuperare, rispetto al passato, correggere eventuali errori ed omissioni, e conseguire risultati positivi e significativi.

Anche l'Università degli Studi di Reggio Calabria e, nello specifico, la sua Facoltà d'Ingegneria partecipano, da sempre, a questo clima mutato, ne sono state fiere antesignane ed instancabili propugnatrici, e continuano ad impegnarsi attivamente, affinché nulla d'intentato sia tralasciato, per giungere, in fretta e con successo, al conseguimento degli scopi attesi. L'Area Topografia e Telerivamento del DIMET è una piccolissima realtà che, pur in mezzo a tutte le sue consapevoli e comprensibili difficoltà di organizzazione e

dimensione, orgogliosamente ha inteso, intende ed intenderà muoversi in questo solco, da altri autorevolmente tracciato.

Parecchi potrebbero essere gli esempi concreti (ed i risultati acquisiti), dove la sopracitata Area Topografia e Telerilevamento è stata coinvolta in attività svolte a supporto di specifiche iniziative, rivolte all'ambiente ed al territorio, in un contesto regionale, comprensoriale o locale. A tale proposito, basta ricordare campagne di misura per il rilevamento dei dati ed operazioni di trattamento delle osservazioni, per il controllo di dissesti idro-geologici la protezione di opere marittime, la costruzione d'infrastrutture di trasporto, reti tecnologiche, impianti di telecomunicazione, la pianificazione territoriale e/o urbana, delle attività commerciali e dei servizi tecnologici, la classificazione e conservazione dei beni culturali ed ambientali.

Nell'ambito del presente lavoro, si sceglie volutamente di circoscrivere la presentazione degli esempi, alla sola attività di supporto alla formazione di una Cartografia Tecnica Regionale a media e grande scala. Infatti questo esempio estremamente significativo, per importanza e dimensione, da solo soddisfa e completa le ragioni dell'illustrazione d'esempi. A riguardo, vale è necessario sottolineare, come detta attività cartografica costituisca una vera e propria primizia, in ambito regionale, abbia una sua vera e propria originalità, rappresentando un'effettiva innovazione, in ambito nazionale, e sviluppi un significativo collegamento, non solo finanziario, ma anche tecnico-scientifico, in un contesto europeo.

Alcune sommarie indicazioni, sul suddetto progetto di Cartografia Tecnica Regionale, sono illustrate nel prosieguo. Una rete geodetica d'inquadramento, per l'intera regione, dovrà essere impiantata, rilevata (con il sistema GPS) e compensata. Parte di essa dovrà essere monumentata, con caratteristiche di permanenza nel tempo, per consentire campagne ripetute di controllo geodetico-geofisico; infatti l'arco calabro è parte di una area tettonica più vasta tuttora attiva. Da questa rete, saranno emanati i punti fotografici d'appoggio, propriamente detti, che concorreranno all'effettuazione della triangolazione aerea, congiuntamente ai dati forniti dal sistema GPS la cui presenza, a bordo del veicolo, è strettamente obbligatoria.

I voli fotogrammetrici dovranno permettere la restituzione a media scala, dell'intero territorio regionale, ed a grande scala, dei centri abitati. Sarà obbligatorio eseguire la ripresa aero-fotogrammetrica, in modo tale soddisfare imprescindibili esigenze di accuratezza, precisione ed affidabilità, ovvero la sola cosa che può garantire la bontà della triangolazione ed il successo di tutte le operazioni di restituzione, eseguite a valle di quest'ultima. A tal fine, qualità delle immagini, valori di ricoprimento e numero di osservazioni/ripetizioni (per i punti di legame e di appoggio) sono rigorosamente fissati, in quantità ben maggiore rispetto le purtroppo, molto approssimative, consuetudini dettate della prassi fotogrammetrica corrente.

Le operazioni fotogrammetriche saranno effettuate con tecnologie digitali (e, per la triangolazione aerea, ancora oggi oggetto di studi e ricerche, saranno sottoposte a particolari verifiche); in ogni caso, la restituzione dovrà avvenire in forma numerica. Quest'ultima porterà alla formazione di strati geometrici e/o tematici, da inserirsi in un più generale sistema informativo geografico, a base regionale. Detta restituzione avverrà in forma vettoriale, per le aree urbane, rilevate anche a grande scala, e limitatamente alle sole aree costiere, per le riprese a media scala, oppure in forma raster (ortoimmagini su DEM, generato allo scopo, con sovrapposizione di elementi vettoriali d'interesse), per le aree interne, montane e boschive.

Resta da segnalare la costituzione, in contemporanea, di un centro d'eccellenza di formazione tecnica nell'ambito della geodesia e geomatica, cosa che permetterà di avviare, superata la fase iniziale di supporto alla produzione cartografica, operazioni di monitoraggio e controllo, in ambito geologico ed idrologico, come

pure di rilevamento e classificazione, in ambito territoriale ed ambientale. Tutto ciò permetterà inoltre una presenza fattiva e significativa nelle attività dei gruppi di lavoro, dedicati alle discipline del rilevamento, dell'Intesa Stato – Regioni – Enti locali che, proprio in questi tempi, si stanno occupando della definizione delle nuove regole per le attività future del settore, in un confronto positivo con le altre realtà europee.

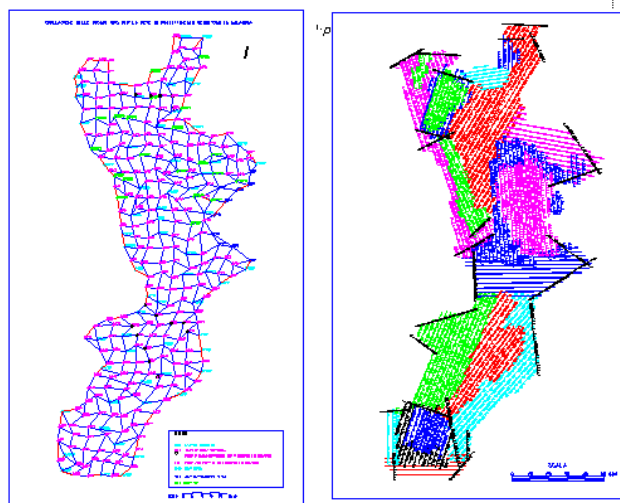


Fig. 1.5 – La rete geodetica ed il piano di volo per la CTR della Regione Calabria.

1.6. PROSPETTIVE

I campi d'applicazione delle metodologie e procedure sono ampi e variegati, ed innumerevoli sono le discipline coinvolte, fruitrici di possibili ricadute positive. Per quanto il complesso delle suddette metodologie e procedure abbia una sua relativa unitarietà, significative differenziazioni si presentano, in corrispondenza alle diverse e differenti applicazioni. Tutto ciò è vero per quanto riguarda tanto le tecniche di acquisizione, quanto gli algoritmi di elaborazione e di restituzione. In ogni caso, mentre le procedure di rilevamento dei dati tendono ad essere altamente specifiche, le metodologie di trattamento delle osservazioni costituiscono un nocciolo centrale, caratterizzato da imprescindibili esigenze di accuratezza, precisione ed affidabilità.

Il flusso di dati metrici e tematici forniscono informazioni sul territorio, sull'ambiente e sui manufatti e gli oggetti ivi consistenti. Dalla scala continentale e sub – continentale, alla scala regionale e comprensoriale, come pure dalla scala urbana e dal rilievo dell'architettura, al rilevamento di oggetti, grandi, piccoli e piccolissimi (inclusa la componentistica), grazie alle misure geodetiche, alla topografia di precisione ed alla fotogrammetria dallo spazio, aerea e terrestre (inclusa quella cosiddetta dei vicini), informazioni metriche possono essere raccolte. Esse costituiscono un'indispensabile ed insostituibile documentazione, circa lo stato di fatto, le condizioni di conservazione e gli eventuali degradi in atto.

A qualsiasi scala, il telerilevamento da satellite ed aereo (ed il "proximal sensing", nel caso di rilievo a grandissima scala) affianca vantaggiosamente la fotogrammetria, per quanto riguarda il rilevamento tematico, essendo quest'ultima principalmente indicata per quello metrico. In questo contesto, lo studio dell'ecosistema, la prevenzione delle catastrofi naturali, il controllo dei rischi ambientali ed antropici, la gestione delle risorse rinnovabili (se pur limitate) e non – rinnovabili, la classificazione dell'uso del suolo, la pianificazione degli insediamenti umani, la tutela dei beni culturali ed ambientali sono campi privilegiati d'applicazione delle metodologie e procedure delle discipline del rilevamento.

L'estensione dello spazio delle scale e la vastità dei campi d'applicazione fanno sì che moltissime e molto

differenziate fra loro siano le discipline coinvolte. Tutti i settori dell'ingegneria civile, edile e per l'ambiente ed il territorio (come pure molti settori dell'ingegneria industriale) beneficiano di possibili ricadute positive. Inoltre altri importanti settori sono fruitori degli stessi vantaggi: dalle scienze della terra alle scienze naturali ed ambientali, dall'urbanistica all'architettura, dall'architettura d'interni al disegno industriale, dall'archeologia alle arti figurative, dalla medicina alla chimica. In sintesi, proprio tutte le discipline che abbisognano di informazioni metriche e/o tematiche.

La collaborazione fra l'Area Topografia e Telerilevamento del DIMET, dipartimento istituito presso la Facoltà d'Ingegneria dell'Università degli Studi di Reggio Calabria, e la Sezione Rilevamento del DIAR del Politecnico di Milano risale alla seconda metà degli anni ottanta. Segni caratteristici di questa collaborazione sono sempre stati la stima reciproca, lo scambio aperto e gratuito di comunicazioni ed informazioni, e la buona volontà di tutti. Conseguentemente detta collaborazione si è sviluppata, per tutti questi anni, in modo assiduo, profondo e fecondo, ed ha portato a risultati più che positivi e di soddisfazione per tutti. L'augurio è che questa collaborazione possa continuare, allo stesso modo e, se possibile, ancora meglio.

Applicazioni specifiche sono consistite nello sviluppo di studi e ricerche, anche in un contesto più ampio, con particolare riferimento a linee di ricerca scientifica condotte a livello internazionale, rivolti al monitoraggio in continuo, finalizzato al controllo di deformazioni, all'elaborazione di immagini telerilevate (in particolare, immagini ottiche ad alta risoluzione, il sistema "laser scanning" e la telemetria da SAR interferometrico), alla realizzazione e la gestione di sistemi informativi a referenza spaziale: geografici (GIS) e territoriali (LIS), con basi di dati tempo – varianti e non, e ad altri rilevamenti speciali, per l'ambiente ed il territorio, cui far seguire il trattamento delle osservazioni dei dati rilevati.

APPENDICE A – APPLICAZIONI ALL'INGEGNERIA CIVILE ²

A.1 GENERALITÀ SULL'INGEGNERIA CIVILE

La realizzazione di un'opera di Ingegneria Civile prende l'avvio da un progetto specifico, di edilizia, di ingegneria strutturale, di idraulica, o di ingegneria dei trasporti, e si articola poi in diversi aspetti operativi, più o meno importanti, in tutti i rami dell'industria delle costruzioni:

- ☐ programmazione dei lavori;
- ☐ programmazione della produzione degli elementi prefabbricati;
- ☐ pianificazione degli approvvigionamenti;
- ☐ pianificazione della sicurezza;
- ☐ controllo della qualità, rilevamento e controllo, in fase di realizzazione delle opere;
- ☐ gestione della documentazione e dei materiali;
- ☐ gestione dei subappalti e dei noli;
- ☐ gestione degli impianti e dei macchinari;

² La presente appendice trova la sua ragione nella particolare posizione assunta dell'autore e da un amico e collega (coautore di un lavoro da cui discende l'appendice stessa), cioè nel loro essere stati rispettivamente professore ordinario, a tempo pieno, presso la 1^a Facoltà d'Ingegneria del Politecnico di Milano, e ricercatore universitario confermato, a tempo definito, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Reggio Calabria. Infatti il primo è stato, pro - tempore, Presidente del Consiglio dei Corsi di Studio in Ingegneria Civile della suddetta 1^a Facoltà d'Ingegneria del Politecnico di Milano, mentre il secondo è stato, pro - tempore, Presidente dell'Ordine degli Ingegneri della Regione Sicilia. In queste vesti, essi hanno potuto collezionare esempi rispettivamente di percorsi formativi ed esperienze professionali, nell'ambito dell'Ingegneria Civile, rapportandoli alla loro formazione scientifica nel settore del rilevamento e del controllo. Un sentito ringraziamento va a colleghi ed amici di altri settori scientifico - disciplinari, per il valore e

- ❑ gestione dell'interfaccia con gli organi territoriali della Pubblica Amministrazione;
- ❑ contabilità dei lavori.

Nelle realizzazioni di dimensioni medio – piccole, non è possibile affidare ciascuna di queste attività ad un responsabile specifico, parcellizzando in altrettante voci la commessa. L'incarico è affidato ad una o due persone che necessariamente devono essere competenti su tutti gli aspetti che compongono la costruzione. Nelle realizzazioni di maggior respiro, possono essere affidati più incarichi. Il direttore dei lavori ed il direttore del cantiere devono tuttavia essere in grado di interloquire con tutti gli operatori, e devono essere competenti pressoché su tutti i fronti. Pertanto è avvertita l'esigenza di una figura professionale, in grado di affrontare, sia i problemi di progettazione, sia i vari aspetti della costruzione, in particolare, la gestione del cantiere.

In tempi recenti, si sono manifestate esigenze di una più spinta industrializzazione e razionalizzazione del cantiere. I progettisti devono farsi carico di redigere un preciso capitolato, con tutte le specifiche necessarie, affinché nel cantiere siano utilizzati materiali di qualità, nel rispetto della sicurezza, e la costruzione proceda secondo procedure razionali e il più possibile standardizzate. A titolo di esempio, oggi le casseforme sono parte integrante del progetto esecutivo. Fino a qualche anno fa, ancor oggi nei piccoli cantieri, i casseri venivano realizzati mediante tradizionali impalcati lignei, chiodati, che richiedevano lunghi tempi di allestimento e disarmo. Oggi sono disponibili prodotti, tecnologicamente all'avanguardia, che si configurano come veri e propri sistemi integrati con la costruzione. Sono sistematicamente utilizzati nelle costruzioni di maggior respiro, impianti idraulici, sistemi di trasporto, centri commerciali, alberghi, costruzioni industriali.

Tra le esigenze, sempre più segnalate negli ultimi anni, in costruzioni industriali, impianti di trasporto e qualunque costruzione di una certa mole, è una forma gradevole che ben si integri con l'ambiente circostante. Si sono sviluppati nuovi materiali e, per quelli tradizionali, acciaio, vetro, legno, muratura, si sono sviluppate tecniche per la valorizzazione delle superfici. Anche il calcestruzzo armato ha subito un notevole rilancio, sia in opere di Ingegneria Civile, sia in infrastrutture, grazie alle possibilità espressive delle forme. I sistemi di casseforme consentono di dar corpo a facciate eleganti, figure spaziali plastiche e leggere. La razionalizzazione del cantiere ha imposto di stabilire punti di colloquio ravvicinato tra l'ingegnere civile e l'architetto di esterni. Si badi come non si tratti solo di trovare, nuovi ed interessanti, punti di contatto, su un piano prettamente culturale, fra esperti di diversa formazione, in quanto anche l'impatto economico sull'industria delle costruzioni è notevole.

Oggi l'intervento sull'esistente ha un fatturato sensibilmente superiore a quello delle costruzioni nuove. Anche la ristrutturazione degli impianti e delle abitazioni comincia a riconoscere i vantaggi dell'industrializzazione delle costruzioni. Le opere provvisorie sono entrate nel settore della ristrutturazione con attrezzature, in generale, più leggere e maneggevoli che, al limite, possono essere movimentate da un solo operatore. In questo campo, sulla spinta delle direttive europee, sono state riscritte le regole per il trattamento dei rifiuti. L'interesse è quello di ridurre la massa di detriti provenienti dalle ristrutturazioni (poco meno di ½ tonnellata all'anno pro capite) e di recuperare molto materiale riutilizzabile. In cantiere, si usano appositi gruppi di frantumazione e selezione, generalmente mobili, con i quali si ottiene un prodotto immediatamente riutilizzabile o destinato a successive trasformazioni. Questa politica richiede, come conseguenza, un trattamento primario degli inerti, per facilitare il recupero, dopo una demolizione.

I problemi di rilevamento e controllo sono, a questo livello, del tutto evidenti e sono parte indispensabile e

fondamentale del bagaglio formativo – culturale – professionale di un ingegnere civile, in quanto tale, ovvero capace di una visione generale dei problemi d'affrontare, così come essi sono stati enunciati in precedenza. Infatti l'integrazione con l'ambiente circostante, la gestione di sistemi integrati con la costruzione, l'intervento sull'esistente, il trattamento dei rifiuti, e così via non possono considerarsi disgiunti dai problemi di rilevamento e controllo, affrontati dalla cartografia numerica (a grandissima scala), dalla topografia di precisione, dalla fotogrammetria terrestre e ovviamente dal trattamento delle osservazioni. Prescindere dall'avvalersi di sistemi metrico – quantitativi offerti dalle discipline del rilevamento, significa inevitabilmente rinunciare a camminare sulla strada dell'industrializzazione, della standardizzazione ed, in altre parole, della modernità³.



Fig. A.1 – Cantiere per la realizzazione di un viadotto.



Fig. A.2 – Cantiere di demolizione.



Fig. A.3 – Effetti del sisma su un sovrappasso stradale

A.2 INGEGNERIA STRUTTURALE

Un'attenzione, più approfondita e specifica, in tema di progettazione, analisi, realizzazione e controllo di strutture portanti, fa convergere in un'unica area culturale attività di ricerca e competenze didattiche, relative a tutti i settori dell'Ingegneria Strutturale:

- ❑ aspetti di base legati allo studio del comportamento meccanico dei materiali e delle strutture;
- ❑ aspetti specifici relativi alle costruzioni in calcestruzzo armato e in acciaio;
- ❑ problemi della dinamica delle strutture e dell'Ingegneria Sismica nelle sue diverse accezioni;
- ❑ aspetti relativi al comportamento chimico dei materiali da costruzione ed alla loro durabilità,

trovando piena corrispondenza nella richiesta del mondo del lavoro, professionale ed industriale, che risulta consolidata, sia in ambito nazionale che europeo, su figure tecniche del tutto corrispondenti alla specializzazione offerta. I risultati conseguiti confermano l'elevato apprezzamento nei settori pubblico e privato dell'Ingegneria Civile. Inoltre agli ingegneri strutturisti, grazie alla formazione culturale con ampio spettro di competenze, vengono offerti altri interessanti sbocchi professionali, mostrandoci chiaramente l'interesse crescente di molti settori dell'ingegneria industriale, in quanto la vastità dell'offerta formativa permette loro di agire con sufficiente flessibilità.

³ La nuova normativa sui lavori pubblici (Legge n. 109 del 11.02.94 – Legge quadro in materia di lavori pubblici) affida al Progetto un ruolo notevolmente diverso da quello del passato, non consentendo né leggerezze né superficialità. Infatti l'attuale impostazione della legge, nel pretendere un progetto rigoroso tende ad escludere il ricorso alle famose "Varianti", dietro i cui aumenti di costi spesso si nascondeva una tangente. Il rigore di un progetto prende le sue mosse dal rigore delle informazioni su cui si basa ed, in particolare, dalla cartografia tecnica e dalla cartografia tematica, a grande o grandissima scala, in cui inquadrare l'opera.

L'Ingegneria Strutturale ha l'obiettivo primario di fornire un elevato grado d'approfondimento e di specializzazione, in linea con gli standard delle più qualificate scuole, riconosciute in ambito internazionale. A tal fine, essa fornisce competenze di base e capacità operative, nel campo dell'analisi e della progettazione di strutture portanti. In tale ambito, vengono trattate, sia tematiche generali, sia argomenti relativi alla progettazione strutturale di costruzioni civili, quali edifici (civili ed industriali), ponti, dighe, gallerie, opere di fondazione e di sostegno. Il percorso formativo tiene anche conto di problematiche strutturali presenti in ambiti diversi dall'Ingegneria Civile tradizionale. Infatti le competenze metodologiche acquisite, come già detto in precedenza, ad ampio spettro, consentono di operare, pressoché in tutti i campi in cui sia presente la problematica strutturale, quali i settori aerospaziale, navale, meccanico, nucleare, dell'impiantistica industriale, petrolifero, minerario e dei trasporti.

La tematica strutturale si proietta anche verso significativi sviluppi legati a tecnologie emergenti ed all'introduzione di materiali innovativi (compositi, laminati, calcestruzzi ad alte prestazioni). Nuove problematiche strutturali di interesse industriale ed economico crescente stanno poi sorgendo, in campi assai diversificati che vanno ad esempio dalla biomeccanica all'interazione fluido – struttura, dai sistemi accoppiati (materiali plurifase) all'Ingegneria Ambientale, dalla diagnostica delle strutture danneggiate al ricupero architettonico – monumentale. Infine l'Ingegneria Strutturale ha dato storicamente origine e tuttora alimenta, con sempre nuovi sviluppi ed applicazioni, i metodi computazionali (in particolare per elementi finiti) che, negli ultimi decenni, hanno rinnovato sul piano metodologico l'intero campo dell'Ingegneria e delle Scienze Applicate, e che stanno alla base della progettazione assistita da mezzi informatici, oggi giorno di uso comune, grazie alle potenzialità offerte dalla tecnologie dell'informazione.

Se la problematica del rilevamento e del controllo è stata, da sempre, presente nell'Ingegneria Civile con i problemi di posizionamento, tracciamento, accatastamento, collaudo e controllo, essa non è certamente secondaria all'interno dell'Ingegneria Strutturale. Infatti in questo campo, il problema del collaudo e del controllo trova uno dei suoi campi d'elezione, dove massima è l'attenzione e la cura dedicata alle singole operazioni, in termini di accuratezza, precisione ed affidabilità. Tutto ciò coinvolge, tanto tecniche specifiche della topografia di precisione, quanto metodologie e procedure di trattamento delle osservazioni. La prima disciplina è diretta al controllo statico delle strutture, per determinarne situazioni di degrado, usura o dissesto, anche ai fini di restauro. Il secondo, oltre a completare con l'eleganza del calcolo l'analisi tecnica, ha vita propria nel controllo di qualità, esteso ai materiali da costruzione, agli elementi costruttivi, alle tipologie edilizie e così via ⁴.



Fig. A.4 – Ponte strallato.



Fig. A.5– Edificio alto.

La fotogrammetria terrestre, nell'ambito dell'Ingegneria Strutturale, si affianca alla topografia di precisione ed

⁴ L'onda emozionale suscitata da recenti crolli di fabbricati (Lecce, Palermo, Roma) sta consolidando una nuova e pressante richiesta di verifica del patrimonio edilizio nazionale. Il C.N.I. (Consiglio Nazionale Ingegneri) si è già attivato per la stesura di un facsimile di "libretto di controllo" che accompagnerà l'intera vita degli edifici. Si comprende come lo sviluppo di questo settore approderà al progetto di fabbricato monitorato ab – initio" ed alla conseguente richiesta di specialisti, capaci di coniugare misure di sforzi e di deformazione.

è, a sua volta, completata sempre dal trattamento delle osservazioni. Infatti la fotogrammetria terrestre ha ormai acquisito le capacità operative per effettuare rilevamenti, a grandissima scala, di elevata precisione. Inoltre l'avvento e lo sviluppo, rapidi ed impetuosi, delle tecnologie digitali hanno fatto sì che nuove modalità d'acquisizione rendessero la tecnica fotogrammetrica di uso più comune e relativamente facile, e che innovative sorgenti di dati (quali il sistema laser scanning e la telemetria radar – interferometrica) estendessero qualitativamente e quantitativamente l'insieme delle informazioni acquisibili. Come evidente, tutto ciò si colloca nella più ampia categoria dei controlli non – distruttivi cui l'insieme delle discipline del rilevamento e del controllo fornisce abbondanza di mezzi e determina, fra l'altro, la centralità del trattamento delle osservazioni, all'interno dello stesso campo di discipline.

A.3 INGEGNERIA GEOTECNICA

L'Ingegneria Geotecnica è quella branca, relativamente nuova, dell'Ingegneria Civile che si occupa di tutti quei problemi che coinvolgono i materiali geologici, cioè le terre e le rocce:

- ❑ di per se stessi (stabilità di versanti e pendii, scavi, miniere a cielo aperto, subsidenza di grandi aree, costruzioni in materiali sciolti: dighe in terra, discariche o rilevati stradali);
- ❑ nella loro interazione con le strutture (fondazioni superficiali e profonde, opere di sostegno, rivestimenti di gallerie, condotte interrato, dighe, paratie, costruzioni marittime);
- ❑ in condizioni statiche o dinamiche (sollecitazioni nel terreno indotte da terremoti, vento, moto ondoso, macchine vibranti).

Quello che rende peculiare lo studio del comportamento meccanico di questi materiali e delle strutture che con essi interagiscono è, da un lato, il fatto che i terreni sciolti possono essere visti come aggregati di particelle solide, immerse in uno o più fluidi (aria e acqua, ma anche olii minerali, liquidi contenenti sostanze inquinanti che migrano nel terreno), dall'altro, il fatto che le rocce lapidee sono pervase da un complesso sistema di discontinuità (giunti e faglie). Pertanto i terreni e le rocce non sono materiali solidi, ma hanno caratteristiche particolari che ne giustificano uno studio separato, in una disciplina scientifica che coniuga la scienza delle costruzioni e l'idraulica, per giungere ad una previsione del comportamento del terreno (e delle opere che con esso interagiscono): la geotecnica e le sue tecniche applicate.

Nel caso delle terre, ad esempio, materiali porosi per eccellenza, per predire il comportamento sotto carichi assegnati del terreno (o delle strutture che con esso interagiscono) è necessario schematizzare il terreno come un materiale particolare, ottenuto sovrapponendo due continui sulla stessa regione dello spazio. Il primo (solido) rappresenta lo scheletro del terreno (i granelli), mentre il secondo (fluido) rappresenta, nel caso più comune, l'acqua che filtra attraverso i pori. Nel caso delle rocce è invece il comportamento di interfaccia lungo le discontinuità preesistenti, a sua volta dipendente dalla pressione dell'acqua, ad influenzare, di fatto, il comportamento dell'intero ammasso roccioso. Lo schema concettuale, legato al terreno come sovrapposizione di due continui, e la teoria della plasticità con incrudimento, nata originariamente per descrivere il comportamento dei metalli, ma giunta a maturità proprio per lo studio del comportamento delle terre, consentono di riprodurre matematicamente (e numericamente) il comportamento osservato.

Compito primario dell'ingegnere geotecnico è la stesura della relazione geotecnica che deve accompagnare,

per legge, i disegni e le relazioni progettuali per qualunque tipo di opera. Essa deve essere tesa alla determinazione di un modello geotecnico del terreno che interagisce con la struttura che si vuole progettare. Mediante la progettazione, esecuzione ed elaborazione di prove in sito od in laboratorio, essa deve portare alla caratterizzazione meccanica (determinazione di resistenza, deformabilità, permeabilità, coefficiente di consolidazione) dei terreni, delle rocce e delle interfacce tra roccia e roccia e tra terreno ed opere strutturali (fondazioni, pali, opere di sostegno), oltreché alla definizione della geometria di calcolo del terreno. E' importante notare che lo stesso modello geotecnico influenza ed è fortemente influenzato dal tipo di opera che si vuole progettare; pertanto per giungere ad un corretto dimensionamento di quest'ultima, progettazione strutturale ed analisi geotecnica del sottosuolo non sono elementi disgiungibili.

Inoltre sono di competenza dell'ingegnere geotecnico la progettazione e la realizzazione di fondazioni, opere di sostegno, scavi (per centrali in caverna, miniere, cave), gallerie, dighe in terra, discariche; la verifica di stabilità e la progettazione degli interventi di stabilizzazione di versanti. Un contributo importante è dato, nel corso della realizzazione di grandi opere, al consolidamento di monumenti storici, alla progettazione delle palificate di grandi ponti o di strutture off-shore per l'estrazione di greggio, alla progettazione di gallerie, alla stabilizzazione d'aree franose. Negli ultimi anni, è poi aumentata l'interazione con altri settori dell'ingegneria: stoccaggio e trattamento di polveri, ceneri, materiali granulari di vario genere (carbone, polveri medicinali, grano, riso, ecc.) che possono interessare l'industria mineraria, meccanica, chimica, farmaceutica, alimentare; stabilizzazione dei pozzi di perforazione profondi, conservazione di scorie radioattive in gallerie scavate nel granito, nell'argilla, in miniere di salgemma.

Le misure geodetiche (grazie al sistema GPS ed agli strumenti topografici integrati) e la fotogrammetria aerea e/o terrestre (inclusi il sistema laser scanning e la telemetria radar – interferometrica) sono tecniche complementari che permettono all'ingegnere geotecnico di fruire delle informazioni, date dalla cartografia tecnica e dalla cartografia tematica, a grande o grandissima scala. In questo ambito, i modelli digitali delle altezze (DEM), del terreno (DTM) e delle superfici (DSM) costituiscono importanti prodotti raster, complementari alla cartografia vettoriale, come quest'ultima, da inserire in sistemi informativi geografici (GIS) o territoriali (LIS) dedicati. Essi possono poi contenere informazioni appropriate ed attendibili sul comportamento meccanico delle terre, delle rocce e dei giunti, in condizioni di carico complesse, sulla determinazione degli spostamenti del terreno (e delle strutture che si fondano su di esso), sulle pressioni dell'acqua nei pori e sulle spinte sulle strutture, sui problemi geotecnici ambientali ⁵.

A.4 INGEGNERIA IDRAULICA

L'Ingegneria Idraulica costituisce una delle prime e più rilevanti discipline tecnico – scientifiche, sviluppate dall'uomo e, pur non presentando un'accelerazione paragonabile ad altri settori ingegneristici, continua a permanere basilare nell'organizzazione della vita civile ed assume ulteriori valenze, in funzione dei problemi e delle esigenze che si vanno a mano a mano evidenziando. Infatti accanto ai tradizionali ambiti relativi:

⁵ Ancora l'onda emozionale suscitata da dissesti enormi franosi (Ancona, Valpola in Valtellina, Sarno, Valli Lecchesi e Bergamasche: Bondo di Colzate / Brembilla / Cortenova, ecc.) ha consolidato una nuova e pressante richiesta di controllo del territorio urbanizzato e non. La nuova normativa sulla difesa del suolo (Legge n. 183 del 18.05.89 – Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo, e Decreto Legge n. 180 dell'11.06.98 – Misure urgenti per la prevenzione del rischio idrogeologico ed a favore delle zone colpite da disastri franosi nella regione Campania) istituisce le Autorità di Bacino e stabilisce il potenziamento delle strutture tecniche per la difesa del suolo e la protezione dell'ambiente. Tutte le operazioni di geo – monitoraggio prendono le loro mosse dal rigore delle informazioni su cui si basa ed, in particolare, dalle misure geodetiche e dalla fotogrammetria aerea e/o terrestre, e conducono alla realizzazione di sistemi informativi geografici o territoriali dedicati. Inoltre in questo caso, come nel successivo riguardante l'Ingegneria Idraulica e gli enormi dissesti idrogeologici cui deve purtroppo fare fronte, il trattamento delle osservazioni dà preziosi contributi alle analisi spaziali, temporali o spazio / temporali, proprie della geostatistica.



Fig. A.6 – Movimento franoso.

Fig. A.7 – Galleria ferroviaria.

Fig. A.8 – Muro di sostegno in terra.

- ❑ alla captazione, convogliamento, uso e smaltimento della risorsa idrica (acquedotti e fognature, irrigazioni e bonifiche), ne sono consolidati vari altri, quali:
- ❑ l'idrologia e l'idrometria;
- ❑ la protezione idraulica del territorio;
- ❑ il trattamento delle acque di approvvigionamento e dei reflui;
- ❑ l'idroenergetica;
- ❑ l'idraulica fluviale e marittima;
- ❑ lo studio e la protezione delle acque sotterranee.

Va sottolineata la vocazione naturale del settore che, oltre a comprendere evidentemente tutto il ciclo idrologico e le sue implicazioni tecniche ed ambientali, può raggiungere scale molto ridotte, fino a fornire supporto a tecniche mediche e sanitarie. Un circuito con una pompa, ad esempio, lo si può ritrovare in una vastissima e variegata casistica: sollevamento acquedottistico, bonifica idraulica, irrigazione, impiantistica antincendio, circuiti di raffreddamento e condizionamento, impianti di riqualificazione dell'energia elettrica.

Sussistono poi campi, in maggiore o minore sovrapposizione, che possono essere ricondotti ad un approccio più specifico della meccanica dei fluidi: lo sfruttamento e il trasporto di fluidi, quali idrocarburi, l'impiantistica industriale, ecc. Anche nel settore strutturale, ricorrono diverse situazioni in cui la conoscenza dei fenomeni idraulici (spinte statiche o dinamiche, moti di filtrazione, sottopressioni) concorre alla corretta formulazione e soluzione dei problemi. La complessità e rilevanza degli argomenti affrontati, in questo settore ingegneristico, sono tali da richiedere un continuo aggiornamento formativo e professionale. Nel contempo, è richiesta una notevole versatilità per un lavoro interdisciplinare, da sviluppare con specialisti: ingegneri di altra estrazione, tecnici del territorio, esperti in settori giuridico – economici, igienisti, chimici e altri, nella libera professione, come pure alla dipendenza di imprese costruttrici o svolgendo la propria attività presso enti pubblici.

Nell'attività di progettazione si deve valorizzare la disponibilità di procedimenti, programmi, dati, osservazioni ed esperimenti, al fine di ottenere un prodotto soddisfacente ed adeguato, allo stato dell'arte ed alle aspettative del committente. La buona teoria, accoppiata ad un'educata sensibilità fisica (conoscenza della modellistica e delle implicazioni misuristiche), costituisce sicuramente il presupposto. Nonostante la varietà dei soggetti, ricadenti sotto la comune denominazione di ente pubblico (Regioni, Province, Comuni, Enti di bonifica, organi di sorveglianza), si può individuare una prevalenza dell'aspetto di controllo, della progettazione sviluppata da terzi, della gestione delle opere e degli interventi, della manutenzione e della sicurezza, della produzione di normativa. L'operatività di un'impresa richiede una particolare capacità di affrontare e risolvere situazioni tecniche ed organizzative, la conoscenza dei materiali, dei dispositivi, delle attrezzature e degli strumenti a supporto dell'esecuzione e del controllo delle varie operazioni.

L'attuale settore trainante dell'Ingegneria Idraulica è quello dell'idraulica ambientale, intendendo con questo termine lo studio, lo sfruttamento, la salvaguardia e il recupero della risorsa idrica e dell'ambiente in cui essa si trova e con il quale, indissolubilmente e reciprocamente, interagisce. Si può pensare alla normativa relativa alla riorganizzazione e razionalizzazione dell'intero ciclo idrico (captazione e distribuzione – collettamento – depurazione), ai problemi di salvaguardia idrogeologica del territorio, alla codificazione dei minimi deflussi idrici vitali per i corsi d'acqua, alla salvaguardia delle falde idriche e alla loro eventuale bonifica. Si tratta di problemi molto rilevanti e molto articolati che spesso richiederanno tempi lunghi di elaborazione ed attuazione. Proprio per questo e per le ingenti risorse pubbliche e private che coinvolgono, è necessario che gli specialisti del settore siano, oltretutto, dotati di una certa passione e propensione alla loro specialità, abbiano seguito un percorso formativo serio, equilibrato e multidisciplinare.

In questo settore, accanto alle discipline del rilevamento e del controllo, già illustrate in precedenza ed, in particolare, alle misure geodetiche (principale, il sistema GPS), alla topografia di precisione, alla fotogrammetria aerea e/o terrestre (comprendendo, in essa, anche il sistema laser scanning e la telemetria radar – interferometrica) ed ai sistemi informativi geografici (GIS) o territoriali (LIS), il telerilevamento offre certamente un contributo di primaria importanza. Si osservi, a riguardo, come oggi il telerilevamento (incluso il cosiddetto proximal sensing) presenti tutta una vasta gamma di sensori multispettrali, capaci di acquisire informazioni su pressoché tutte le bande dello spettro elettromagnetico, sia ad alta definizione che per larghe coperture. La fotointerpretazione di immagini, sequenze e mappe fa sì che, dai dati acquisiti, si ricavano carte (tecniche o tematiche) di base, derivate ed elaborate, a loro volta, capaci di riempire vari livelli dei sistemi informativi geografici (GIS) o territoriali (LIS) dedicati ⁶.

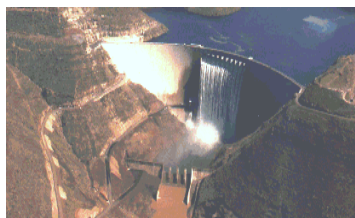


Fig. A.9 – Diga ad arco a doppia curvatura in calcestruzzo.



Fig. A.10 – Condotta interrata.



Fig. A.11 – Tubazione interrata per oleodotti e gasdotti.

A.5 INGEGNERIA DELLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO

L'Ingegneria delle Infrastrutture di Trasporto è oggetto di una rivoluzione relevantissima e molto dinamica. Da soggetti interamente pubblici, si sta passando ad una struttura di soggetti privati che operano in concorrenza, se pur regolati da logiche pubbliche. Questa evoluzione ha rilevanza soprattutto gestionale, ma non mancheranno certo riflessi, anche sostanziali, sulle logiche di progetto e sulle scelte tecnologiche. Nella definizione di una figura tecnico – professionale specifica, si perseguono pertanto tre linee culturali e formative integrate, riferibili alle seguenti componenti:

⁶ Sempre l'onda emozionale suscitata da dissesti enormi idrogeologici (Stava, Versilia, Soverato, Val Bormida, ecc.) ha consolidato una nuova e pressante richiesta di controllo del territorio urbanizzato e non. La nuova normativa sul ciclo delle acque (Leggi n. 36 del 5.01.94 – Disposizioni in materia di risorse idriche, e n. 37 del 5.01.94 – Norme per la tutela ambientale delle aree demaniali dei fiumi, dei torrenti, dei laghi e delle altre acque pubbliche) considera tutte le acque superficiali e sotterranee una risorsa da salvaguardare e da utilizzare con criteri solidali. Tutte le operazioni di idro – monitoraggio prendono le loro mosse dal rigore delle informazioni su cui si basa ed, in particolare, dalle misure geodetiche e da fotogrammetria e/o telerilevamento, e conducono anche in questo caso alla realizzazione di sistemi informativi geografici o territoriali dedicati.

- ❑ un'ampia specificità teorica e applicativa nel settore della costruzione di strada, ferrovie ed aeroporti e su altri temi fondamentali nel solco tradizionale dell'Ingegneria Civile;
- ❑ un diffuso ed approfondito radicamento ed una completa formazione teorica, tecnica e professionale nel settore della pianificazione, organizzazione e gestione dei trasporti.

L'innovazione tecnologica nei trasporti e la diffusione fisica delle reti infrastrutturali hanno costituito il fattore, forse più rilevante, della prima rivoluzione industriale, nel diciannovesimo secolo, con la tecnologia ferroviaria e la trazione a vapore. Nel ventesimo secolo, una seconda rivoluzione industriale, quella della produzione in grande serie e dei consumi di massa, ha ancora avuto a riferimento i mezzi di trasporto, questa volta su gomma (il "fordismo").

In tempi più recenti, la spinta all'integrazione dei mercati si è fortemente appoggiata allo sviluppo dei trasporti: ciò vale sia per l'Unione Europea, dove sono risultati decisivi i trasporti terrestri, sia per i fenomeni di globalizzazione planetaria, consentiti dai bassissimi costi del trasporto via mare. Nella figura operativa e di mercato degli ingegneri, a vari livelli, impegnati nel settore dei trasporti, coesistono diverse peculiarità, alcune li uniscono ad altri settori dell'Ingegneria Civile (della quale peraltro costituiscono parte integrante e significativa) ed altre li differenziano significativamente. La base comune è costituita dalle attività di progettazione, costruzione e collaudo delle opere, dove l'attività dell'ingegnere dei trasporti non si differenzia, se non per la tipologia dei lavori, dagli altri settori civili. Gli elementi differenzianti risiedono invece nella finalità organizzativa e di gestione quotidiana dei servizi di trasporto, nonché nella loro pianificazione e programmazione a grande e piccola scala territoriale.

Anche gli aspetti economici e finanziari appaiono di crescente rilevanza, sia in un'ottica pubblica (i sistemi di trasporto devono rispondere positivamente a test del tipo costi – benefici), sia in un'ottica privata: l'autofinanziabilità di alcune opere è oggi un'esigenza crescente e i processi di privatizzazione, in atto, lo mettono in evidenza. In quest'ottica, accurate previsioni di domanda e di redditività divengono strumento essenziale e, sul piano più tecnologico, le esigenze di sicurezza dei sistemi e delle infrastrutture vedono una rilevanza sempre maggiore. Le frontiere della tecnologia, concernono l'uso di strumenti informatici, sia per la progettazione, sia per la gestione di sistemi di trasporto, con un esteso uso di modelli di simulazione. La modellistica del traffico sta inoltre divenendo capace di integrare fenomeni economici e territoriali relativi alla mobilità. Alle tecniche tradizionali di pianificazione pubblica dei trasporti, si stanno affiancando approcci di regolazione economica pubblica di soggetti privati, che operano con tecniche finanziarie innovative.

Sul piano più strettamente attinente alle opere fisiche, le frontiere più rilevanti concernono l'informatizzazione delle reti, sia stradali che ferroviarie (per gestire i flussi e la sicurezza), e la recente evoluzione dei sistemi ferroviari, verso le alte velocità e capacità. Il ruolo tradizionale di progettista e costruttore di strutture fisiche si è esteso a quello del pianificatore di sistemi di trasporto e, da quest'ultimo, sta emergendo la figura del regolatore di settore. Questi è un soggetto capace di valutazioni tecniche ed economiche, in vista della gestione e aggiudicazione di gare complesse che concernono la costruzione, l'esercizio e la gestione manutentoria di infrastrutture specifiche o interi sistemi (ad esempio, un servizio ferroviario regionale). L'ingegnere dei trasporti trova poi collocazione naturale nelle imprese che costruiscono veicoli, sia per gli aspetti tradizionali di interfaccia tra veicoli e infrastrutture, sia per le più innovative dimensioni interdisciplinari che il settore richiede (ambiente, sicurezza, previsioni di domanda).

Anche l'Ingegneria delle Infrastrutture di Trasporto rivolge alle discipline del rilevamento e del controllo

pressanti ed impegnative richieste di contributo. La navigazione terrestre, marittima, aerea (e spaziale) localizza, con precisione, il veicolo in moto, permette un ausilio prezioso alla guida e dà informazioni sul traffico e la circolazione. Infatti il sistema GPS, la telemetria radar, il sistema laser scanning e le telecamere, poste a bordo dei veicoli, sono tutti strumenti capaci di concorrere alla guida assistita. A tutto ciò, si aggiungono i sistemi informativi geografici (GIS) e territoriali (LIS), capaci di dare informazioni sui siti visitati, in termini di coordinate o quantomeno d'indirizzi. D'altra parte, sul versante della costruzione d'infrastrutture e sulla loro manutenzione, le misure geodetiche, la topografia di precisione e la fotogrammetria aerea e terrestre, come in tutti i settori dell'Ingegneria Civile, concorrono alla raccolta delle informazioni necessarie, con le metodologie e le procedure proprie delle discipline del rilevamento e del controllo ⁷.

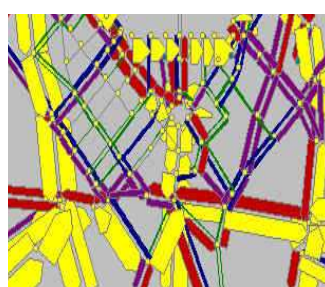
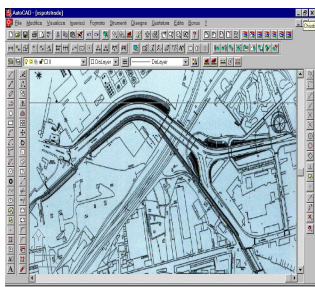


Fig. A.12 – Progetto automatizzato di un'infrastruttura stradale .

Fig. A.13 – Infrastruttura stradale in esercizio.

Fig. A.14 – Grafo di una rete di trasporti con diagrammi di traffico.

A.6 UNA NUOVA DISCIPLINA PER L'INGEGNERIA CIVILE: LA GEOMATICA

Nel campo dell'acquisizione, dell'elaborazione e della restituzione di informazioni metriche e tematiche, nuovi studi, sia sperimentali (acquisizione dei dati), che modellistico – informatici (trattamento delle osservazioni), sono incentivati grazie alle nuove possibilità, indubbiamente, aperte dalle nuove tecniche di rilevamento, quali:

- ❑ la geodesia fisica (sistemi di riferimento, calcolo del geoide), la geodesia spaziale (sistema GPS con il suo uso cinematico) e la geodesia inerziale (piattaforme inerziali) con la navigazione terrestre, marittima, aerea e satellitare;
- ❑ la topografia automatica (sistema “laser – scanning”, strumenti topografici integrati, strumentazione speciale per il controllo);
- ❑ la fotogrammetria digitale, il telerilevamento, incluso il cosiddetto proximal sensing, con la fotointerpretazione di immagini, sequenze e mappe (sistemi ottici satellitari: NOAA, LANDSAT, SPOT, IKONOS, oppure aerei o terrestri: camere Three – lines, CCD e nel campo delle microonde: SAR con il suo uso interferometrico);
- ❑ la cartografia tecnica e la cartografia tematica (entrambe su base numerica), ed i sistemi informativi a referenza spaziale: geografici (GIS) e territoriali (LIS).

⁷ In relazione alle esigenze prioritarie del raggiungimento di obiettivi UE, in tema di sicurezza stradale, l'Ispettorato per la Circolazione e la Sicurezza Stradale del Ministero dei Lavori Pubblici ha predisposto uno studio, a carattere pre – normativo, delle Norme Tecniche per la Disciplina della Costruzione e Manutenzione delle Infrastrutture Stradali. In esso, è espressamente richiesta la presenza di un progettista, esperto della materia, le cui conoscenze e capacità complementari spaziano nelle diverse discipline dell'ingegneria civile fra le quali la moderna topografia e cartografia ha parte rilevante.

Le discipline geodetiche e cartografiche sono state, da sempre, discipline del calcolo, rinomate per la loro accuratezza, precisione ed affidabilità. Astronomi, geodeti e cartografi sono fra i fondatori di varie discipline della matematica (applicata) fra le quali una delle più importanti è la statistica. Il trattamento delle osservazioni copre l'intero settore dei dati di misura geotopofotocartografici ed ha avuto, per lungo tempo, una sua relativa unitarietà. Tuttavia di recente, il prevalere nella geodesia e nella topografia (riassorbita, nello stesso ambito, dall'avvento delle misure geodetiche ed, in particolare, geospaziali) di un interesse per le scienze della terra (e, fra esse, principe la geofisica) e, di contro, il prevalere nella cartografia, nella fotogrammetria e nel telerilevamento di un'attrazione verso le scienze dell'informazione (e, fra esse, principe la geomatica) sta portando a differenziazioni significative, oltreché entro certi limiti, come effetto di retroazione, ad un cambio di natura delle discipline stesse e d'attenzione verso gli oggetti d'interesse.

I campi d'applicazione delle metodologie e procedure sono ampi e variegati, ed innumerevoli sono le discipline coinvolte, fruitrici di possibili ricadute positive. Per quanto il complesso delle suddette metodologie e procedure abbia una sua relativa unitarietà, significative differenziazioni si presentano, in corrispondenza alle diverse e differenti applicazioni. L'estensione dello spazio delle scale e la vastità dei campi d'applicazione fanno sì che moltissime e molto differenziate fra loro siano le discipline coinvolte. Tutti i settori dell'ingegneria civile, edile e per l'ambiente ed il territorio (come pure molti settori dell'ingegneria industriale) beneficiano di possibili ricadute positive. Inoltre altri importanti settori sono fruitori degli stessi vantaggi: dalle scienze della terra alle scienze naturali ed ambientali, dall'urbanistica all'architettura, dall'architettura d'interni al disegno industriale, dall'archeologia alle arti figurative, dalla medicina alla chimica. In sintesi, tutte le discipline che abbisognano di informazioni metriche e/o tematiche.⁸

Le discipline del rilevamento sembravano ormai consolidate ed anche esaurite, come possibilità di ampliamento e di approfondimento. In campo geodetico, topografico fotogrammetrico e cartografico, ogni problema sembrava risolto, ogni esigenza soddisfatta. La rivoluzione culturale, scientifica e tecnologica, provocata insieme dalla conquista dello spazio e dalle tecnologie dell'informazione, sia sul versante della strumentazione, sia su quello della teoria dei modelli e dell'informatica grafica, ha dischiuso nuovi orizzonti applicativi. Nuove tecniche di rilevamento hanno trasformato profondamente le metodologie di acquisizione di informazioni metriche e tematiche; contemporaneamente l'esigenza di interpretare ed integrare fra loro le informazioni acquisite è divenuta fondamentale. Per affrontare queste nuove frontiere, occorre un modo nuovo di procedere e di considerare le cose, una nuova filosofia comportamentale, quasi una nuova disciplina: la geomatica.

PARTE II – FORME DI MODELLAZIONE DIGITALE

2.1. RESTITUZIONE E RAPPRESENTAZIONE

La necessità di documentare gli oggetti, riproducendone la continuità della superficie, con i suoi cromatismi, i motivi geometrici, le figurazioni prospettiche, gli aspetti del degrado porta a considerare, oltre alle classiche

⁸ Negli ultimi decenni, le discipline del rilevamento e del controllo sono rimaste orfane della Commissione Geodetica Italiana: un organo d'indirizzo della ricerca applicata nel settore e della politica geo – topo – foto – cartografica. Questa perdita è tanto più grave, quando si constati la presenza di Commissioni identiche in moltissimi paesi, quasi tutti quelli della UE o prossimi ad aderirvi, e molti altri ancora, fra i più sviluppati. Un benemerito tentativo di porre parziale riparo, ad un così grave danno, può essere individuato nell'Intesa Stato Regione ed Enti Locali, e nei suoi Comitati, Sotto – Comitati e Gruppi di Lavoro "ad hoc" cui è stato dato il compito di redigere norme tecniche, competenti ed attuali, per l'esecuzione di lavori geo – topo – foto – cartografici. In questa sede, è innanzitutto doveroso ricordare come i primi tre sulle tematiche: "Reti, GPS e Geoide", "Fotogrammetria, Laser – scanning, DTM ed Ortoimmagini", "Cartografia Numerica e GIS / LIS", abbiamo sviluppato un lavoro eccellente. Purtroppo sembra che, negli ultimi due anni, anche queste attività si siano un po' arenate o, in qualche caso, addirittura fermate. Veti, incompetenza, gelosie ... difficile dire; resta l'urgenza e l'importanza di riprendere e continuare un'azione certamente positiva. Non è una questione di risorse, ma una questione di cultura!

forme di restituzione della fotogrammetria, una serie più ampia di visualizzazioni. Tradizionalmente la fotogrammetria produce restituzioni 2D (carte, fotopiani, ortoimmagini, ecc...) che presentano notevoli limiti per molte applicazioni, per la difficoltà di documentare, in modo chiaro e conveniente, tutte le informazioni legate all'oggetto rilevato. Ad esempio, se per la localizzazione di un particolare architettonico, in un monumento, è richiesta una restituzione 2D, per la sua ricostruzione è necessario riprodurre il modello solido 3D. Con il crescente sviluppo della strumentazione hardware e software, legata alla Computer Graphics, si è oggi in grado di affrontare la visualizzazione e la manipolazione di oggetti tridimensionali.

L'applicazione dell'immagine raster, nell'ambito di visualizzazioni metriche (di tipo fotorealistico) può avvenire attraverso varie procedure, originate dal concorso della tecnica fotogrammetrica e della Computer Graphics, ben relazionate alla morfologia dell'oggetto e agli effetti 2D e 3D che si vogliono garantire nell'approccio conoscitivo. Questo può trarre significativo vantaggio dall'uso dell'immagine, per le maggiori possibilità di lettura ed interpretazione visiva offerte all'utilizzatore (tra cui la possibilità di valutare l'impatto di ipotesi progettuali con l'ambiente reale, oppure di integrarne la conoscenza con altri dati di natura diversa). Queste novità stanno avendo e, sempre più, avranno una ricaduta sulle metodologie di progetto nel campo dell'ingegneria, dell'architettura, dell'urbanistica e della modellistica ambientale.

Per contro, le rappresentazioni di tipo fotorealistico, basate sull'uso diretto dell'immagine (immagini ortogonalizzate, referenziate ed in scala, modelli di superfici, draping (texture mapping) cioè sovrapposizione di ortoimmagini sul DEM⁹) permettono visualizzazioni, dove di contro sono presenti densità eccessive del dettaglio informativo e irregolarità geometriche, correlate alla volumetria ed al modello numerico dell'oggetto. A questo proposito, risulta chiaro dal significato della parola rappresentazione, *raepresentatio* in latino, cioè presentazione della realtà in modi differenti, che si cerca di ottenere non una copia della realtà, ma una mediazione fra la realtà ed i dati acquisiti, mediante linguaggi differenti (numerico, grafico, ecc.). E' importante riuscire a creare un'interfaccia, in grado di gestire i flussi di informazioni in ogni direzione (dai dati alla sintesi, da un piano sintetico all'analisi), soprattutto in quelle applicazioni che interessano la gestione di grandi quantità di dati, per riuscire ad integrare i differenti piani di informazioni ed ottenere una visione completa della realtà, con tutte le sue sfumature. Mentre le tecniche, per estrarre informazioni dalle immagini e ricostruire la forma di un oggetto, ricadono nell'ambito delle procedure fotogrammetriche, automatiche e non, le tecniche, per gestire ed abbinare il colore a tale forma, si rifanno invece alla Computer Graphics.

Data la gran varietà di oggetti da rilevare, in particolare, in architettura, differenti sono le forme di restituzione di un rilevamento. Per molte applicazioni e per architetture pressoché piane, un fotopiano può essere la soluzione più semplice e più adeguata. Tuttavia se la superficie oggetto non può essere approssimata ad un piano, oppure ad una superficie sviluppabile su un piano (cilindro, cono, ecc.) o ad una sequenza di piani paralleli (questo è il caso, per lo più, di oggetti come statue, basso rilievi, architetture complesse), allora è necessario ricorrere ad un raddrizzamento differenziale che richiede di ricostruire, dapprima il DEM dell'oggetto, per generarne poi l'ortoimmagine.

L'ortoimmagine è realizzata attraverso un ciclo operativo nel quale i problemi maggiori risultano concentrati soprattutto nella fase di acquisizione dell'informazione morfologica (discretizzazione del DEM). Essa

⁹ Il DEM o Modello Digitale delle Altezze è costituito da una griglia regolare di punti X, Y che associa una quota a ciascun nodo della griglia. Una sua generalizzazione è il DSM o Modello Digitale di Superficie che, costituito da una nuvola di punti (il più regolare possibile), associa una quota e le corrispondenti coordinate planimetriche (X, Y) a ciascun nodo della griglia. Un'altra generalizzazione del DEM è il DTM, dove al posto della quota è presente un'altra variabile a referenza spaziale e, benché meno impiegati, è ovviamente possibile generalizzare anche il DSM.

garantisce il supporto per l'ortogonalizzazione e consente la lettura spaziale della posizione dei singoli pixel immagine, attraverso proiezioni ortogonali sopra una triangolarizzazione (vettoriale) o per cattura dei pixel prossimi di un DEM in forma raster. D'altra parte, è evidente che la proiezione di una superficie su un piano non è il modo più adatto, per rappresentare un generico oggetto che nella realtà ha un andamento curvilineo. Di conseguenza, la soluzione migliore sarebbe quella di rappresentarlo su una superficie sviluppabile.

Il processo operativo che genera un'immagine ortogonalizzata e referenziata digitale si può concretizzare nella descrizione vettoriale, ottenuta per sovrapposizione in monorestituzione. La tecnica monoscopica è interessante, semplice ed economica; essa consente all'utilizzatore finale (non specialista) del prodotto fotogrammetrico, di acquisire autonomamente informazioni tridimensionali di tipo geometrico e descrittivo. Se l'ortoimmagine che si ottiene non risulta essere ancora la descrizione più adeguata per rappresentare l'oggetto, l'alternativa vantaggiosa è il modello solido ed eventualmente il draping (texture mapping)¹⁰.

Un'altra efficace alternativa all'immagine, nel caso che l'oggetto indagato sia ricco di dettagli, può risultare la cosiddetta stereocoppia digitale orientata, cioè un'entità operativa costituita da due immagini stereoscopiche più i dati di orientamento. La coppia può essere così richiamata dall'archivio, mediante strumentazione appropriata, dotata di un sistema con visore stereoscopico. Per l'analisi e lo studio delle architetture, non bastano più i prospetti e le piante, di tipo grafico, alle varie scale e su supporto cartaceo. Oggigiorno si ricerca, sempre più, una restituzione numerica che esprima il rilevamento, mediante coordinate, in modo da potersi svincolare dalla rigidità di un'unica restituzione grafica, ed assemblando le varie parti dell'opera rilevata, per poterla visualizzare prospetticamente e dinamicamente.

Il prodotto raster fotogrammetrico va ormai a sostituire i vecchi prodotti analogici bidimensionali, poco interpretabili e riproducibili, con un documento tridimensionale dall'utilizzo versatile ed interattivo che può costituire, insieme con gli elaborati derivabili (viste 3D, texture mapping), una valida alternativa per l'analisi metrica e tematica dell'oggetto studiato. Resta da sottolineare l'esigenza di utilizzare hardware dalle risorse elevate, per garantire, nelle fasi di elaborazione, visualizzazione (fotografica) e nel trasferimento dell'informazione, risultati più che accettabili. E' altresì necessario consentire di creare ipertesti ed utilizzare tecniche multimediali che trovano la loro utilità, oggi più che mai, nella creazione di una base di supporto, per l'aggiornamento geometrico e per l'analisi tematica di beni architettonici, gestibili in ambienti GIS.

2.2. RAPPRESENTAZIONI 2D

La produzione di fotopiani ed ortoimmagini, mediante tecniche di fotogrammetria digitale, realizzabile anche su piattaforme di basso costo e periferiche di larga diffusione, consente di ottenere un prodotto che è in grado di fondere informazioni metriche e radiometriche, superando agevolmente alcuni limiti descrittivi della restituzione al tratto e rendendo più flessibile, semplice ed economico l'intero procedimento. Tali tipi di restituzione risultano essere così i più adatti, quando lo scopo del rilevamento è solo quello di contribuire all'analisi ed alla comprensione dell'opera architettonica.

Infatti essi dovrebbero essere richiesti solo per rilevamenti speditivi, per evidenti questioni di economia e di interesse pratico, considerando l'opera in esame nella sua totalità e senza la pretesa di un rigore geometrico assoluto. Un obiettivo della diffusione di tali applicazioni nell'ambito del rilevamento architettonico risulta quello di costituire un documento base, da poter inserire, in appositi sistemi informativi, per la gestione,

¹⁰ Il texture mapping è una procedura che prevede la stesura dell'immagine ortogonalizzata 2D sopra il DEM della superficie fisica dell'oggetto e la sua successiva visualizzazione spaziale mediante assonometrie e/o prospettive.

l'analisi, il recupero, l'elaborazione e la visualizzazione dei dati spaziali, e per imprimere un dinamismo del tutto nuovo, nello studio e nella conservazione del patrimonio storico – architettonico esistente.

2.2.1 FOTOPIANI

Come si è già accennato in precedenza, la trasformazione proiettiva del raddrizzamento si può applicare ad oggetti piani o che possono essere considerati tali nella pratica operativa. Vale a dire che gli scostamenti dalla planeità, rapportati alla scala della restituzione, sono ammissibili quando non provocano variazioni significative, della posizione planimetrica corretta, nella generazione del fotopiano. Esemplicando, nell'architettura si può considerare piana, ad esempio, una facciata di un edificio che presenti solo aggetti e rientranze modesti, se rapportati alle altre due dimensioni: è il caso di davanzali, mazzette di porte e finestre, cornicioni e contorni decorativi delle aperture. Per effettuare il raddrizzamento si può fare uso di punti di controllo, misurati sull'immagine e sull'oggetto da rilevare¹¹, ma è possibile eventualmente utilizzare, come elementi di partenza, altre entità geometriche, quali elementi lineari o altri, estraibili dalle immagini, anche mediante tecniche automatiche.

Sul fotopiano, così ottenuto nella scala voluta, è possibile estrarre altre informazioni utili. Tramite tecniche di feature extraction¹², si può ottenere una restituzione vettoriale che è un'ottima base per un elaborato grafico, da integrare eventualmente alla restituzione raster. L'informazione vettoriale, così prodotta, può essere utilizzata congiuntamente all'immagine oppure separatamente, per produrre restituzioni grafiche o tematismi. Risulta chiaro che è utile avere a disposizione, nelle applicazioni architettoniche, oltre ad un'immagine raddrizzata, anche un elaborato grafico, per completare il quadro di informazioni necessarie per l'analisi. Spesso occorre procedere all'unione di diversi fotopiani per avere a disposizione, con un mosaico di immagini raddrizzate, l'oggetto nella sua completezza. A tale scopo, occorre tener conto sia degli aspetti geometrici che radiometrici¹³. Una volta costruita l'immagine mosaicata, si potranno usare tecniche numeriche di miglioramento dell'immagine, quali l'equalizzazione dei toni di grigio od altre trasformazioni, per ridurre l'effetto patchwork, dovuto alle differenze di illuminazione, esposizione, sviluppo delle immagini che potrebbero rivelarsi lungo le linee di unione.

2.2.2. ORTOIMMAGINI

La generazione di un'ortofotomappa richiede la conoscenza del DEM della superficie dell'oggetto indagato. Per generare un'ortofotomappa, sono utilizzati generalmente due metodi. Il primo diretto parte dall'immagine e proietta ciascun pixel sull'oggetto, tramite le equazioni di collinearità¹⁴; l'altro indiretto, presentato nel

¹¹ Per la generazione del fotopiano si stimano gli 8 parametri di un'omografia, immediatamente derivabili dalle equazioni di collinearità, nel caso piano, ponendo $Z=0$ e prescindendo dalla conoscenza degli elementi dell'orientamento interno ed esterno delle prese:

$$X = \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1} \quad ; \quad Y = \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1}$$

I punti di controllo devono essere distribuiti in modo equispaziato sull'oggetto da rilevare, possibilmente sullo stesso piano su cui georeferenziare il rilevamento, e possono essere costituiti da spigoli di particolari decorativi facilmente individuabili, oppure da mire collocate sull'oggetto. Una volta ottenuti i parametri che governano la trasformazione geometrica è possibile applicare tale trasformazione all'immagine digitale. In questo modo, si ritrova la posizione del pixel dell'immagine raddrizzata, in quella originale, e si associa ad essa il valore di grigio ottenuto da un'interpolazione bilineare dei valori di grigio dei 4 pixel adiacenti.

¹² Tecniche automatiche che consentono l'estrazione di punti, linee di contorno, figure, ecc.

¹³ Per la connessione tra un'immagine e l'altra, si applicano generalmente due traslazioni ed una variazione di scala (questa può essere diversa nelle due direzioni coordinate) che sono stimate collimando almeno due punti corrispondenti nelle due immagini. Scegliendo punti ben individuabili, in numero sovrabbondante e ben distribuiti nella zona di ricoprimento, si ottengono ottimi risultati.

¹⁴ Le equazioni di collinearità sono le equazioni canoniche della fotogrammetria analitica e stabiliscono la relazione geometrico-proiettiva fra un punto immagine ed il suo corrispondente punto oggetto.

prosieguo, offre maggiori vantaggi. Una volta descritta, in modo sufficiente, la superficie dell'oggetto e nota la geometria di presa, è semplice creare un'ortoimmagine digitale. Si stabilisce innanzitutto la dimensione del voxel¹⁵ dell'oggetto (pari al pixel dell'immagine per la sua scala media), poi si passa alla definizione della matrice – immagine nel piano orizzontale del sistema di coordinate oggetto, seguita dalla trasformazione del centro di ciascun pixel di questa immagine (ancora inesistente) nel sistema di coordinate dell'immagine originale. Per questa trasformazione, è necessario conoscere anche le quote dei punti del grigliato. Essi si possono ricavare dal DEM generato, facendo uso di tecniche automatiche di riconoscimento di elementi omologhi su due o più immagini. Nota la posizione dell'immagine digitale nello spazio, si possono trasformare i centri dei pixel, dal sistema oggetto a quello dell'immagine originale, applicando le equazioni di collinearità. In questo modo, si ha la localizzazione, corretta dalla distorsione prospettica, dei pixel immagine. Il colore dei pixel dell'ortoimmagine è ottenuto, al solito, per ricampionamento dell'immagine originale, con una trasformazione bilineare oppure con un'interpolazione di ordine superiore, se si vuole evitare una riduzione del dettaglio dell'immagine originale.

La precisione di un'ortoimmagine dipende da molti fattori, uno dei quali è la qualità del DEM. La scarsità di informazioni sulle discontinuità ed un metodo di interpolazione inadeguato possono dar luogo ad un DEM incompleto che, se utilizzato a sua volta, per produrre un'ortoimmagine, è responsabile della cattiva qualità della stessa. Il risultato, più o meno buono, di un'immagine ortogonalizzata dipende comunque dall'intero iter produttivo, includendo le condizioni di presa (illuminazione, ottica del sensore, filtri, uso del colore, ecc.), gli errori prodotti dall'uso eventuale dello scanner e le caratteristiche del sistema hardware e software di elaborazione. Tuttavia la restituzione su un supporto bidimensionale diventa inadeguata, quando si considerano oggetti la cui superficie è curva e non sviluppabile su un piano. La proiezione ortogonale su un piano infatti, in questi casi, provoca deformazioni indesiderate ed occorre scegliere una diversa superficie di riferimento, sufficientemente prossima alla superficie dell'oggetto. Il problema è analogo a quello delle rappresentazioni cartografiche.

Se la superficie di riferimento considerata non è piana, la proiezione realizzata dovrà essere sviluppata su un piano. Allora solo se la superficie di riferimento è a semplice curvatura e pertanto sviluppabile (cilindro, cono, ecc.), non si introduce alcun tipo di deformazione. Se invece la superficie di riferimento è a doppia curvatura e, di conseguenza, non sviluppabile su un piano (sfera, ellissoide, ecc.), sarà necessario utilizzare le rappresentazioni scegliendo, di volta in volta, in funzione delle finalità del rilevamento, quella più idonea. La cartografia offre un ampio spettro di possibilità di scelta tra rappresentazioni conformi (nelle quali gli angoli rilevati sono uguali a quelli proiettati), equivalenti (nelle quali le aree rilevate sono uguali a quelle proiettate) o afilattiche (nelle quali le deformazioni angolari, areali e lineari sono di entità limitata). In conclusione, si riportano alcuni vantaggi delle ortoimmagini, ottenute per via digitale, rispetto a quelle prodotte per proiezione fotografica mediante gli ortoproiettori:

- ❑ la qualità dell'immagine può essere modificata, con grande facilità, mediante la manipolazione del contrasto;
- ❑ è possibile ricavare facilmente restituzioni a scale diverse (ovviamente minori di quella di progetto);
- ❑ si possono riunire immagini adiacenti, in un'unica ortoimmagine, equalizzando radiometricamente le parti che compongono il mosaico;

¹⁵ Si definisce voxel un elemento di volume dell'oggetto; si definisce invece groundel l'elemento costituito dalla proiezione sull'oggetto di

- ❑ si possono introdurre ulteriori miglioramenti dell'immagine, ad esempio, l'esaltazione dei contorni, mediante opportuni filtri;
- ❑ un DEM corretto e completo, insieme all'immagine ortorectificata e referenziata, può costituire il documento base per la realizzazione di restituzioni tridimensionali;
- ❑ l'ortorectificata può essere memorizzata in un livello informativo di un GIS o di un LIS.

Si ricordi comunque che gli ortorettificatori, così come i restitutori analitici, sono strumenti complessi, costosi e necessitanti di personale addestrato, oggi giorno completamente dismessi, con l'avvento rapido e progressivo della fotogrammetria digitale.

2.3. RAPPRESENTAZIONI 3D

La ricostruzione 3D, basata su tecniche di Computer Graphics e CAD, apre numerosi ed interessanti spazi applicativi in quei settori, quali l'architettura, dove sia utile la generazione di modelli tridimensionali, per la valutazione metrica e spaziale dell'oggetto rilevato, a partire da immagini 2D. Il supporto della Computer Graphics e soprattutto la possibilità di manipolare informazioni nello spazio 3D hanno ormai un'importanza strategica in molte applicazioni scientifiche, per la natura tridimensionale di molti problemi, relativi a topologia, morfologia e dimensioni. Infatti relativamente al problema della visualizzazione di scene 3D, si possono distinguere due diversi modi di affrontarlo. Nel primo approccio, si considera la scena discreta 3D, nella sua interezza, come un continuo, descritto dalla distribuzione di densità dei voxel (volumetric element). Nel secondo approccio, l'informazione relativa alla superficie da ricostruire è dapprima estratta da ciascuna sezione dell'oggetto, successivamente elaborata e modellata, ed infine restituita su un display grafico.

2.3.1. MODELLAZIONE SOLIDA

Le procedure per creare i modelli solidi si basano su tecniche di triangolazione ed approssimazione ad elementi finiti che consentono di formare una superficie visivamente accettabile. Differenti forme geometriche possono essere descritte analiticamente, a partire dai dati, mediante i seguenti descrittori di forma:

- ❑ una linea riferita ad un dominio mono – dimensionale può essere ricostruita mediante un'interpolazione lineare;
- ❑ una superficie piana può essere analizzata mediante una ricostruzione di superficie;
- ❑ il contorno di una curva (piana o gobba) può essere studiato utilizzando due o tre descrittori di forma mono – dimensionali, riferiti alle due o tre componenti del contorno;
- ❑ la superficie complessa di un oggetto può essere studiata utilizzando tre descrittori di forma bi – dimensionali, riferiti alle tre componenti della superficie, benché quest'ultimo problema superi, di gran lunga, i precedenti per la sua complessità.

Si deve tenere conto che figure ed oggetti delimitati rispettivamente da un contorno o da una superficie sono in questo contesto, semplicemente, quantità geometriche, indipendenti dalla loro natura fisica. Molti approcci matematici sono utili per risolvere il problema della ricostruzione di figure ed oggetti; in particolare, il metodo

della triangolazione e quello degli elementi finiti (spline) sono i più interessanti. Comunque tanto più questi metodi presentano vantaggi, dal punto di vista dell'interpretazione dei dati, quanto più gli stessi metodi hanno svantaggi, per quanto riguarda la compressione dei dati. Avendo a disposizione un insieme di punti di un oggetto complesso, rilevato mediante tecniche di restituzione fotogrammetrica, si possono connettere mediante una rete di segmenti lineari, utilizzando una triangolazione di Delaunay, per oggetti 2D ed una tetraedrazione, per oggetti 3D, se le seguenti condizioni sono soddisfatte:

- ❑ esiste almeno un cerchio generato da due punti che non contenga al suo interno altri punti;
- ❑ tre punti sono i punti di un triangolo, se e solo se, esiste un cerchio generato da essi che non contenga al suo interno altri punti;
- ❑ come condizione aggiuntiva si richiede di costruire triangoli il più possibile equilateri, per evitare delle configurazioni che generino malcondizionamento.

Il passaggio da 2D a 3D porta a sostituire il cerchio con la sfera, il tetraedro al triangolo e la connessione fra quattro punti a quella fra tre punti; inoltre è quasi sempre richiesta una certa regolarità degli elementi solidi. Un insieme di triangoli attorno ad un punto 2D (o di tetraedri attorno ad un punto 3D) viene chiamato poligono (poliedro) di Thiessen. La regione complementare attorno ad un punto passante dal punto di mezzo di ciascun segmento lineare è chiamata diagramma di Voronoi o di Dirichlet. Alcune figure possono invece essere approssimate mediante un'interpolazione continua, come una linea per forme 2D e linee e superfici per forme 3D. Dato che i punti si presentano, per lo più, distribuiti in modo irregolare, differenti metodi di interpolazione possono essere scelti. Le curve di Catmull-Rom e le spline di Bézier a supporto triangolare possono rispondere positivamente allo scopo. Infatti il descrittore fornisce una interpolazione locale (2D o 3D), prendendo in considerazione tre punti solamente. La curva di Catmull-Rom passa attraverso questi punti e ha il vettore tangente nel punto di mezzo parallelo alla corda fra il primo e l'ultimo punto. Le spline di Bézier sono invece su supporto triangolare ed hanno la forma analitica data dai polinomi di Bernstein.

I diagrammi di Voronoi, la triangolazione di Delaunay, i poligoni di Thiessen e gli elementi finiti (spline a supporto triangolare) di Bézier sono tutti validi strumenti, atti alla ricostruzione di oggetti e alla loro modellizzazione (come mostrato dalle figure 2.1, 2.2 e 2.3). Sulla superficie degli oggetti ricostruiti è poi possibile visualizzare il loro colore, la loro tessitura ed eventuali loro elementi vettoriali, tramite la tecnica del texture mapping, così come sarà mostrato nel prossimo paragrafo (a riguardo, si veda la figura 2.4).

2.3.2 TEXTURE MAPPING

La capacità di un sistema CAD di rappresentare una struttura reale è comunque limitata dalla possibilità, del sistema stesso, di trattare le superfici definite e dalla densità di osservazioni rilevate sull'oggetto, al punto da poterne pregiudicare il risultato finale. La creazione dei modelli tridimensionali di oggetti composti da solidi regolari avviene con l'estrusione e la rivoluzione dell'oggetto costruito, e con il disegno dei profili frontali, laterali e superiori dell'oggetto per l'elaborazione del solido. L'oggetto può essere costruito visualizzandolo sullo schermo, con differenti viste, come se fosse posizionato prospetticamente, nello spazio in cui si sta lavorando. Una serie completa di primitive quali cubi, cilindri, sfere, spline di Bézier consentono la creazione e la modifica dell'oggetto (a tale proposito, la figura 2.4 intende solo completare la serie delle tre figure precedenti, mentre sono notevoli, ad es., la sovrapposizione di immagini a modelli 3D).

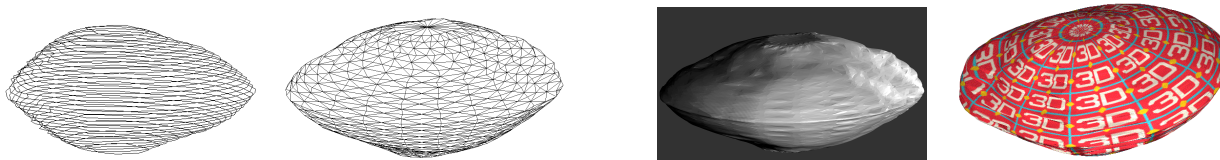


Fig. 2.1 – Ricostruzione di un particolare mediante curve di Catmull-Rom.

Fig. 2.2 – Ricostruzione di un particolare mediante triangolazione di Delaunay.

Fig. 2.3 – Rendering di luce ed ombre della superficie di un particolare.

Fig. 2.4 – Texture mapping sulla superficie di un particolare.

La fase di rendering, cioè la copertura della struttura base del modello (wireframe), è ottenuta di preferenza utilizzando una tessitura ed una colorazione, caratteristiche dell'oggetto. Inoltre con gli algoritmi di Flat, Gouraud e Phong, è possibile ottenere una serie di effetti per una più realistica simulazione, come la trasparenza, l'atmosfera e l'ombreggiatura. In questo caso, le possibilità di controllo sono le più ampie: dal tipo di luce al numero dei punti di illuminazione, alla creazione ed utilizzo di librerie di materiali, ecc. Se si ha a disposizione il modello solido dell'oggetto e l'ortoimmagine, si può ottenere un'altra forma di rappresentazione, ricca di informazioni e con un alto carattere qualitativo, oltreché metrico, utilizzando la procedura di texture mapping sul modello solido. L'operazione di texture mapping consiste nella riproiezione di un'immagine (in particolare di un'ortoimmagine), su un oggetto tridimensionale. La principale difficoltà, di questa operazione, consiste nel fatto che si deve, prima di tutto, avere una qualche cognizione della forma, grandezza e posizione dell'oggetto su cui applicare la mappa. Nell'interpolazione richiesta per la determinazione dell'aspetto radiometrico, il texture mapping, utilizza le maglie del DEM, correlandole alla dimensione effettiva del pixel immagine. In questo senso, la risoluzione geometrica del raster diviene un elemento importante del processo, collegato al tipo di applicazione ed alle necessità operative dell'utilizzatore.

Il software 3D Studio, come altri programmi CAD, è in grado di realizzare l'operazione di texture mapping. Esso effettua la stesura dell'elaborato raster 2D di ortogonalizzazione sul modello altimetrico 3D, secondo la normale ad una superficie di riferimento assegnata. Dato che è impossibile mappare un'immagine 2D su un qualsiasi oggetto 3D, almeno in maniera diretta, occorre aggiungere un passaggio nella mappatura: una via di mezzo fra immagine 2D e figura 3D. Infatti il raster è proiettato sul DEM di supporto, in direzione normale al riferimento assunto che può essere un solido 3D regolare (una superficie 3D intermedia) quale il cilindro, il cono o la sfera di cui si conosce forma ed equazione. L'aggregazione geometrica richiesta nel draping, fra la sintesi morfologica vettoriale (DEM) e la sintesi raster (immagine ortogonalizzata) è realizzata dalla procedura, in modo automatico, durante la proiezione, mediante l'imposizione di congruenze fra i contorni della porzione d'oggetto interessata e quelli corrispondenti dell'immagine raster relativa. Il perfetto funzionamento del texture mapping dipende dalla posizione e grandezza della superficie intermedia. Infatti se si vuole che la mappatura riesca appieno, occorre che la superficie intermedia copra tutto l'oggetto; importante è anche il tipo di superficie intermedia pre scelta. Questa tecnica permette di avanzare il grado di descrizione e di interpretazione della realtà, offerta dal modello, consentendo anche una verifica semantica del modello stesso, cioè dando realismo agli oggetti per migliorarne l'identificazione. Resta da osservare come tralasciare qualcosa (come ridurre la scala) sia un'operazione di generalizzazione sempre possibile, mentre acquisire nuova informazione (come per ampliare la scala) richieda un nuovo rilevamento.

2.4. APPLICAZIONI ALL'INGEGNERIA EDILE E STRUTTURALE

Un'interessante applicazione della fotogrammetria degli oggetti vicini, con distanze, fra oggetto e punto di presa, comprese entro un centinaio di metri, riguarda misure di alta precisione di edifici e strutture industriali, controlli delle deformazioni durante la costruzione di edifici e per la documentazione di lesioni degli stessi, rilevamento di modelli tecnici o artistici, misure cinematiche e molte altre. Per uno studio dei manufatti (soprattutto se di grossa mole), al fine di ottenere il maggior numero di informazioni possibili sul loro stato di conservazione, l'ausilio della fotogrammetria offre innumerevoli vantaggi, quali la relativa facilità nell'esecuzione del rilevamento e la buona qualità metrica dei risultati. I prodotti che si possono ottenere, in forma di elaborati grafici e file numerici, così come essi sono già stati illustrati in precedenza, consentono una dettagliata analisi geometrica e tematica degli elementi murari nella loro complessità. Inoltre essi permettono la descrizione di elementi inaccessibili ad un rilevamento manuale con la conseguente possibilità, data la quantità di dati raccolti, di avviare uno studio più ampio in relazione alle tecniche costruttive. Tutto quanto prodotto in fase di rilevamento (raster e vettoriale) permette poi un'attenta lettura degli aspetti morfologici e tipologici di un edificio o di qualsiasi altro manufatto, valutati nelle loro globalità. Si ha inoltre un'identificazione delle relazioni spaziali fra gli elementi costruttivi contigui, in merito alla reciproca ortogonalità, verticalità e planeità delle superfici in gioco. In particolare, sul prodotto raster può essere effettuata l'indagine dello stato materico della struttura e l'analisi tipologica delle parti di un edificio.

La recente evoluzione degli apparati strumentali, con particolare riferimento all'acquisizione automatica della misura, e la messa a punto di programmi di calcolo che sviluppino modelli matematici di deformazione costituiscono due risultati di grande importanza, per l'automazione del controllo delle deformazioni mediante tecniche topo – fotografiche. Considerando il controllo delle deformazioni come un complesso di operazioni che parte dalla acquisizione del dato in campagna e termina con la rappresentazione del fenomeno di deformazione, si può osservare come un notevole contributo all'automazione di tale processo sia realizzabile anche nella fase di gestione dei risultati delle misure. La determinazione delle deformazioni è basata sulla ripetizione nel tempo di misure riguardanti un oggetto. I risultati delle stesse vanno ad arricchire progressivamente un archivio da cui sono prelevate per essere elaborate, arrivando così ad arricchire il database di un GIS 3D. La documentazione metrica, base per la conoscenza morfologica e tipologica del manufatto, consente di realizzare uno strumento di programmazione degli interventi. Tutto ciò in considerazione del fatto che è necessario conoscere non solo il dato qualitativo (lo stato di degrado), ma anche quello quantitativo, costituito dalla stima delle superfici deteriorate o integre. Generalmente l'analisi statica, da condurre su un manufatto, necessita della impostazione di un modello geometrico tridimensionale come, ad esempio, nel caso dell'analisi ad elementi finiti. Tale modello tridimensionale, spesso dedotto da grafici e rilevamenti diretti, sintetizza ed esemplifica gli aspetti essenziali della struttura. Il rilevamento fotogrammetrico è invece capace di una descrizione dettagliata ed accurata, anche se talvolta l'esuberanza dei dati si rileva controproducente e rende complessa la scelta dei punti critici.

PARTE III – APPLICAZIONI DELLA GEOMATICA

CAD – CARTOGRAFICO

L'acquisizione digitale della cartografia e l'utilizzo di uno strumento informatico per la gestione dei dati rientrano in un processo di adeguamento, da parte degli enti locali, alle nuove tecnologie informatiche. In

questo processo di informatizzazione per il miglioramento delle procedure, per la realizzazione di carte tematiche o l'aggiornamento delle mappe catastali, si inserisce il progetto del Comune di Castelmarte (CO). Esso è volto ad acquisire cartografia in formato numerico, al fine di utilizzare strumenti informatici per analisi sul territorio. La realizzazione del presente lavoro ha previsto una serie di tappe procedurali che hanno consentito di poter disporre di informazioni, nella forma opportuna, per l'applicazione di uno strumento di gestione dei dati raccolti e di rappresentazione dei risultati delle analisi richieste. Mediante Autocad Map, si è potuto mantenere la continuità con i tipi di dati, acquisiti precedentemente con Autocad14, e realizzare le operazioni di definizione degli oggetti vettoriali, di attribuzione agli stessi di determinate caratteristiche, per poter eseguire le interrogazioni volte a mettere in evidenza le realtà di particolare interesse. I risultati del presente lavoro potrebbero essere utilizzabili sia all'interno di una pubblica amministrazione, già informatizzata, sia all'interno di una in via di adeguamento, senza che comunque tutto ciò vieti un'evoluzione verso un sistema più complesso, quale un SIT.

3.1. INDAGINE SUI LUOGHI DI INTERESSE VOLTA AL RECUPERO AMBIENTALE

L'intento manifestato dall'Amministrazione Comunale di Castelmarte (CO) era quello di realizzare, tramite strumenti cartografici informatici, un'operazione di recupero anche simbolica del territorio, soprattutto di quei luoghi rappresentativi dell'identità della collettività e dei mutamenti storico – sociali intervenuti nel tempo, con particolare attenzione ai sentieri. A tal proposito, l'analisi territoriale realizzata ha principalmente contenuti di tipo descrittivo: generale, relativamente all'abitato, al sistema stradale, in particolare, relativamente ai sentieri naturalistici. In una fase successiva, tali analisi potrebbero essere integrate da altri elementi rappresentativi come, toponimi, vestigia antiche, altri sentieri, ecc., dopo una eventuale ricognizione più approfondita ed esaustiva delle realtà del territorio in esame. Le informazioni di carattere descrittivo, necessarie a contraddistinguere gli oggetti nella cartografia, sono state acquisite agevolmente¹⁶. L'integrazione delle suddette informazioni è stata completata da una serie di sopralluoghi durante i quali si è accertato lo stato di mantenimento dei sentieri e sono state scattate alcune fotografie.

3.1.1 ACQUISIZIONE DEL DATO CARTOGRAFICO DA RASTER A VECTOR

La realizzazione del presente lavoro ha previsto una serie di tappe procedurali. L'area interessata alla sperimentazione copre una superficie di circa 12.000.000 m^2 , dove la dimensione maggiore, lungo la direzione ovest – est, è di circa 4.000 m . mentre la minore, lungo la direzione nord – sud è di circa 3.000 m . Una volta acquisita, in formato raster, la cartografia in scala 1:10.000 della CTR della Regione Lombardia, la vettorializzazione della stessa ha permesso di rendere le informazioni cartografiche identificabili come entità – oggetto, passibili di operazioni di assegnazione di attributi specifici, al fine di evidenziare realtà particolari del territorio comunale, quali i sentieri (Fig. 3.1). Durante l'operazione di vettorializzazione, gli oggetti creati sono stati disposti su piani (o layer), per agevolare poi l'utilizzo dell'applicativo Autocad Map.

3.1.2 GENERAZIONE DEL DEM E SUA INTEGRAZIONE CON ELEMENTI DESCRITTIVI

Con i dati altimetrici (curve di livello e punti quotati) è stato realizzato il Modello Digitale delle Altezze (DEM), allo scopo di fornire una rappresentazione altimetrica del territorio, d'ausilio visivo all'analisi dello stesso. Il

¹⁶ I Comuni di Castelmarte e di Proserpio hanno fornito dati sulla popolazione, mentre la Biblioteca di Castelmarte ha reso disponibile una pubblicazione dell'Architetto Antonello Marieni dal titolo "CASTELMARTE e la sua storia", da cui sono state tratte foto e

passo di interpolazione scelto per la costruzione della griglia regolare (326 righe x 373 colonne) è stato di 10 m., compatibilmente con la scala della carta impiegata nell'acquisizione (Fig. 3.2).

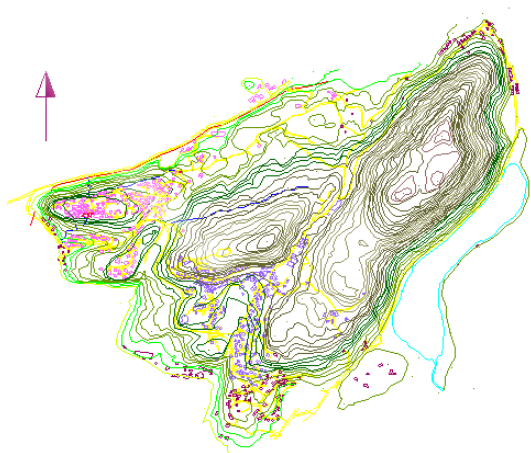


Fig. 3.1– La mappa vettoriale.

L'ultima fase, mediante semplici operazioni in ambiente CAD, ha consentito l'inserimento delle altre informazioni sul DEM. Il tutto ha migliorato la rappresentazione cartografica tridimensionale, arricchendola con elementi relativi alla viabilità, all'edificato, ai sentieri naturalistici ed al lago: il disegno, così ultimato, è stato poi sottoposto ad operazioni di rendering (Fig. 3.3). Si sottolinea così come sia importante l'utilizzo dei modelli digitali del terreno e delle loro rappresentazioni tridimensionali, sempre più realistiche, soprattutto per studi di impatto ambientale.

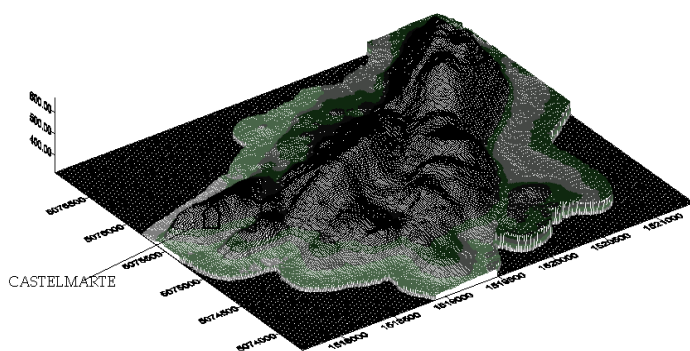


Fig. 3.2 – Il Modello Digitale delle Altezze

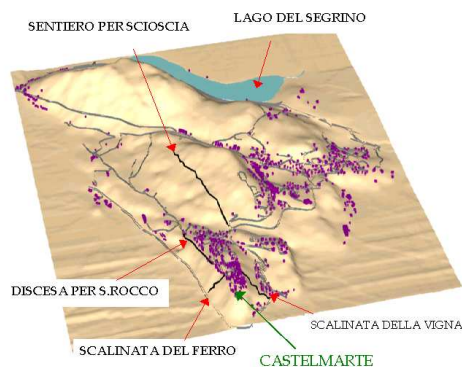


Fig. 3.3 – Integrazione di informazioni territoriali sul DEM ombreggiato

L'avvento delle moderne tecnologie informatiche permette oggi di utilizzare l'informazione digitale, non solo per snellire i tempi di produzione delle carte, ma anche e soprattutto per migliorare le possibilità di revisione delle stesse. Se si acquisisce l'informazione cartografica in forma digitale, si ha la possibilità di mantenere, aggiornare, modificare, scambiare le informazioni registrate ed eventualmente elaborarle per ricavarne informazioni specifiche. Inoltre le operazioni di aggiornamento e di rappresentazione cartografica risultano semplificate e velocizzate da strumenti di grafica potenti, ormai largamente diffusi ed impiegati.

La fase di vettorializzazione ha prodotto le condizioni preliminari per l'utilizzo di uno strumento cartografico di tipo informatico, per consentire l'attribuzione di caratteristiche agli oggetti, disposti sui diversi strati, e la

informazioni su alcuni edifici storici segnalati nel lavoro. L'Ufficio Tecnico dell'Amministrazione Provinciale e la Polizia Stradale di Como

successiva visualizzazione delle stesse mediante procedure di interrogazione. Una possibilità riguardava l'utilizzo di un SIT; l'alternativa consisteva nell'utilizzare uno strumento che potesse trattare le informazioni cartografiche a disposizione e, nel contempo, permettere la visualizzazione dei risultati dell'analisi territoriale da effettuarsi in una forma chiara e esteticamente soddisfacente.

3.2. APPLICAZIONE DI AUTOCAD MAP ALL'ANALISI TERRITORIALE

Autocad14, già usato per le procedure di vettorializzazione, è stato integrato con speciali funzioni nel software Autocad Map, adatto a trattare i dati cartografici in un ambiente CAD. Autocad Map velocizza il processo di cartografia digitale tramite la creazione di mappe, con la possibilità d'importare ed integrare dati provenienti da altre applicazioni, ad esempio da MapInfo e Intergraph, o di collegare le mappe a database esterni, tipo Oracle, Microsoft Access ed Excel. Inoltre esso consente di modificare le mappe, anche con modalità automatiche, e di gestire i dati con le relative impostazioni (preferenze, query e analisi topologiche) nella sessione di lavoro; infine esso permette di integrare i disegni con immagini raster, allo scopo di completare le informazioni presentate. I vantaggi consistono nel fatto che, trattandosi di un software in ambiente CAD, da una parte consente una semplice alfabetizzazione e dall'altra è facilmente reperibile nelle pubbliche amministrazioni. Tutto questo ha portato alla scelta di Autocad Map per la gestione del dato e la rappresentazione dei risultati dell'indagine territoriale effettuata.

3.3. PROCEDURE DI ANALISI TERRITORIALE: DEFINIZIONE E INTERROGAZIONE DEI DATI

3.3.1 IMPLEMENTAZIONE DEI DATI

In Autocad Map, a differenza di Autocad14, è stato possibile lavorare contemporaneamente su vari insiemi di informazioni, provenienti da più disegni e in seguito recuperare graficamente le informazioni specifiche, mediante realizzazione di query. Per questo progetto, sono stati utilizzati quattro disegni su cui sono stati disposti gli strati precedentemente creati. Le query possono recuperare oggetti nei vari disegni, utilizzando quattro tipi di criteri: posizione, proprietà, dati e SQL. Mentre la definizione delle query di posizione e proprietà non presuppone alcuna operazione preliminare, se non l'esecuzione del comando stesso, nel caso delle query di dati, è stato necessario creare i dati oggetto la cui creazione prevede due fasi.

3.3.2 DEFINIZIONE DEI DATI OGGETTO

Le informazioni cartografiche quali la viabilità, l'edificato, l'altimetria ed i tematismi di tipo naturalistico, come i sentieri ed il lago, dovevano essere connotate con dati relativi alle loro peculiarità specifiche. Ad esempio, i sentieri sono stati descritti in base alla pendenza, alla lunghezza, alla quota di partenza ed arrivo, alle informazioni storiche ed al materiale fotografico; l'edificato in base al numero degli abitanti ed al dato sull'altitudine e l'estensione; la viabilità utilizzando i dati relativi alle strade principali, ai flussi di traffico, al calibro della strada ed alla larghezza della carreggiata. L'operazione di definizione dei dati è stata realizzata assegnando un nome, una definizione, un tipo di dati ed un valore di default ai campi di una tabella di dati oggetto. Nella tabella in figura 3.4, è stato specificato il nome del disegno in cui è stata realizzata la procedura di definizione dei dati oggetto ed i nomi dei campi creati in ogni tabella. Nella tabella in figura 3.5, sono stati specificati i campi di ogni tabella.

hanno gentilmente fornito dati sui flussi di traffico delle strade interessate dal progetto.

3.3.3 ASSOCIAZIONE DEI DATI OGGETTO

Dopo aver definito i dati, è possibile associarli ad uno o più oggetti grafici del disegno. La tabella di figura 3.6 illustra l'esempio di valori associati agli oggetti, relativo ai sentieri.

DWG	SENTIERILAGO
TABELLA	Sentieri
CAMPI	Nome
	Accessibilità
	Lunghezza
	Quota partenza
	Quota arrivo
	Pendenza

Nome del campo	Tipo di dati	Descrizione	Default
Nome	Carattere	Nome del Sentiero	
Accessibilità	Carattere	E' accessibile?	
Lunghezza	Intero	Lunghezza media in m.	
Quota partenza	Intero	Altezza in m. s.l.m di partenza	
Quota arrivo	Intero	Altezza in m. s.l.m di arrivo	
Pendenza	Reale	Valore in % della pendenza	

Nome del Sentiero	Scalinata Vigna	Scalinata Ferro	Sentiero per Scioscia
E' accessibile?	sì	no	sì
Lunghezza media in m.	440	280	1500
Altezza in m. s.l.m di partenza	462	450	479
Altezza in m. s.l.m di arrivo	357	335	426
Valore in % della pendenza	24	40	3.5

Fig. 3.4 e 3.5 – Definizione dei dati oggetto (i sentieri) Fig. 3.6 – Associazione dei dati oggetto

3.3.4 VISUALIZZAZIONE DI DOCUMENTI ASSOCIATI AGLI OGGETTI

Con Autocad Map, è possibile selezionare a video un oggetto e visualizzarne il documento associato che può essere un atto di proprietà, relativo ad un edificio, o una descrizione dettagliata dello stesso, oppure una qualsiasi altra informazione associata. Il documento è associato all'oggetto, memorizzandone il nome nei dati oggetto, oppure in un database esterno. Nel caso specifico, si è proceduto alla memorizzazione di una serie di documenti, tramite uso dei dati oggetto. A tal fine, sono state create diverse tabelle dati oggetto, simili alle precedenti tranne per l'uguaglianza tra il nome del campo, il valore assegnato ed il nome del documento. Nel prosieguo, sono mostrate la tabella di collegamento tra il nome dei documenti e il nome del disegno corrispondente (tab. di fig. 3.7), la tabella dei dati oggetto creati per la visualizzazione (tab. di fig. 3.8), quella di definizione dei campi (tab. di fig. 3.9) e quella specifica dei valori assegnati (tab. di fig. 3.10). Infine è riportata una schermata di Autocad Map (Fig. 3.11) che illustra il risultato della procedura di visualizzazione di un documento associato ad un oggetto del disegno: selezionando il disegno del sentiero evidenziato con una freccia, appare il documento DISCESA (prodotto in Microsoft Word) ad esso collegato.

Disegno	SENTIERILAGO.DWG
Documenti	LAGO.DOC
	VIGNA.DOC
	SCIOSCIA.DOC
	DISCESA.DOC

Fig. 3.7

DWG	SENTIERILAGO
TABELLA	Descrizione
CAMPI	Vigna
	Scioscia
	Discesa

Fig. 3.8

Nome del	Tipo di da	Descrizione
Vigna	Carattere	Foto e descrizione
Scioscia	Carattere	Foto e descrizione
Discesa	Carattere	Foto e descrizione

Fig. 3.9

Nome del campo	Valore
Vigna	Vigna
Scioscia	Scioscia
Discesa	Discesa

Fig. 3.10

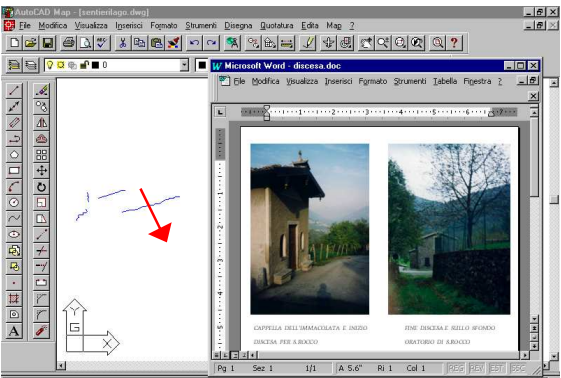
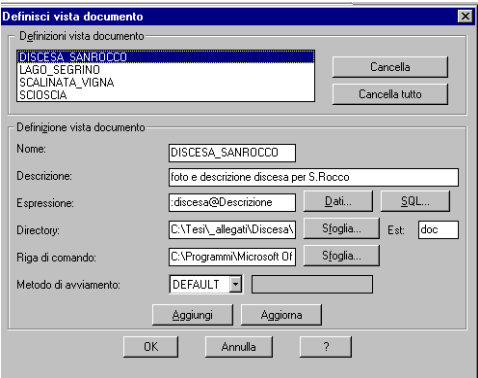


Fig. 3.11 – Visualizzazione di un documento associato



3.3.5 LE QUERY

Le query sono richieste di informazioni specifiche: l'esecuzione di una query avviene attraverso la procedura di definizione della query stessa in cui si impostano i criteri per la selezione degli oggetti. Una query esegue una ricerca selezionata, scegliendo gli oggetti che corrispondono alle condizioni specificate e collocando quelli recuperati in una nuova visualizzazione. Nel presente lavoro, si è puntato sulla descrizione dei sentieri naturalistici: ai fini del progetto, è stato evidenziato il tracciato dei sentieri ed è stata realizzata una query sui sentieri accessibili (la figura 3.12 ne mostra il risultato).

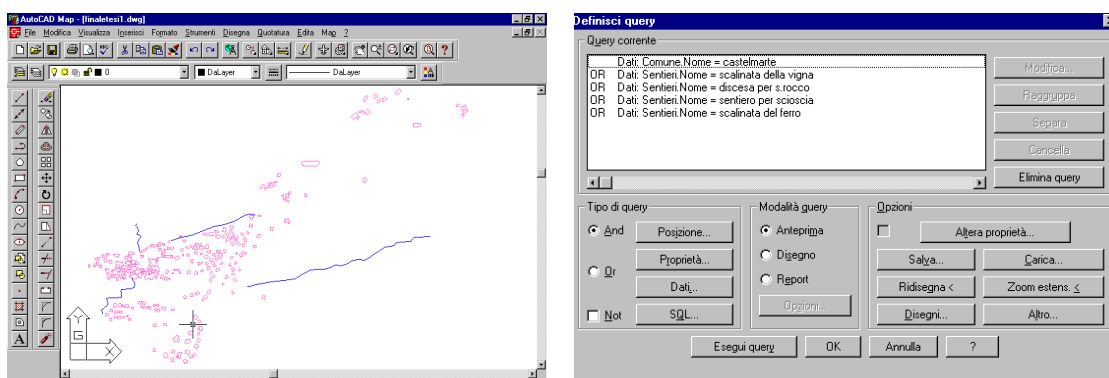


Fig. 3.12 – Query relativa ai sentieri accessibili a Castelmarte

3.3.6 CREAZIONE ED ANALISI DELLA TOPOLOGIA

La topologia descrive le modalità di connessione e relazione reciproca di linee e poligoni, e costituisce la base per funzioni avanzate come il tracciamento di rete. E' possibile eseguire query ed analisi topologiche per ricavare informazioni su distribuzione e relazioni spaziali. Le funzioni topologiche utilizzate in Autocad Map sono tre: nodo, rete, poligono. La topologia nodo definisce le interrelazioni tra gli oggetti nodo (punti): i pozzi d'acqua sono esempi di questa topologia. La topologia rete riguarda l'interconnessione di collegamenti (linee) che formano una rete lineare: come il reticolo stradale. La topologia poligono definisce poligoni (ad es., i confini amministrativi) rappresentanti le aree iscritte, come i lotti e le aree catastali. Al momento di creare una topologia, le informazioni sono registrate, come dati oggetto, su ciascun elemento della topologia stessa e salvate insieme alla mappa. Ad ogni nodo, collegamento o poligono, è automaticamente attribuito un numero di identificazione (ID) univoco. In base al numero ID attribuito a tutti gli edifici (avendo creato una topologia rete nel centro abitato), è stata realizzata una query che richiedeva, all'interno di un'area specifica, la visualizzazione degli stessi caratterizzati da un certo intervallo di ID (Fig. 3.13).

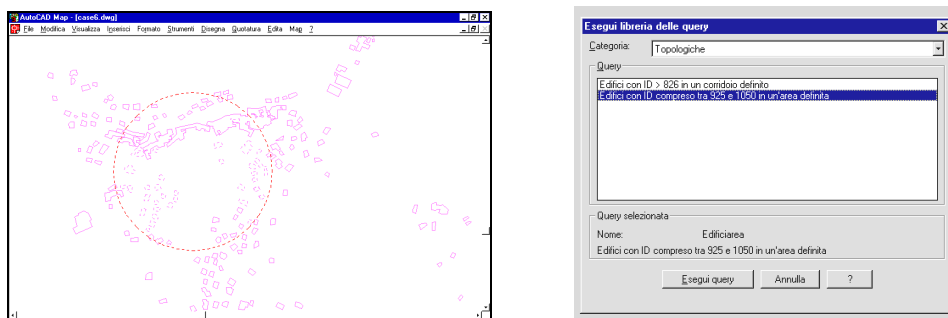


Fig. 3.13 – Query topologica sugli edifici con ID compreso tra 925 e 1050

In prospettiva, questa sperimentazione potrebbe essere integrata all'interno di un SIT, non solo comunale, ma comprensoriale, per la produzione e la gestione di cartografia specifica, volta alla descrizione ed al mantenimento delle realtà locali. Inoltre i dati, gestiti mediante il software Autocad Map, possono servire da base per successive indagini sul territorio, essere utilizzati per produrre cartografia tematica ed essere trasmessi, via rete, ad altri Comuni che ne facciano richiesta, per bisogno di informazioni specifiche. Gli stessi dati possono altresì essere utilizzati nella didattica, al fine di fornire, a scopo divulgativo, una rappresentazione grafica tridimensionale del territorio. Inoltre la disponibilità di un modello tridimensionale del territorio può offrire valido sostegno a studi paesaggistici o di impatto ambientale, qualora si renda necessario inserire, in modalità fotorealistica, un'opera nuova (edifici, ponti, dighe, ecc.) sul luogo del futuro insediamento, per analizzarne l'effettiva omogeneità con l'ambiente circostante.

TRACCIAMENTI E COLLAUDI

4.1/1. INTERPOLAZIONE DI PUNTI CON CURVE A TRATTI DI NATURA DIFFERENTE

Il lavoro, sviluppato presso la Sezione Infrastrutture Viarie del DIAR, si propone lo sviluppo di un algoritmo per l'interpolazione di punti, tramite curve composte in uno spazio bidimensionale. I tratti che compongono la curva sono di diversa natura, polinomiale e non polinomiale; il numero e l'alternanza dei tratti non sono noti a priori, mentre sono note e limitate le forme funzionali a disposizione. I punti, ordinati rispetto alla curva da ricostruire, sono misurati ed è considerata l'imprecisione nelle loro coordinate. L'algoritmo prevede inizialmente la classificazione dei punti, per individuare la natura dei tratti componenti ed approssimarne i parametri, tramite procedimenti di riconoscimento distinti per rettilinei ed archi di circonferenza. Si presentano due metodi di verifica ed affinamento da applicare in successione e successivamente segue l'interpolazione vera e propria, effettuata con procedimenti iterativi, secondo il metodo dei minimi quadrati non – lineari. Le equazioni sono impostate in maniera da garantire la continuità della funzione e delle sue derivate prima e seconda alle giunzioni tra i tratti. L'applicazione considerata è rivolta alla ricostruzione planimetrica di tracciati viari, utile per fini catastali, progettuali e manutentivi, in cui segmenti di retta e archi di circonferenza si susseguono con l'interposizione di archi di funzioni a raggio variabile.

La descrizione di dipendenze funzionali complesse tra coppie di grandezze fisiche richiede spesso la suddivisione dei domini in regioni in cui il comportamento è descritto da funzioni differenti, in relazione all'attivazione di meccanismi di interazione diversi. L'esempio più noto è la successione di comportamento elastico e comportamento plastico nelle prove di trazione dei metalli che corrispondono a regioni ben distinte nei diagrammi forza – spostamento. L'interpolazione delle funzioni dai punti sperimentali segue, nei casi più semplici, al riconoscimento visuale dei domini, mentre per i casi più complessi, sono invece necessarie procedure più sofisticate. Una funzione a tratti di diversa natura è la linea d'asse di un tracciato viario in cui, alle progressive crescenti, sono associate le coordinate topografiche dell'infrastruttura che si snoda nel territorio. La tecnica progettuale di strade, ferrovie ed idrovie prevede l'introduzione archi di transizione a raggio variabile tra rettilinei e curve circolari, così da permettere di produrre variazioni continue della forza centrifuga, adeguando l'infrastruttura alle caratteristiche funzionali degli organi di sterzata che non possono produrre variazioni discontinue del raggio della traiettoria dei veicoli.

La corretta fruizione delle infrastrutture, con le relative ricadute sulla sicurezza ed il confort di marcia, richiede una progettazione non banale della geometria dei tratti di transizione, per tenere conto dell'intervallo

di velocità di percorrenza della curva e delle caratteristiche dei veicoli che la impegnano. La verifica della qualità della progettazione, così come l'analisi della possibilità di cambio delle modalità d'uso (ad es., aumento di velocità, introduzione di treni ad assetto variabile) o la progettazione di interventi in affiancamento all'esistente, richiedono la descrizione esatta delle curve di transizione. Infatti solo la loro corretta delimitazione fa sì che esse si raccordino, per costruzione con continuità ed armonia, ai tratti rettilinei e circolari adiacenti i cui estremi non sono evidenti, cosicché la determinazione dei parametri (che ne definiscono le caratteristiche funzionali) permetta di stabilire l'adeguatezza, o meno, alle modalità di circolazione previste.

4.2/1. IMPOSTAZIONE DEL PROCEDIMENTO DI RICOSTRUZIONE

Un arco di qualsiasi funzione, a derivata seconda continua e monotona, che presenti, nel finito, un punto a raggio locale infinito (solitamente un flesso) da raccordare ai segmenti di rettilineo, può essere utilizzato come curva di transizione tra rettilinei e archi di circonferenza,. Assumendo che il segmento di funzione considerato copra una deviazione angolare sufficiente, un solo parametro (essenzialmente un fattore di scala) è sufficiente, in tutti i casi di interesse pratico, per definire l'unica funzione della natura scelta, in grado di produrre condizioni di tangenza e continuità della derivata seconda agli elementi adiacenti nella loro disposizione spaziale effettiva. Lo svolgimento della curva tra i punti di tangenza è caratteristico della natura della funzione.

La tecnica progettuale ha standardizzato l'utilizzo di due curve a raggio variabile: la clotoide o spirale di Cornu, dove il raggio di curvatura locale è una funzione lineare dell'ascissa curvilinea dal flesso, e la cubica, dove il raggio di curvatura locale è lineare rispetto alla coordinata tangente al flesso (fig. 4.1.1). La trattazione della cubica, in uno spazio cartesiano, è semplice. Non altrettanto si può dire per la clotoide la cui formulazione elementare nelle coordinate intrinseche ($rs=a^2$) non rispecchia la forma complessa che la funzione assume nel piano cartesiano. Altre curve di transizione sono state proposte, ma non sono entrate nell'utilizzo corrente (ad es., la lemniscata di Bernoulli e la spirale policentrica di Searles). Volendo conservare la generalità della trattazione, è tuttavia opportuno non limitare la natura delle curve utilizzabili per i raccordi di transizione che è caratteristica dei fenomeni da esaminare e può essere variata proprio alla ricerca dei meccanismi di interazione.

Nel proiseguo, si è preferito impostare i procedimenti di interpolazione su curve di transizione definite per punti, descritte in tabelle di facile reperimento o generazione. Le tabelle tracciano la curva a parametro unitario, rispetto ad un sistema di riferimento cartesiano con origine al flesso ed assi orientati secondo la tangente e la normale alla curva al flesso, e si considera sempre il ramo di curva nel primo quadrante. Ogni punto è definito tramite le proprie coordinate cartesiane, l'ascissa curvilinea dal flesso, l'angolo di deviazione dall'origine ed il raggio di curvatura locale. La curva risultante è una spezzata la cui scansione può essere calibrata, nella stesura delle tabelle, provvedendo eventualmente ad infittimenti locali. Ricostruire un tracciato da punti misurati sulla linea d'asse significa determinare:

- ❑ per ciascun tratto rettilineo, il coefficiente angolare e l'ordinata all'origine rispetto ad un sistema di riferimento;
- ❑ per ciascun arco circolare, il raggio di curvatura e le coordinate del centro rispetto allo stesso sistema di riferimento utilizzato per i rettilinei;

- ❑ per ciascun arco a curvatura variabile, il parametro corrispondente al fattore di scala;
- ❑ oltreché le coordinate dei punti di inizio e fine di ciascun elemento.

L'ultima informazione è ridondante rispetto alle altre, ma è opportuno che sia esplicitamente fornita, in quanto il ricalcolo è non immediato. Il procedimento di ricostruzione proposto individua due momenti successivi. Dapprima si procede alla classificazione dei punti, per stabilire se ciascuno di essi è stato rilevato (con le inevitabili imprecisioni di misura) su un segmento di rettilineo, un arco circolare od un arco a raggio variabile, definendo il tracciato in maniera preliminare. Successivamente si procede all'ottimizzazione della linea ed alla conseguente minimizzazione degli errori. Infatti esiste sempre una soglia massima d'errore che definisce le regioni critiche: esse si situano per lo più tra punti di natura diversa e definiscono gli spazi per le curve di transizione (fig. 4.1.2).

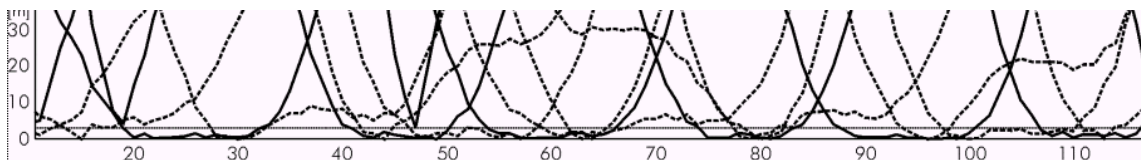


Fig. 4.1.1 – Esempi di curve di transizione: da sinistra a destra, una clotoide, una cubica, una lemniscata

Fig. 4.1.2 – Diagrammi di errore per una parte dei punti (in ascissa, identificativi dei punti, in ordinata errori)

4.3/1. CLASSIFICAZIONE DEI PUNTI E DEFINIZIONE PRELIMINARE DEL TRACCIATO

La corretta identificazione della natura del segmento di tracciato su cui è stato misurato ogni punto è fondamentale, in quanto le relazioni applicate per minimizzare l'errore sono diverse per rettilinei, circonferenze e curve a raggio variabile. Particolare difficoltà ha dato la necessità di garantire una certa robustezza dell'analisi, nonostante gli errori di misura e la spaziatura non uniforme delle osservazioni sulla linea d'asse. Il procedimento comporta la definizione di una finestra di osservazione pari a un certo numero di punti successivi e, per l'insieme di dati a disposizione, l'osservazione di sette punti si è dimostrata un buon compromesso tra significatività e risoluzione. La finestra è fatta scorrere sul rilievo e, per ogni posizione, sono stimati un rettilineo e una circonferenza interpolanti; a seguire, sono poi applicati procedimenti di esclusione ed aggregazione, diversi per rettilinei ed archi di circonferenza. La linea continua cercata è la linea d'asse incognita.

Per i rettilinei, in ciascuna posizione, è calcolato lo scarto quadratico medio dei punti ricadenti nella finestra, rispetto alla retta interpolante. Per la posizione ad errore minore, la finestra è allargata di un punto e si procede ad una nuova interpolazione; se l'errore non peggiora, il segmento è sostituito a quello originario, sopprimendo quello completamente coperto dall'allargamento. La procedura è iterata per tutte le posizioni e ripetuta, fino a che ogni ampliamento dei domini non si traduce in un peggioramento dello scarto quadratico medio. La definizione dei tratti di rettilineo si completa con l'eliminazione di tutti i segmenti che non sono stati oggetto di aggregazione e, nel caso di sovrapposizione tra domini ampliati, con la conservazione del segmento più lungo.

Più complessa è la localizzazione degli archi di circonferenza per i quali gli errori di misura dei punti costituiscono una complicazione decisamente gravosa. Il procedimento adottato si concentra sulla definizione dei probabili centri delle circonferenze. Esso parte da una stima molto grossolana della posizione del centro della circonferenza interpolante la finestra di osservazione, per ogni posizione, che prevede una tripartizione della finestra ed una mediatura delle posizioni dei punti in ciascuna delle tre parti. Si ottiene una nuvola di centri, piuttosto dispersi nello spazio, da cui sono eliminati immediatamente quelli corrispondenti a raggi di curvatura eccessivi rispetto ad una soglia prefissata (fig. 4.1.3).

Si compila poi una tabella triangolare (essendo ovviamente ogni distanza priva di verso: in avanti od all'indietro) con le distanze tra ogni coppia di centri: iterativamente la coppia di centri più vicini è fatta coalescere, in una posizione mediata, sul peso dei centri. Il peso dei centri, uniforme alla prima iterazione, è aumentato all'atto dell'aggregazione alla somma dei punti che portano alla definizione dei centri componenti, contando ogni punto una volta sola. L'iterazione è fermata ad una soglia di distanza massima, da calibrare sull'insieme di dati a disposizione. Successivamente si procede alla rimozione dei centri non aggregati, con una seconda aggregazione per la quale è possibile adottare una distanza di soglia di ordine del doppio di quella precedentemente utilizzata.

La classificazione dei punti avviene calcolando, per ogni punto, la distanza da ogni rettilineo e da ogni centro individuato. In un sistema di riferimento polare di ogni centro, una parte dei punti si dispongono attorno ad una retta orizzontale prossima ad un minimo. Tale minimo è una approssimazione del raggio della circonferenza e, sottraendolo alla distanza, si approssima l'errore di ogni punto rispetto alla circonferenza. Sovrapponendo i diagrammi di errore, rispetto a tutti i rettilinei ed a tutte le circonferenze, il punto è attribuito all'elemento rettilineo o circolare che genera un errore minore. Le linee continue rappresentano rettilinei, le linee discontinue circonferenze, mentre la retta orizzontale rappresenta la soglia di errore che definisce le regioni di dubbio. Seguono procedure per la regolarizzazione di tratti uniformi, interrotti da un numero molto limitato di punti, e per l'inserimento forzato di tratti di transizione, di ampiezza sufficiente, tra rettilinei e archi di circonferenza successivi.

4.4/1. VERIFICA E AFFINAMENTO DELLA CLASSIFICAZIONE DEI PUNTI

I procedimenti esposti individuano quali punti sono presumibilmente misurati su tratti rettilinei, quali su tratti circolari e, per esclusione, quali afferiscono a curve di transizione. Una verifica preliminare della classificazione è effettuata conducendo, da ogni centro, il segmento perpendicolare ai rettilinei adiacenti. Il piede della perpendicolare deve cadere, per definizione, in un tratto di curva di transizione. Se la condizione non è verificata, l'individuazione dei tratti va rivista in quell'intorno, modificando le soglie di errore che governano le procedure di classificazione precedentemente esposte.

La verifica successiva suppone i tratti correttamente individuati, in natura e successione, e ne perfeziona posizione ed ampiezza, analizzando i tratti a curvatura variabile. Condizione necessaria perché la classificazione dei punti sia esatta, è che sia possibile tracciare una curva di transizione che si colleghi ai rettilinei e alle curve circolari, con continuità fino alla derivata seconda, rispettando il vincolo spaziale dato dalla classificazione. Infatti tale vincolo impone che la curva di transizione copra tutti e soli i punti ad essa afferenti, cioè che essa non inizi o termini tra punti che definiscono rettilinei o archi di circonferenza, interpolando punti che ad essa non competono e, d'altra parte, che non si interrompa prima di avere interpolato tutti i punti afferenti alla curva a raggio variabile (fig. 4.1.4).

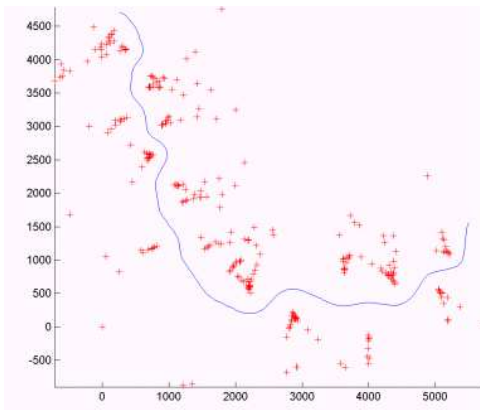


Fig.4.1.3 – Determinazione preliminare dei centri delle circonferenze

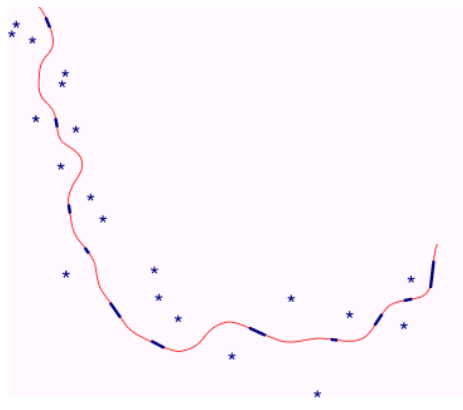


Fig.4.1.4 – Operazioni di classificazione, con evidenziati i rettilinei ed i centri delle circonferenze riconosciuti

La verifica della suddetta condizione comporta la determinazione approssimata del parametro della curva (fattore di scala) e può essere condotta utilizzando la curva normalizzata nella forma tabellare. Il rapporto tra lo scostamento dal rettilineo al punto finale della curva di transizione ed il raggio locale elide il fattore di scala, e tale rapporto può essere calcolato sulla base del raggio e della posizione della circonferenza, in corrispondenza del punto estremo della curva circolare, individuato dalla classificazione. Se la classificazione è corretta, la curva a raggio variabile non si può spingere oltre tale punto e, ad ogni valore del rapporto, corrisponde un solo punto della curva normalizzata per il quale la deviazione angolare dalla direzione del rettilineo assume un valore definito. In generale, esso non è tale da garantire la continuità della derivata prima alla circonferenza nel punto per il quale è stato calcolato il rapporto tra scostamento e raggio. Pertanto tale rapporto deve essere ricalcolato per punti della circonferenza più prossimi ai punti misurati sulla curva a raggio variabile, senza tuttavia oltrepassarne il primo che delimita la competenza della curva a raggio variabile entro cui l'arco di circonferenza non può spingersi (fig. 4.1.5).

Se nessun punto soddisfa le condizioni, allora è necessario rivedere la classificazione dei punti presso il confine tra curva a raggio variabile e circonferenza. Se invece si individua un punto che soddisfa la condizione, si ricava il fattore di scala dal rapporto tra il raggio della circonferenza e quello locale della curva normalizzata. Tramite esso, si calcola la lunghezza della curva di transizione in proiezione sulla direzione del rettilineo e si determina la posizione del punto d'inizio della curva, cioè l'origine del suo sistema di riferimento locale. Se esso non è compreso tra i punti estremi che definiscono il rettilineo e la curva a raggio variabile, è necessario rivedere la classificazione dei punti presso questa frontiera.

4.5/1 OTTIMIZZAZIONE DEL TRACCIATO

Nell'ipotesi che i punti siano misurati indipendentemente l'uno dall'altro, la ricostruzione definitiva del tracciato può essere ottenuta per minimizzazione del quadrato della distanza dei punti dalla linea d'asse, con opportune equazioni di condizione con parametri. La forma delle equazioni dipende dalla natura dei tratti; pertanto tutti i punti misurati devono essere classificati correttamente. La scrittura delle equazioni è immediata per rettilinei e circonferenze.

- Per i rettilinei, si utilizza direttamente la relazione della distanza punto – retta, linearizzata rispetto ai coefficienti angolari ed alle ordinate all'origine.

- ❑ Per le circonferenze, l'errore è dato semplicemente dallo scostamento fra il raggio e la distanza tra i centri ed i punti misurati.
- ❑ Rettilinei e curve circolari sono comunque legati fra loro dall'equazione di vincolo per cui i centri devono giacere sulle bisettrici degli angoli della spezzata dei rettilinei (esso può essere semplicemente imposto come equidistanza dei centri da ciascuna delle rette limitrofe, ricorrendo alla relazione della distanza punto – retta).

La scrittura della distanza tra i punti e la curva a raggio variabile richiede invece qualche riflessione. La generalità della trattazione e la difficoltà di manipolazione della forma cartesiana dell'equazione delle curve di uso comune sconsigliano l'utilizzo della loro espressione analitica. Tuttavia senza di essa, non è possibile inserire nel processo di ottimizzazione le curve di transizione in quanto tali. D'altro canto, fissate le posizioni del rettilineo e della circonferenza adiacenti, esiste uno ed un solo valore del parametro della curva che permette di soddisfare le tre condizioni di continuità a ciascun estremo (funzione, derivata prima, derivata seconda) e tale proprietà permette di attivare un procedimento iterativo.

Si consideri la scansione tabellare della curva di transizione definita dal valore approssimato del fattore di scala. Per ogni punto misurato, è possibile individuare i due punti della scansione ad esso più vicini ed interpolarli con una retta; la distanza tra il punto misurato e tale retta interpolante costituisce una misura dell'errore ed il sistema di riferimento della curva di transizione ha per asse delle ascisse il rettilineo adiacente. La maggiore variazione nella distanza tra i punti misurati e la clotoide deriva dalle modifiche della posizione del rettilineo, in quanto lo scivolamento dell'origine lungo il rettilineo ha conseguenze minori, poiché la classificazione, operata sui punti misurati, limita tale grado di libertà. Pertanto è possibile esprimere la distanza tra i punti misurati e l'interpolazione della curva di transizione, in funzione dei parametri del rettilineo, per cui l'ottimizzazione può tenere conto dell'influenza delle rototraslazioni dei segmenti sui punti afferenti alle curve di transizione. Infatti l'ascissa e l'ordinata di uno qualsiasi dei due punti per cui si interpola la curva di transizione sono noti, perché ottenibili dalle tabelle e dal valore stimato del parametro. Similmente è nota la deviazione δ al punto tabellato, rispetto al sistema di riferimento della curva, e sono anche note, in via approssimata, le coordinate dell'origine del sistema di riferimento locale in quello generale. Indicando con apice i parametri della retta interpolante e senza apice quelli del rettilineo, nel sistema di riferimento generale, i parametri della retta interpolante (fig. 4.1.6):

$$y = m'x + q' \quad \text{dove} \quad m' = \tan \alpha'$$

possono essere espressi in funzione di m e q :

$$\alpha' = \delta + \alpha \quad q' = q - (x_o \cos \alpha + \lambda \cos \alpha - \mu \sin \alpha) \tan \alpha' \quad \text{dove} \quad \alpha = \arctan m$$

Tali espressioni, inserite nella formula della distanza punto – retta per il punto misurato in oggetto, consentono la linearizzazione, rispetto ai parametri del rettilineo. A seguito della compensazione ai minimi quadrati, sono modificate le posizioni di rettilineo e di arco di circonferenza; allora è necessario ricalcolare il parametro della curva con il metodo, già descritto in precedenza, verificare nuovamente la classificazione

dei punti, individuando i punti della scansione, più vicini a ciascun punto misurato, e procedere ad una nuova ottimizzazione. Al termine, quando la procedura arriva a convergere alla soluzione attesa, la misura e la valutazione dell'errore possono essere effettuate con i ben noti test statistici per i minimi quadrati.

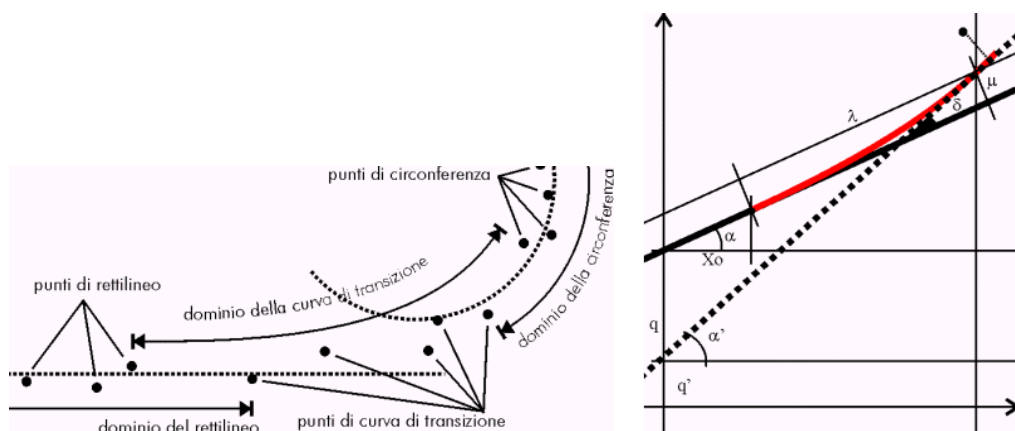


Fig. 4.1.5 – Domini dei tratti ad una successione rettilineo – curva di transizione – arco di circonferenza

Fig. 4.1.6 – Costruzione per la dipendenza delle curve a raggio variabile dalle caratteristiche dei rettilinei

4.1/2 RILIEVO PROFILOMETRICO DI DETTAGLIO DI UNA TESTATA AEROPORTUALE

Le sovrastrutture aeroportuali richiedono resistenze, e qualità superficiali, superiori rispetto alle strade ed alle autostrade. La manutenzione dell'Aeroporto di Milano-Linate ha previsto il rifacimento della pavimentazione in calcestruzzo della Testata 36R. La geometria e la regolarità superficiale di progetto per la sovrastruttura dovevano essere necessariamente garantiti per ragioni di comfort e sicurezza. Con l'obiettivo di verificare la corrispondenza tra le caratteristiche geometriche, e superficiali, della nuova opera ed il progetto, è stato effettuato un rilievo di dettaglio con uno strumento ad alta precisione: Walking Profiler. I risultati della compensazione della rete sono stati analizzati, con lo scopo di eliminare direttamente gli errori grossolani, evidenziando l'assoluta necessità di effettuare lo studio della chiusura delle singole maglie e quantificare l'incremento d'affidabilità conseguibile con rilievi supplementari.

Le principali operazioni compiute da un aeromobile in aeroporto sono il decollo e l'atterraggio. I fattori più importanti, influenzanti la sicurezza degli aeroplani durante tali fasi, sono le caratteristiche geometriche della pista (lunghezza, pendenze longitudinali e trasversali) e quelle dei materiali da costruzione. Infatti la pavimentazione deve soddisfare le prescrizioni inerenti alle pendenze e all'attrito, previste da capitolato e da norme ENAC, e deve adempiere i requisiti connessi alla regolarità. In particolare, il manto superficiale deve avere una regolarità tale che, posto un regolo lungo 3 m, non si devono rilevare asperità e cavità superiori a 3 mm. Il parametro che permette di identificare il grado di comfort e di sicurezza di una pavimentazione è la rugosità. Dal punto di vista di un pilota, un'elevata rugosità è indice, oltre che di basso comfort, soprattutto di elevate vibrazioni al pannello di controllo, mettendo in pericolo l'aereo, l'equipaggio e i passeggeri.

D'altro canto una certa rugosità superficiale è necessaria a garantire l'aderenza tra pneumatici e pavimentazione. Le cause di un'eccessiva rugosità possono essere differenti: carico veicolare, effetti ambientali, materiali costruttivi e metodo di messa in opera. Durante la manutenzione straordinaria nell'agosto 2002 dell'Aeroporto Milano-Linate che ha previsto la chiusura dell'aeroporto per ventuno giorni, si è proceduto al rifacimento della Testata 36R in calcestruzzo. Il principale problema tecnico ha riguardato

la messa a punto del conglomerato cementizio che, oltre a dover garantire le elevate resistenze meccaniche ($\geq 30 \text{ daN/mm}^2$) in soli quattro giorni (l'ultima lastra è stata gettata il sedicesimo giorno di lavoro), doveva essere sufficientemente lavorabile per poter garantire l'adeguata rugosità. In realtà, a causa dell'elevata additivazione, durante la messa in opera si è constatato come la miscela fosse poco lavorabile, creando problemi di livellamento superficiale.

All'apertura dell'aeroporto, da un'indagine tra i piloti, si è verificato come le vibrazioni indotte sugli aerei fossero elevate, tant'è vero che alcuni perdevano aderenza e sobbalzavano sulla testata. Il quadro che si presentava era tale da poter essere corretto, previo rilievo profilometrico dell'area, solo tramite fresatura delle zone estremamente rugose.

4.2/2 WALKING PROFILER: STRUMENTO DI RILIEVO AD ALTA PRECISIONE

I profilometri sono strumenti che permettono di rilevare il profilo di una superficie. In campo stradale, le due principali categorie di profilometri sono:



Fig. 4.2.1 – Walking Profiler

- ❑ profilometri statici (a contatto): rilevano la quota di un punto tramite un palpatore; sono molto precisi, ma hanno una bassa produttività.
- ❑ profilometri inerziali (senza contatto): rilevano la quota di un punto tramite la proiezione di un'onda acustica o elettromagnetica; hanno un'elevata produttività, ma sono meno precisi rispetto i precedenti.

Il profilometro utilizzato è il Walking Profiler (Fig. 4.2.1). E' uno strumento prodotto dalla ARRB Transport Research e risponde alle specifiche della Banca Mondiale per i profilometri di Classe I. Esso è sensibile alle lunghezze d'onda comprese nell'intervallo 1,3-30 m (che corrispondono, rispetto alla norma CNR 125/88, alla macrotessitura e alla megatessitura). Il palpatore è una barra di lunghezza fissa pari a 241,3 mm (9,5 pollici). La precisione garantita è di $\pm 0,01 \text{ mm}$ a passo. Al centro barra, è posto un inclinometro che, collegato ai dispositivi elettronici, rileva l'angolo tra il vettore gravità e la normale alla barra. La differenza relativa di quota, tra i punti estremi rilevati dal palpatore, è ricavata automaticamente dal computer di bordo, come prodotto del seno dell'angolo misurato per la lunghezza fissa della barra. La produttività è di circa 800 m/h.

4.3/2 L' INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX (IRI)

Il principale indice standard che permette di analizzare la rugosità di una pavimentazione è l'IRI. Standardizzato dalla Banca Mondiale nel 1986, ha le seguenti peculiarità: è correlato alle sole risposte vibratorie dei veicoli, è ricavabile matematicamente da profili stradali, è applicabile ad una ampia serie di dispositivi, è affidabile e riproducibile. L'algoritmo d'elaborazione dei profili simula il comportamento di un veicolo standard (Golden Car) che idealmente transita sul profilo esaminato. Il veicolo (Fig. 4.2.2) modellato come una massa sospesa (m_s) su sospensioni caratterizzate da rigidità (k_s) e da smorzamento (c_s),

posizionate sulla massa non – sospesa (m_U) delle ruote, dei freni e delle sospensioni. Il contatto ruota pavimentazione è simulato con una semplice molla (k_T). La risposta in frequenza del modello si estende approssimativamente da 0,5 a 20 Hz, ovvero l'IRI è sensibile a difetti con lunghezze d'onda comprese tra 1,2 e 30 m. L'implementazione matematica è ottenuta dalle equazioni d'equilibrio della massa sospesa e di equilibrio globale:

$$\begin{cases} \ddot{z}_S m_S + c_S (\dot{z}_S - \dot{z}_U) + k_S (z_S - z_U) = 0 \\ -\ddot{z}_S m_S + \ddot{z}_U m_U + k_T (z_U - z_P) = 0 \end{cases}$$

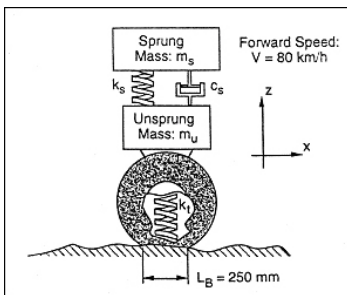


Fig. 4.2.2 – Schema del quarto di veicolo

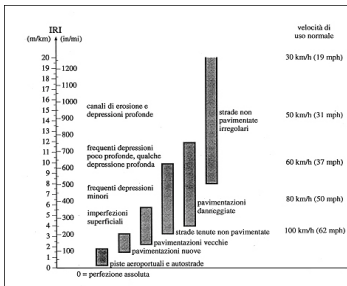


Fig. 4.2.3 – Scala di valutazione IRI

dove: z_S è la quota della massa sospesa, relativa alla posizione di equilibrio statico, e z_U è la quota della massa non – sospesa, relativa alla posizione di equilibrio statico. La classificazione unificata è riportata nella Figura 4.2.3. La standardizzazione dell'IRI riguarda sia la velocità di percorrenza (80 km/h), sia la dimensione dell'impronta del pneumatico assunta pari a 250 mm di lunghezza. L'IRI corrisponde all'accumulo degli spostamenti delle sospensioni, diviso per la lunghezza del profilo analizzato. Per un profilo lungo L , percorso a velocità V standardizzata, si ha:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L \left| \dot{z}_S - \dot{z}_U \right| dt$$

4.4/2 GEOMETRIA E METODO DI RILIEVO PROFILOMETRICO DELLA RETE TOPOGRAFICA

La progettazione della rete è stata svolta in modo da ricoprire la parte centrale della testata in esame, ovvero l'area usualmente utilizzata per le fasi di decollo e atterraggio. Con operazioni topografiche si sono determinati le posizioni dei caposaldi. Successivamente in base alle disposizioni previste da normativa e dalla ditta produttrice dello strumento, con l'ausilio di spago e gesso, sono state tracciate le linee longitudinali e quelle trasversali. La forma geometrica dell'area è un rettangolo con lati di circa 20×232 m. La distanza tra le tre longitudinali è stata scelta in funzione dell'aeromobile, con maggiore larghezza del carrello, che transita sulla pista dell'aeroporto, ovvero l' Airbus A300 ($L_{carello} = 9.60 m$).

Le longitudinali esterne (Long-Dx e Long-Sx) corrispondono ai lati maggiori perimetrali dell'area delimitata; invece quella centrale (Long-CI) risulta spostata, rispetto la Center line (CI), di circa 36 cm. L'assimetria è stata necessaria per evitare il posizionamento della Long-CI sui fuochi di segnalamento pista. Per quanto concerne le trasversali, la relativa distanza corrisponde a 0,4826 m (2 piedi del profilometro). La lunghezza delle trasversali corrisponde alla distanza tra le due longitudinali più esterne (20.0279 m pari a 83 piedi

dello strumento); invece quella delle longitudinali è tale da ricoprire il tratto di testata usualmente utilizzato (231.6480 *m* pari a 960 *piedi* dello strumento). La rete di rilievo, così sviluppata, comprende: 3 longitudinali, 481 trasversali e 960 maglie rettangolari.

4.5/2 VERIFICA DELLO STATO SUPERFICIALE

Con riferimento all'indagine soggettiva tra i piloti e con lo scopo precipuo d'ottenere ulteriori riscontri oggettivi, per quanto concerne il cattivo stato della nuova pavimentazione, è stato calcolato il valore dell'IRI per le tre longitudinali. Il valore dell'indice per piste aeroportuali deve essere compreso nell'intervallo 0.25-2 *m/km* (Fig. 4.2.3). Il software utilizzato per l'analisi dei tre profili longitudinali è il Footworks, strumento d'analisi in dotazione con il Walking Profiler.

PROFILO	IRI [<i>m/km</i>]
Long-dx	6.12
Long-cl	5.43
Long-sx	6.76

Fig. 4.2.4 – IRI Testata 36R

I risultati, riportati nella tabella di figura 4.2.4, evidenziano come la testata risultava essere, benché di nuova costruzione, una pavimentazione danneggiata. In conformità a tale analisi, si è evinto come effettivamente fosse necessario eseguire la fresatura della Testata 36R e ripristinare la superficie, in modo da soddisfare le prescrizioni di Capitolato.

4.6/2 ANALISI DEI DATI DELLA COMPENSAZIONE

Per ogni nodo, i risultati della compensazione della rete forniscono la quota ed il relativo sqm, per ogni lato, lo scarto residuo, il relativo sqm, il residuo normalizzato e la ridondanza locale, e per l'intera rete, sigma zero ed il conteggio delle equazioni, delle incognite e della ridondanza globale. Considerando un livello di significatività 0.3%, ovvero un'intervallo di confidenza $k=3$, l'analisi dei dati ha evidenziato come l'1.33% dei lati avesse residuo normalizzato maggiore dell'intervallo di confidenza. In particolare, tali discrepanze risultavano uniformemente distribuite sulla rete di livellamento, tali per cui non si poteva specificare quale lato potesse essere affetto da errore grossolano.

Non avendo ottenuto buoni risultati dal test sui residui normalizzati, si è passati ad analizzare i semplici residui. La base di partenza da cui si è proceduto, corrisponde al principio del regolo da 3 *m* su 3 *mm*. Da tale limitazione, considerando le diverse posizioni che una stadia può assumere, si sono determinati i lati il cui scarto residuo, preso in valore assoluto, era maggiore di 0.15 *cm*. Con quest'approccio, l'8.66% dei lati aveva residuo assoluto maggiore della limitazione imposta. Le osservazioni, non soddisfacenti tale condizione, riguardavano solo le trasversali (21.6% delle osservazioni trasversali). Essendo le osservazioni da scartare di numero elevato ed essendo uniformemente distribuite, si è passati ad un'ulteriore verifica. L'individuazione delle maglie con chiusura maggiore di $1.5 \times L$ *mm* (dove 1.5 *mm* è il residuo massimo accettabile e *L* il numero di lati della maglia) ha permesso di determinare il lato (o i lati) con scarti residui non conformi. Di conseguenza, si è provveduto alla loro eliminazione, per poi eseguire una nuova compensazione i cui risultati hanno passato il test riguardante la chiusura delle maglie. Il confronto, tra le quote teoriche di progetto e quelle ottenute dalla seconda compensazione, ha permesso di determinare il piano quotato in base al quale effettuare la fresatura.

4.7/2 PROGETTAZIONE DI UNA RETE AFFIDABILE

In funzione dei problemi riscontrati nelle operazioni di compensazione della rete effettivamente sviluppata (VO – Fig. 4.2.13), si è successivamente studiata, per simulazione, una configurazione ottimale. Quest'analisi è eseguibile senza effettuare misure, ma utilizzando le ridondanze locali. Una prima simulazione ha previsto la misura anche delle diagonali di ogni maglia (VOX – Fig. 4.2.13). Il valore di sigma zero è stato imposto pari a 0.15 cm/km. Le due compensazioni hanno evidenziato quanto riportato in figura 4.2.5. Per quanto concerne il valore degli sqm dei caposaldi, il valore massimo diminuisce nel caso della rete VOX, in altre parole diminuisce la dispersione dei valori (l'istogramma dei valori è riportato nelle figure 4.2.6 e 4.2.7). Il rapporto tra il numero di osservazioni e il numero d'incognite, per la rete VO, è pari a 1.66, mentre, per la rete VOX, essendo aumentato il numero delle osservazioni e rimasto costante quello delle incognite, è pari 3, evidenziando uno schema della rete più affidabile. Un riscontro di tale situazione si ha analizzando il valore della ridondanza totale: quello della rete VOX è tre volte più grande rispetto quello della rete VO, ed i valori minimi e massimi delle ridondanze locali sono tutti maggiori nel primo caso. A causa delle caratteristiche tecniche e di costruzione del profilometro, la rete VOX proposta, in realtà, non è realizzabile. Bisogna infatti che i lati diagonali delle maglie rettangolari soddisfino il teorema di Pitagora misurando un numero intero di piedi. La maglia progettata, considerando l'area da rilevare, ha le seguenti dimensioni: $(41 \text{ piedi})^2 = (40 \text{ piedi})^2 + (9 \text{ piedi})^2$.

	N° long.	N° trasv.	N° diag.	N° capis.	N° oss.	N° inc.	Oss./Inc.	SQM punti max [cm]	SQM punti max con rif.	Ridond. totale	totale/N° oss.	Ridond. min
VO	3	481	0	1	2402	1443	1.66	2.723	0.240	960	0.40	0.037
VOX	3	481	1920	1	4322	1443	3.00	2.626	0.221	2880	0.67	0.068
NVOX	3	487	1944	1	4376	1461	3.00	2.642	0.126	2916	0.67	0.068
2RETI	6	109	864	1	2057	654	3.15	1.732	0.128	1404	0.68	0.166
2RETIx3	6	325	2576	1	6145	1950	3.15	1.436	0.240	4196	0.68	0.296

Fig. 4.2.5 – Risultati delle compensazioni delle reti

La rete conseguentemente progettata è data dall'unione di due reti (2RETI – Fig.4.2.13) sovrapposte e traslate trasversalmente una rispetto all'altra di tre piedi. Tale soluzione è necessaria perché, oltre a ricoprire totalmente l'aria in oggetto, permette di evitare il problema dei fuochi d'illuminazione posizionati longitudinalmente a centro pista. La simulazione della compensazione di questa rete non può essere confrontata con quella della rete VOX, essendo quest'ultima di lunghezza differente, sempre a causa del problema della lunghezza fissa del piede. Pertanto si è generata un'ulteriore rete (NVOX), con le stesse caratteristiche della rete VOX, ma con un numero di maglie maggiori (Fig. 4.2.5). Il rapporto tra numero di osservazioni e numero d'incognite per la rete NVOX è circa uguale a quello della rete originaria VOX, mentre, per la rete 2RETI, a parità di superficie, è diminuito sia il numero delle osservazioni (53%), sia il numero delle incognite (55%). Anche la ridondanza totale è diminuita del 52% a causa del diradamento della rete, benché notevole sia l'incremento delle ridondanze locali minime e, di conseguenza, l'affidabilità

della rete. Per quanto concerne il valore degli sqm dei caposaldi, si può notare, come per la rete 2RETI, il valore massimo diminuisce molto rispetto alla rete NVOX (Fig. 4.2.8 e Fig. 4.2.9). Con lo scopo specifico di portare il valore della ridondanza totale della rete 2RETI pari a quello della rete NVOX, si è progettata un altro schema (denominato rete 2RETI×3 – Fig. 4.2.14) che prevede un ulteriore infittimento del numero di nodi a parità di superficie, tramite sovrapposizione di sei reti base identiche: due traslate come per la rete 2RETI e tre traslate longitudinalmente, sempre con una traslazione di tre passi una rispetto l'altra. La simulazione della compensazione della nuova rete ha fornito i risultati riportati ancora in figura 4.2.5. Il rapporto tra numero di osservazioni e numero d'incognite per la rete 2RETI×3 è sempre pari a 3, ma la ridondanza totale, grazie all'infittimento dei nodi, risulta essere maggiore del 31% rispetto alla rete NVOX e del 67% rispetto alla rete 2RETI, e soprattutto si ha anche un ulteriore e decisivo incremento delle ridondanze locali minime.

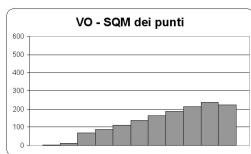


Fig. 4.2.6 – SQM dei punti della rete VO

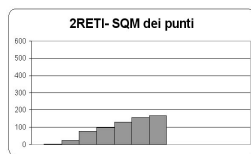


Fig. 4.2.9 – SQM dei punti della rete 2RETI

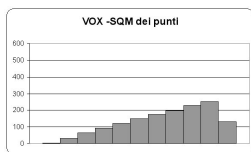


Fig. 4.2.7 – SQM dei punti della rete VOX

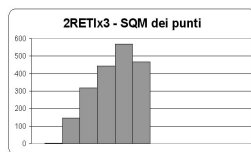


Fig. 4.2.10 – SQM dei punti della rete 2RETI×3

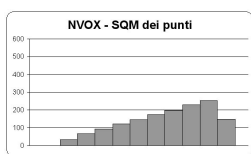


Fig. 4.2.8 – SQM dei punti della rete NVOX

NB: $2mm = 0.25\ cm$

Per quanto concerne il valore degli sqm dei caposaldi, si può notare, come la rete 2RETI×3 presenti valori degli sqm (Fig. 4.2.10) minori rispetto alle due reti di confronto (46% rispetto alla rete NVOX e 17% rispetto alla rete 2RETI). Con lo scopo esclusivo di uniformare la distribuzione degli sqm dei caposaldi, si è imposto infine un riferimento medio, supponendo ogni nodo passibile di una traslazione (nulla) rispetto ad un caposaldo fittizio, esterno alla rete, e si è simulata la compensazione per tutte e cinque le reti analizzate. I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 4.2.11.

In conclusione, occorre osservare che il rilievo della Testa 36R è stato realizzato per determinare le zone da sottoporre a fresatura, al fine di migliorarne la rugosità e la geometria. In base allo studio dei risultati della relativa compensazione, si è evinto come la rete utilizzata risulti essere di bassa affidabilità. Lo strumento utilizzato assicura un'elevata precisione, per quanto riguarda il rilievo delle quote, ma è di difficile posizionamento, tant'è vero che gli errori grossolani determinati si concentrano soprattutto nella zona finale di rilievo, ovvero al decimo giorno di lavoro notturno.

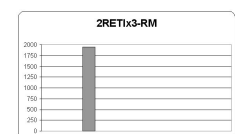
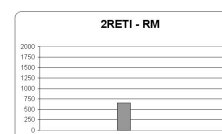
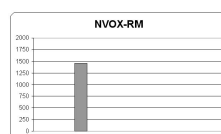
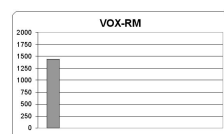
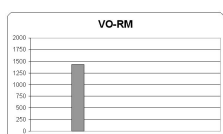


Fig. 4.2.11 – SQM dei punti delle reti con riferimento medio (NB: $1.5\ mm = 0.03\ cm$)

La rete progettata a posteriori (2RETI×3) è sicuramente quella ottimale, ma bisogna comunque evidenziare che, avendo uno sviluppo triplo rispetto a quella effettivamente compiuta e considerando la produttività, con un solo profilometro sarebbe necessario circa un mese di lavoro notturno. Tale quantità di tempo, viste le tempistiche di un aeroporto e considerando che la chiusura diurna di una pista è eseguita solo in caso di estrema necessità o pericolo, può sicuramente rappresentare un problema.

4.8/2 VERIFICA IN SITO DI UNA RETE AFFIDABILE PROGETTATA AD HOC

In funzione alle problematiche riscontrate durante la fase di rilievo della testata di un aeroporto, si è deciso di effettuare prima di tutto un'analisi dei residui ottenuti tramite compensazione della rete, poi di analizzare i risultati conseguiti ed infine di verificare in situ l'affidabilità e la fattibilità della rete, progettata per sopperire alle mancanze di quella utilizzata per il rilievo eseguito in aeroporto.

Dopo l'incidente aereo avvenuto l'8 ottobre 2001, l'Aeroporto di Milano – Linate è stato sottoposto a visita ispettiva da parte dell'ENAC. L'indagine eseguita ha evidenziato l'immediata necessità di sottoporre la pista di volo a manutenzione straordinaria. All'apertura dell'aeroporto, come già detto in precedenza, si è potuto appurare come le vibrazioni indotte agli aerei al passaggio sulla Testata 36R fossero elevate. Con l'obiettivo di verificare la corrispondenza tra le caratteristiche geometriche, e superficiali, della nuova opera, ed il progetto, è stato effettuato un rilievo di dettaglio con uno strumento di alta precisione: Walking Profiler.

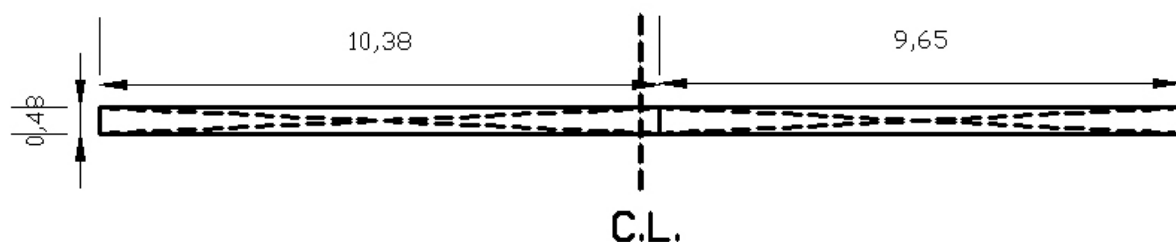


Fig. 4.2.12 – Rete VO e VOX

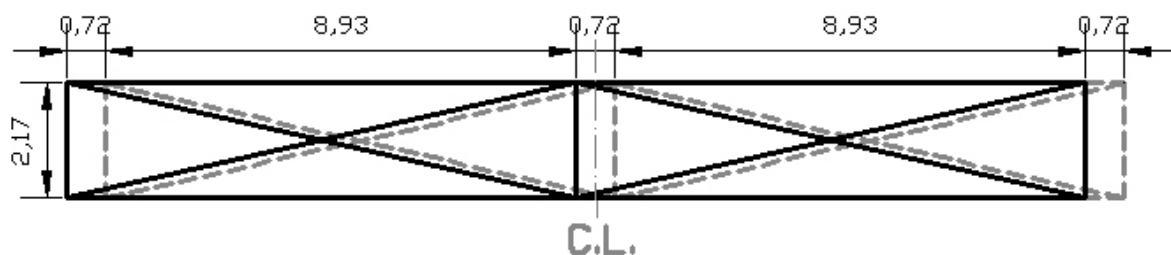


Fig. 4.2.13 – 2RETI

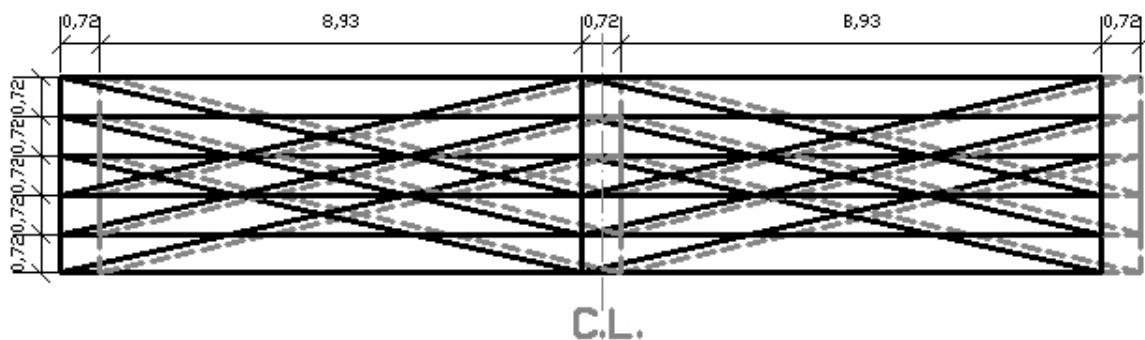


Fig. 4.2.14 – 2RETI×3

Le quote stimate, ottenute dalla compensazione della rete, sono state utilizzate per la realizzazione di piani quotati e DTM della superficie sottoposta ad indagine che, confrontati con quelli teorici, hanno permesso di evidenziare i dossi e gli avvallamenti presenti da rettificare. In base all'esperienza sviluppata ed ai risultati ottenuti dall'intero lavoro, si è successivamente proceduto alla progettazione di una rete affidabile che, oltre ad avere un numero di nodi sufficiente per ottenere buoni risultati, soddisfa anche le esigenze dovute alle caratteristiche geometriche e meccaniche del profilometro (palpatore di dimensioni fisse) e prende in analisi la necessità di evitare il rilievo delle luci di segnalamento di centro pista (fuochi).

Quest'analisi è stata eseguita senza effettuare fisicamente alcuna misura, ma utilizzando il calcolo delle ridondanze locali, essendo tale informazione fornita esclusivamente da numeri puri, indipendenti dal sistema di riferimento e non dipendenti dai valori delle osservazioni stesse, ma unicamente dalla geometria della rete rilevata e dai pesi delle osservazioni, e pertanto determinabile, a priori, prima dell'esecuzione del lavoro, cosa che permette la verifica della sua bontà. Con lo scopo esclusivo di uniformare la distribuzione degli sqm dei capisaldi, si è imposto infine un riferimento medio attraverso l'introduzione di un caposaldo origine fittizio esterno alla rete.

La verifica della rete progettata sia dal punto di vista dell'affidabilità, sia di quello della fattibilità, non si è potuta eseguire in aeroporto, per ovvi ed evidenti motivi di ordine pratico. Pertanto il controllo è stato sviluppato, su un'area di limitate dimensioni, presso il Politecnico di Milano; ovvero è stata individuata un'area, sufficientemente grande, nei pressi del Laboratorio Sperimentale Stradale del DIAR – Sezione Infrastrutture Viarie, per permettere un corretto rilievo. La rete di rilievo progettata è attualmente utilizzata, per la verifica su un'area di vaste dimensioni, ovvero presso l'Aeroporto di Orio al Serio di Bergamo, dovendo rilevare la pavimentazione della pista di volo per la programmazione della futura manutenzione straordinaria.

4.9/2 ANALISI DEI RESIDUI OTTENUTI TRAMITE COMPENSAZIONE

La prima analisi, sviluppata dopo la compensazione della rete effettivamente utilizzata per il rilievo dell'aeroporto, è consistita nell'analisi dei residui ottenuti dalla stessa. L'analisi ha riguardato l'esame della loro distribuzione che è stata supposta essere normale, simmetrica con media, moda e mediana coincidenti e code abbastanza vuote.

$$\hat{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^3}{\sigma_0^3}}{N} \quad [1]$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^4}{\sigma_0^4}}{N} \quad [2]$$

$$\frac{\hat{\gamma}^2}{6/N} + \frac{(\hat{\beta} - 3)^2}{24/N} \approx \chi_2^2 \quad [3]$$

L'asimmetria della distribuzione è stata esaminata attraverso il calcolo del coefficiente di asimmetria [1]; mentre un secondo indice di forma fondamentale per la verifica della normalità è stato l'indice di curtosi per lo studio del comportamento delle code [2]. Dopodiché il test utilizzato per l'analisi della normalità della distribuzione è stato quello non – parametrico di Pearson et al. [3] che ha come ipotesi di base un campione estratto da una distribuzione normale.

Il primo passo, sviluppato per questa analisi, è consistito nella realizzazione di grafici che rappresentano la distribuzione dei residui calcolati fra i dislivelli compensati e quelli osservati. Dati i valori minimi e massimi dei residui della compensazione, riportati in tabella di figura 4.2.15, il raggruppamento dei dati è stato sviluppato con passo pari a 0.1 cm, a partire dal valore pari a -1 cm sino a 0.9 cm. La sola analisi visiva del grafico evidenzia come la distribuzione risulta avere picchi centrali elevati e code molto piatte, ovvero la distribuzione sembra essere non – normale (Figura 4.2.16). La tabella di figura 4.2.17 riporta quanto ottenuto attraverso il test di Pearson et al., ovvero la distribuzione dei residui risulta essere non conforme alla distribuzione normale, evidenziando tra l'altro l'esistenza di correlazioni tra i residui.

Residuo	Compensazione
Minimo [cm]	-0.4625
Massimo [cm]	0.5948

Fig. 4.2.15 – Residui minimi e massimi della compensazione

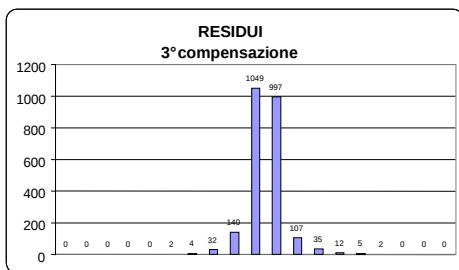


Fig. 4.2.16 – Distribuzione dei residui della compensazione

Compensazione	
Res ³	896,512
N.	2385
sigma zero [cm]	1,363
sigma zero ³	2,532
Assimetria	0,148
Res ⁴	1079,152
N.	2385
sigma zero [cm]	1,363
sigma zero ⁴	3,451
Curtosi	0,131
Val. stimato	827
Lim. Zona critica	29

Fig. 4.2.17 – Verifica della normalità dei residui

Con l'intento di verificare come i residui variano in funzione della ubicazione del lato della rete rispetto l'area analizzata, sono stati analizzati alcuni dei grafici che mettono in relazione posizione del caposaldo con il relativo residuo. Essendo i residui proporzionali ai pesi, ovvero nel caso in esame al numero di passi dello strumento di misura, a meno di casuali fluttuazioni, i grafici evidenziano effettivamente come quelli riferiti ai lati della rete appartenenti alle trasversali ($L_{Trasv.} \cong 10 \text{ m}$) hanno valori di gran lunga maggiori rispetto a quelli riferiti ai lati della rete appartenenti alle longitudinali ($L_{Long.} \cong 0,5 \text{ m}$). Purtroppo la semplice analisi dell'andamento non ha permesso di determinare il vero motivo per cui i residui non risultano normalmente distribuiti. Una causa nascosta potrebbe risiedere nei meccanismi di rilievo dello stesso Walking Profiler.

4.10/2 ANALISI DEI PIANI QUOTATI E DEI DTM GENERATI

I risultati ottenuti dalla compensazione della rete sono stati utilizzati per generare i piani quotati ed il DTM, tramite l'utilizzo di apposito software. Dalla loro analisi, si è evinta l'esistenza della doppia falda di scolo della pista (Fig. 4.2.18) e si è potuto constatare, come la pendenza longitudinale risulti costante, come previsto da

progetto. Più in generale, dall'analisi dei vettori pendenza (Fig. 4.2.19) che indicano come le acque meteoriche defluiscono dalla pavimentazione, si è potuto verificare l'assenza di aree di ristagno, ma si è evinta la presenza di zone, in contro – pendenza trasversale, nel tratto finale della testata (quello verso la RESA). Inoltre tale mappa esalta, in particolare, la non costante pendenza trasversale della testata. Infine si è appurata la regolare presenza dei fuochi di segnalamento centro pista, così come l'effettivo procedimento esecutivo della stesa del calcestruzzo (il conglomerato cementizio è stato gettato soprattutto in centro testata e successivamente tirato con appositi attrezzi verso il tratto successivo della pavimentazione e verso i lati della testata).

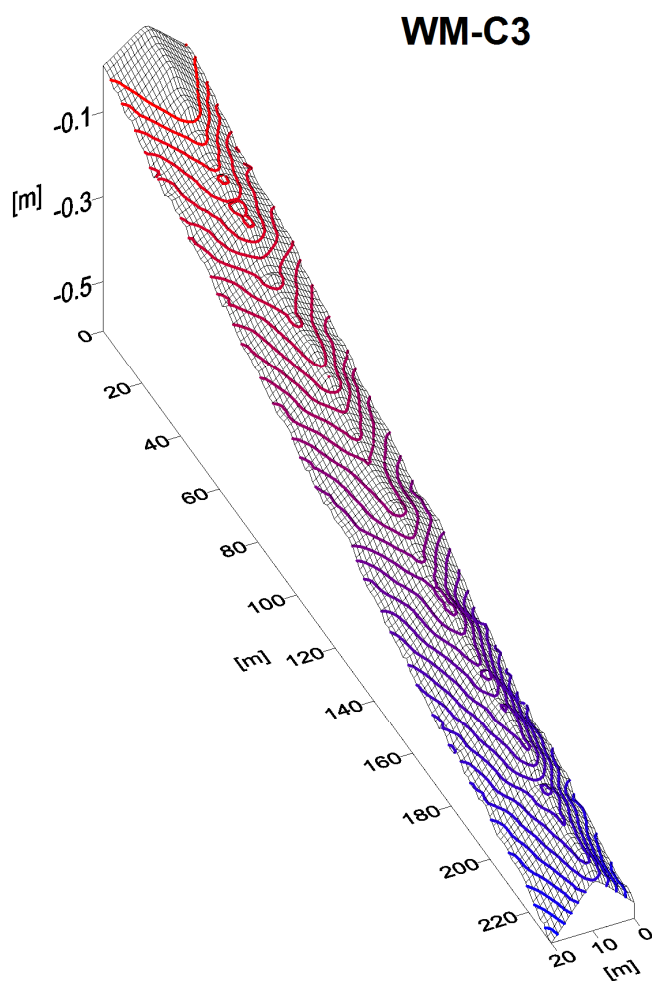


Fig. 4.2.18 – DTM della testata

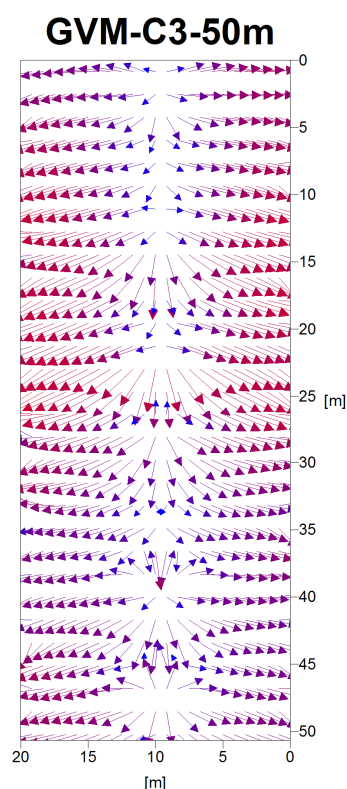


Fig. 4.2.19 – GVM dei primi 50 m di testata

Con l'intento specifico di evidenziare le discrepanze esistenti tra le quote rilevate e quelle teoriche di progetto, si è eseguito allora il relativo confronto. La difformità massima in modulo riscontrata corrisponde a circa 5,4 cm (tabella di figura 4.2.20). La mancanza di materiale riguarda essenzialmente la zona centrale della testata, mentre l'eccedenza è riscontrata lungo i bordi laterali, compreso l'aggiramento dei fuochi. Si noti comunque, a riguardo, come un'analisi statistica, condotta dopo un'accurata sperimentazione (su un modello in scala ridotta), sia stata preferita ad un'altrettanto possibile analisi spaziale, effettuata con sole tecniche di elaborazione statistica dei dati.

Discrepanza [mm]	Percentuale [%]
0 - 5	16
5 - 10	17
10 - 15	15
15 - 20	13
20 - 25	12
25 - 30	9

30 - 35	6
35 - 40	6
40 - 45	4
45 - 50	2
50 - 55	1

Fig. 4.2.20 – Discrepanze tra

$Q_{Progetto}$ e $Q_{Stimate}$

4.11/2 VERIFICA DELLA RETE DI RILIEVO PROGETTATA

Come già detto in precedenza, non è stato possibile eseguire in aeroporto la verifica della rete progettata, dal punto di vista sia dell'affidabilità, sia della fattibilità a causa delle procedure di sicurezza, delle esigenze economiche, inerenti l'interdizione al volo, e delle autorizzazioni burocratiche praticamente impossibili da ottenere. Pertanto il controllo è stato sviluppato, in un'area di limitate dimensioni, presso il Politecnico di Milano, ovvero è stata individuata un'area, sufficientemente grande, nei pressi del Laboratorio Stradale Sperimentale Stradale del DIAR – Sezione Infrastrutture Viarie, tale da permettere oltre il rilievo dell'area con il metodo utilizzato presso l'aeroporto (VO), anche il rilievo utilizzando la rete di progetto (2RET1x3). L'area prescelta ha una superficie in conglomerato bituminoso e non in calcestruzzo; tuttavia la differenza di materiale non rappresenta un limite per la verifica dell'affidabilità e della fattibilità della rete in esame.

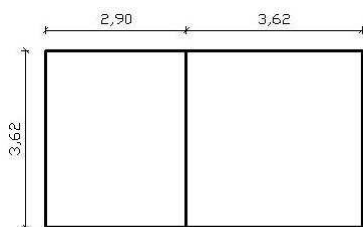


Fig. 4.2.21 – Rete VO –POLI

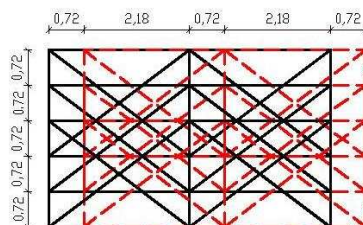


Fig.4.2.22 – Rete 2RET1x3 – POLI

La rete VO-POLI (Fig. 4.2.21) è composta da due maglie adiacenti: una di dimensione $3.6195 \text{ m} \times 2.8956 \text{ m}$ e l'altra di dimensione $3.6195 \text{ m} \times 3.6195 \text{ m}$; il ricoprimento totale dell'area è pari a $3.6195 \text{ m} \times 6.8151 \text{ m}$. Essa presenta tre longitudinali e due trasversali, con uno sviluppo di circa 24 m .

La rete 2RET1x3-POLI (Fig. 4.2.22) è composta invece da tre reti tipo VO, traslate sia in senso longitudinale, sia in senso trasversale, di tre passi (0.7239 m), ovvero la rete è composta da sei maglie e relative diagonali. Le due maglie adiacenti hanno uguale dimensione $2.1717 \text{ m} \times 2.8956 \text{ m}$; ogni maglia presenta anche le due relative diagonali. In questo caso lo sviluppo totale è di 148 m .

La procedura di identificazione della rete è stata la prima operazione. In prima istanza, onde evitare il tracciamento di linee non corrette, è stato tracciato ogni campo rettangolare dovuto alla rete più complessa, solo successivamente, dopo aver identificato e numerato ogni singolo nodo, si sono determinate le connessioni dovute alle diagonali, tracciando le stesse (Fig. 4.2.23 e Fig. 4.2.24).

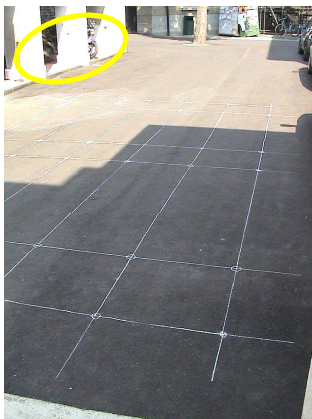


Fig. 4.2.21 – Prima fase del tracciamento

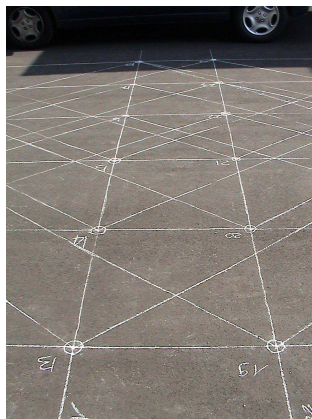


Fig. 4.2.22 – La rete di rilievo

La maggiore problematica riscontrata è consistita nella determinazione dei perfetti campi di rilievo; infatti ogni maglia, deve soddisfare il teorema di Pitagora; inoltre si deve tenere presente che il rilievo effettuato è eseguito tramite palpatore che segue l'andamento della pavimentazione. Il tracciamento della rete completa è durato circa un'ora e mezza; il rilievo della rete è durato invece circa un'ora, tenendo anche in considerazione i tempi di preparazione dello strumento per il rilevamento, della relativa calibrazione e della misura stessa, con corrispondenti spostamenti da un lato all'altro della rete.

4.12/2 COMPENSAZIONE DELLE RETI

L'analisi dei dati derivanti dalle compensazioni delle due reti sviluppate, per la verifica della rete progettata (tabella di figura 4.2.23), evidenzia come in realtà gli scarti quadratici medi riferiti ai capisaldi, risultano maggiori per la rete più fitta, ma concentrando l'attenzione sulle ridondanze si possono notare i miglioramenti ottenuti. Infatti le ridondanze, sia minime, sia massime, aumentano con l'infittimento della rete; addirittura quelle massime raddoppiano.

	N°long.	N°trasv.	N°diag.	N°capis.	N°oss.	N°inc.	Oss./Inc.	SQM punti max [cm]	SQM punti max con rif. medio [cm]	Ridond. totale	Ridond. totale / N°oss.	Ridond. min	Ridond. max	Ridond. Min con rif. medio	Ridond. Max con rif. medio
VO – POLI	3	2	0	1	7	6	1.67	0.0035	0.0035	2	0.286	0.2388	0.4179	0.1039	0.9160
2RETIx3-OLI	6	6	24	1	84	36	2.33	0.0197	0.0044	72	0.857	0.3432	0.8280	0.3781	0.9365

Fig. 4.2.23 - Dati riassuntivi dei dati ottenuti dalle compensazioni

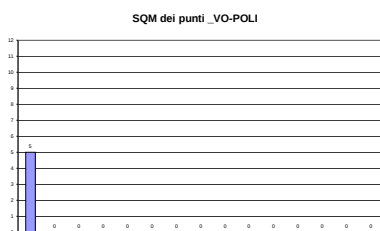


Fig. 4.2.24 – SQM dei punti della rete VO-POLI

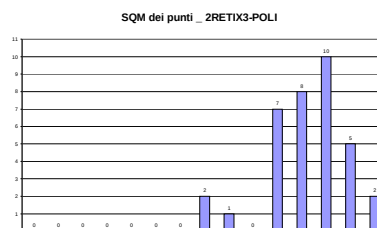


Fig. 4.2.25 – SQM dei punti della rete 2RETIx3-POLI

Lo stesso accertamento è eseguito anche sulle compensazioni della rete con l'introduzione del riferimento medio, benché gli incrementi siano più contenuti. La rappresentazione grafica degli SQM dei capisaldi è riportata nei grafici delle figure 4.2.24 e 4.2.25, considerando un valore di partenza pari a 0.0025 – 0.0035 *cm* con un incremento continuo di 0.0010 *cm*.

L'accuratezza del rilievo è risaltata dalle rappresentazioni delle quote, determinate dalle compensazioni, con la formazione di piani quotati e DTM. Infatti i piani quotati ed i DTM (Fig. 4.2.26 e Fig. 4.2.27), derivanti dalla rete VO–Poli, non rilevano correttamente, in modo dettagliato, l'avvallamento evidenziato in figura 4.2.21 e riscontri visivi, sul campo, non permettono affatto di far risaltare le pendenze dell'intera area. Viceversa le rappresentazioni derivanti dalla compensazione relativa al rilievo eseguito in base alla rete 2RET1×3–Poli (Fig. 4.2.28 e Fig. 4.2.29) evidenziano le pendenze e l'avvallamento presenti in modo corretto.

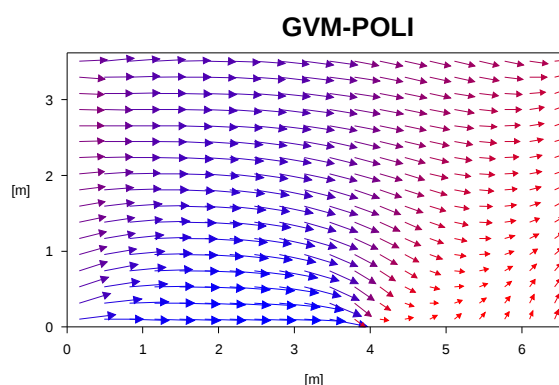


Fig. 4.2.26 – Grid vector map della pavimentazione del Politecnico di Milano rilevata con la rete VO–POLI

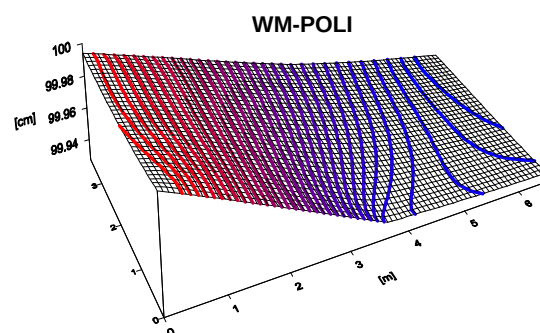


Fig. 4.2.27 – Wireframe map della pavimentazione del Politecnico di Milano rilevata con la rete VO–POLI

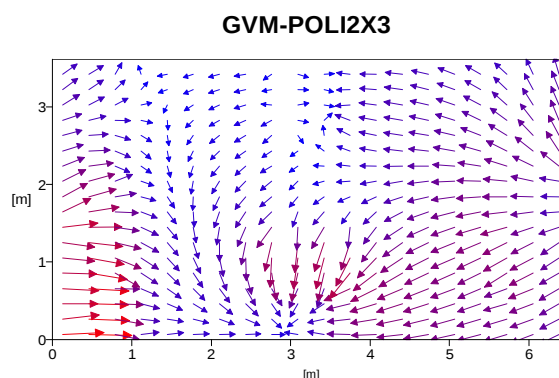


Fig. 4.2.28 – Grid vector map della pavimentazione del Politecnico di Milano rilevata con la rete 3RET1×3–POLI

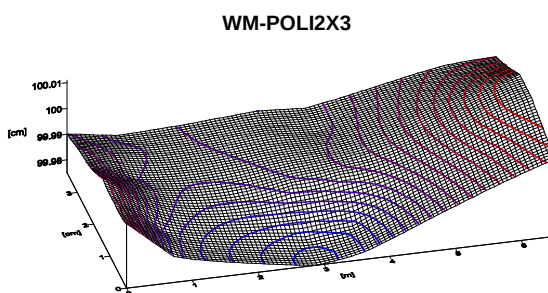


Fig. 4.2.29 – Wireframe map della pavimentazione del Politecnico di Milano rilevata con la rete 3RET1×3–POLI

PROTEZIONE CIVILE

• 5.1 ANALISI DELLA CONNESSIONE

Un periodo di dieci anni, dal 1989 al 1998, in cui sono disponibili le osservazioni delle portate del fiume e dei livelli del lago a scansione oraria è preso in considerazione, dalla Sezione Idraulica del DIIAR, al fine di studiare la correlazione esistente tra i livelli del lago H e le portate del fiume Q , oppure verificare, in

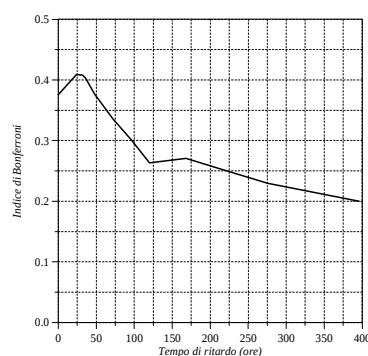
alternativa, se i due fenomeni sono indipendenti. Se invece i due fenomeni sono correlati, è ovvio supporre che l'innalzamento dei livelli del lago, a seguito del verificarsi di un evento di piena nel fiume, si ha con un certo ritardo temporale. Tuttavia dal momento che non si conosce ancora il legame esistente tra i due fenomeni, non si conosce nemmeno l'entità del ritardo. Nell'analisi dei dati, sono considerati vari possibili ritardi (variabili tra zero e quattrocento ore) e, per ciascun ritardo, è costruito un campione formato da coppie di osservazioni, portate del fiume e corrispondenti livelli del lago dopo l'intervallo considerato.

Le coppie di osservazioni sono raggruppate in classi e sono riportate, in una tabella a doppia entrata, le frequenze relative di ciascuna classe e le frequenze marginali. Interpretando X_t e $Y_{t+\Delta t}$ come le due componenti di una variabile statistica doppia, dalla matrice delle frequenze relative, detta tessuto connettivo, è misurato il grado di connessione esistente, calcolando la differenza (detta contingenza) fra le frequenze osservate e le frequenze teoriche che si hanno in caso di indipendenza stocastica, ovvero il prodotto delle due frequenze marginali. Per indipendenza stocastica s'intende la situazione in cui la conoscenza di una delle due variabili marginali non fornisce nessuna informazione sull'altra.

Data pertanto la tabella delle contingenze, si possono determinare alcuni indici i cui valori forniscono il grado di connessione tra i due fenomeni. Per valutare il grado di connessione tra le portate di piena e i livelli idrici del lago, si utilizza un indice bilaterale di Bonferroni, ovvero la media geometrica degli indici unilaterali sempre di Bonferroni. Per ottenere tale indice, è stato necessario suddividere, come già detto in precedenza, ciascun campione di osservazioni in classi. I valori estremi di ciascuna classe sono imposti, in modo tale da garantire che il prodotto della frequenza marginale della classe i -esima per quella della classe j -esima e per la numerosità del campione sia maggiore di cinque.

Dal momento che i livelli idrici del lago al di sotto di un metro, rispetto allo zero dell'idrometro di Sesto Calende, sono influenzati dalla regolazione operata dallo sbarramento della Miorina, le osservazioni al di sotto di tale soglia sono escluse dallo studio, volendo considerare solo il deflusso naturale. Una volta effettuato il raggruppamento in classi con il procedimento descritto, sono calcolati i valori dell'indice di Bonferroni i cui risultati sono presentati in forma grafica nella Figura 5.1. Come si può notare, il valore dell'indice si mantiene sempre superiore a 0.2 e presenta un picco pari a 0.42, in corrispondenza di un ritardo di trenta ore. Questi valori garantiscono che i due fenomeni non sono indipendenti, com'era ragionevole attendersi, e probabilmente, come verificato nelle analisi successive, a seguito di un evento di piena nel Toce si verifica un innalzamento dei livelli del lago dopo l'intervallo determinato. A conferma del risultato ottenuto con l'indice di Bonferroni, il test di indipendenza di Pearson verifica che l'ipotesi nulla di indipendenza non è vera, cioè esiste connessione tra i due fenomeni. Il test è applicato sulle coppie di osservazioni ed il risultato indica che l'ipotesi nulla è rifiutata.

Fig. 5.1 – Andamento dell'indice di Bonferroni



5.2 CORRELAZIONE PORTATE – LIVELLI

Una volta confermato che i due fenomeni non sono indipendenti, per valutarne il grado di correlazione, è stata determinata la funzione di crosscorrelazione delle due serie temporali a scansione oraria relative alle osservazioni contemporanee delle due variabili H e Q . Tale correlazione è tanto maggiore, quanto più il valore massimo della cross-correlazione è, in valore assoluto, vicino all'unità. Lo studio della correlazione attraverso quest'indice presenta tuttavia alcuni limiti nel caso in esame. Anzitutto a causa della regolazione del Lago Maggiore, operata dallo sbarramento della Miorina (che interviene per valori del livello del lago rispetto allo zero dell'idrometro di Sesto Calende inferiori a un metro, nel periodo da metà marzo a fine ottobre, ed inferiori a un metro e mezzo, nel periodo dall'inizio novembre a metà marzo), non è possibile definire il processo per valori di altezza inferiori alle soglie sopra indicate.

Inoltre poiché è da attendersi che la correlazione sia più stretta per i valori estremi dei due processi (che formano un sotto-insieme limitato dei valori assunti dalle serie temporali) e poiché, per caratterizzare gli eventi di piena particolarmente intensi, è importante indagare proprio tale correlazione, un'analisi basata sulle intere serie temporali può mascherare gli aspetti più interessanti. Un approccio che consente di superare entrambe le difficoltà è basato sull'introduzione di un coefficiente di correlazione condizionata, calcolato a partire dalle coppie che eccedono valori di soglia prefissati: T_H e T_Q . Tale coefficiente può essere calcolato con la seguente espressione:

$$r'_{HQ}(k) = \frac{s'_{HQ}(k)}{\sqrt{s'_{HH}(0)s'_{QQ}(0)}}, \text{ con } s'_{HQ}(k) = \begin{cases} \frac{1}{N'_k} \sum_{j=1}^{N-k} (H_{j+k} - m'(H))(Q_j - m'(Q))\Theta(H_{j+k}, Q_j; T_H; T_Q), & 0 \leq k \leq N-1 \\ \frac{1}{N''_k} \sum_{j=1-k}^N (H_{j+k} - m'(H))(Q_j - m'(Q))\Theta(H_{j+k}, Q_j; T_H; T_Q), & -N+1 \leq k \leq -1, \end{cases}$$

dove:
$$N'_k = \sum_{j=1}^{N-k} \Theta(H_{j+k}, Q_j; T_H; T_Q), \quad 0 \leq k \leq N-1; \quad N''_k = \sum_{j=1-k}^N \Theta(H_{j+k}, Q_j; T_H; T_Q), \quad -N+1 \leq k \leq -1;$$

$$m'(Q) = \frac{1}{N'_0} \sum_{j=1}^N Q_j \Theta(H_j, Q_j; T_H; T_Q), \quad m'(H) = \frac{1}{N''_0} \sum_{j=1}^N H_j \Theta(H_j, Q_j; T_H; T_Q);$$

$$\Theta(H, Q; T_H; T_Q) = \begin{cases} 1, & H > T_H, Q > T_Q \\ 0, & H \leq T_H, Q \leq T_Q. \end{cases}$$

I valori delle numerosità indicano il numero di coppie eccedenti i valori di soglia ed anche i valori medi sono calcolati solo sui valori delle due variabili eccedenti la rispettiva soglia. Alle due soglie non devono essere attribuiti valori troppo elevati; in caso contrario la stima del coefficiente di correlazione condizionata risulta poco significativa. Infatti alzando i valori di soglia si riduce il numero di dati utilizzati per stimare il coefficiente di correlazione condizionata e, soprattutto, quando il tempo di ritardo aumenta, si verifica che tutti i dati concorrenti alla stima provengono da quei pochi eventi, di piena di entità e durata tali da soddisfare le condizioni imposte. Avendo verificato che nel periodo in cui la soglia di regolazione del lago è tenuta ad un metro e mezzo non si verificano sostanzialmente eventi di piena, si è posto $T_H = 1 \text{ m}$. Per quanto riguarda invece le portate al colmo del Toce, si sono considerati diversi valori di soglia: $T_Q = 0, 50, 70 \text{ e } 100 \text{ m}^3/\text{s}$. I risultati ottenuti sono presentati in forma grafica nella figura 5.2 e, nella stessa figura, sono mostrati anche i coefficienti di autocorrelazione delle due serie.

Come si può notare, il valore massimo di correlazione è prossimo a 0.65 in corrispondenza di un ritardo di trenta ore, indipendentemente dalla soglia di portata adottata; inoltre il valore della correlazione all'aumentare della soglia imposta si mantiene costante attorno a valori elevati (dell'ordine di 0.5) anche per valori di ritardo superiori. Questo comportamento è giustificato dal fatto che, fissando valori sempre più elevati di soglia, i campioni corrispondenti risultano costituiti solo dagli eventi di piena di maggiore entità i quali sono spesso caratterizzati anche da durate maggiori. Nella tabella di figura 5.3, è riportato, per ciascun valore di soglia della portata, il tempo di ritardo in corrispondenza del quale si ha il massimo del coefficiente di correlazione condizionata ed il valore del suddetto coefficiente. Come appare evidente, il tempo di ritardo è pressoché costante, per tutti i valori di soglia considerati, ed assume valori di poco superiori a trenta ore.

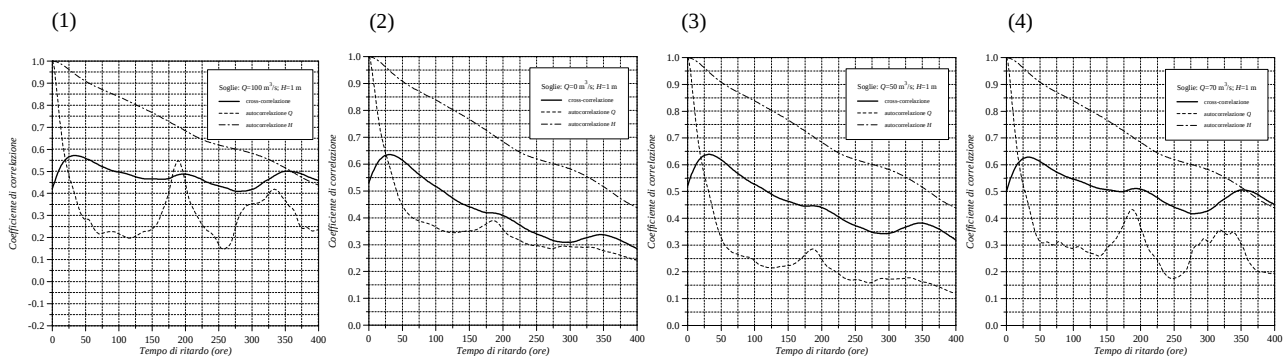


Fig. 5.2 – Andamento del coefficiente di correlazione condizionata e dei coefficienti di autocorrelazione

Fig. 5.3 – Valori del coefficiente di correlazione condizionata corrispondenti a diversi valori di soglia

n	T_Q	k_0	$r'_{HQ}(k_0)$
1	0	31	0.635
2	50	32	0.638
3	70	33	0.628
4	100	33	0.571

5.3 CORRELAZIONE TRA COLMI DI PIENA E LIVELLI MASSIMI

Una descrizione realistica di fenomeni fisici caratterizzati da manifestazioni impulsive si può ottenere ricorrendo a processi di punto, particolarmente adatti a modellare fenomeni che accadono in un intervallo di tempo molto breve, al limite istantaneo, rispetto al periodo che intercorre tra due eventi successivi. Come già detto in precedenza, nel caso preso in esame dalla Sezione Idraulica del DIAR, i fenomeni casuali oggetto di studio sono gli eventi di piena del Fiume Toce e del Lago Maggiore. Dal momento che la struttura temporale dell'idrogramma, di portata o livello, è assai complessa per la periodicità stagionale dei fenomeni meteorici di base e la dipendenza dei valori successivi, di portata o livello, l'uno dall'altro, a causa dei fenomeni d'invaso nel bacino, in generale, non si considera il processo completo. Esso è semplificato limitandosi a considerare solo la parte di esso in corrispondenza dei valori più elevati.

Allora si procede fissando soglie sufficientemente elevate di portata e di livello, in modo da individuare una serie di variabili indipendenti che rappresentano i valori di colmo dei singoli eventi di piena e costituiscono un processo particolare, detto processo puntuale. Il fenomeno è rappresentato da una successione di punti

sull'asse dei tempi (indicati con X in figura 5.4) e mostra la sequenza dei tempi in cui si verificano i colmi di piena oltre la soglia. Tale soglia deve essere sufficientemente alta, perché due colmi consecutivi, eccedenti la soglia stessa, risultino indipendenti, ma non tanto alta da disperdere l'informazione; infatti al crescere dei valori di soglia imposti, decrescono ovviamente i colmi di piena selezionati. Nel caso in esame, la soglia adottata per le portate del fiume è pari a $250 \text{ m}^3/\text{s}$, mentre per il lago il livello utilizzato è pari a $1,5 \text{ m}$ che corrisponde al limite massimo d'invaso consentito nei mesi invernali. L'estrazione dei colmi degli eventi di piena richiede la disponibilità di registrazioni in continuo delle portate e dei livelli: in totale 49 eventi di piena del fiume e 39 colmi del lago che corrispondono a ventiquattro anni di registrazioni.

Una volta individuati tutti i colmi di piena, è possibile introdurre due processi a tempo continuo: il processo per le portate del fiume e quello per i livelli del lago, in funzione dell'istante di tempo in cui si realizza il massimo di portata o di livello dell'evento. Le variabili aleatorie rappresentano il numero di eventi di piena (del fiume o del lago), nel periodo di tempo considerato, ed assumono solo valori interi positivi o al più nulli. L'unità di misura con cui è espresso il tempo è l'ora e pertanto il tempo varia tra 0 e 210.312. Le soglie prefissate sono tali che il processo numerico, usato per descrivere il numero di superamenti della soglia in un dato tempo, abbia incrementi indipendenti dal tempo stesso. Tutto ciò equivale ad ammettere che la probabilità di accadimento di un superamento della soglia, in un dato intervallo di tempo, non dipenda dal numero di superamenti precedentemente accaduti. Questa proprietà è caratteristica del processo numerico di Poisson. Nel caso delle piene, il carattere poissoniano dei superamenti di una soglia sufficientemente alta deriva dal carattere poissoniano delle precipitazioni e dal fatto che le grandi piene, superiori alla soglia, risultano generalmente così distanziate nel tempo da potersi ritenere che l'una accada indipendentemente dall'altra.

Nella figura 5.5, sono riportate le manifestazioni di uno dei due fenomeni, indicando con il simbolo $\bullet$ il punto in cui la variabile in esame subisce un incremento. Come è illustrato nel diagramma, il processo numerico assume valore zero nell'istante in cui si inizia ad osservare il fenomeno, presenta un salto pari ad un'unità in corrispondenza del tempo in cui si verifica un evento e rimane costante nell'intervallo compreso tra due eventi successivi. È possibile studiare la dipendenza tra i due processi di conteggio, a tempo discreto, attraverso l'indice di cross-correlazione. In questo modo, si ottengono due processi che assumono valore uno, in corrispondenza dell'istante di tempo in cui si realizza il colmo di piena del Fiume Toce o il massimo livello del Lago Maggiore e zero in tutti gli altri casi, mediante la seguente espressione:

$$r = \frac{\frac{1}{\Delta t^2} * \frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n 1_{\{\Delta N_{k+\Delta t}^{(1)}\}} * 1_{\{\Delta N_{k+\Delta t}^{(2)}\}} - \frac{1}{\Delta t^2} * \frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n 1_{\{\Delta N_{k+\Delta t}^{(1)}\}} * \frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n 1_{\{\Delta N_{k+\Delta t}^{(2)}\}}}{\left(\frac{1}{\Delta t^2} * \frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n \left[1_{\{\Delta N_{k+\Delta t}^{(1)}\}} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 1_{\{\Delta N_{j+\Delta t}^{(1)}\}} \right]^2 \right)^{0,5} * \left(\frac{1}{\Delta t^2} * \frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n \left[1_{\{\Delta N_{k+\Delta t}^{(2)}\}} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 1_{\{\Delta N_{j+\Delta t}^{(2)}\}} \right]^2 \right)^{0,5}}$$

essendo:

$$1_{\{\Delta N_{k+\Delta t}^{(1)}\}} = \begin{cases} 1 & \text{se } \exists t \in [(k-1) * \Delta t + 1; k * \Delta t + 1] \text{ t.c. } \Delta N_1(t) = 1 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad 1_{\{\Delta N_{k+\Delta t}^{(2)}\}} = \begin{cases} 1 & \text{se } \exists t \in [(k-1) * \Delta t + s + 1; k * \Delta t + s + 1] \text{ t.c. } \Delta N_2(t) = 1 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

L'arco temporale di ventiquattro anni d'osservazione è stato suddiviso in k intervalli della stessa ampiezza Δt . Quest'ampiezza è fissata in modo tale da non comprendere in ciascuna finestra più di un colmo di piena della stessa variabile; inoltre sono stati scelti diversi valori per verificare l'eventuale esistenza di differenze significative nella stima dell'indice di cross-correlazione. In generale, l'indice rappresenta l'effetto esercitato dal valore assunto di una variabile, al tempo i -esimo, sulla distribuzione di probabilità dei valori dell'altra variabile, dopo periodi di tempo prefissati. L'indice è sempre concorde in segno con la covarianza, posta al numeratore, mentre al denominatore si ha un fattore di normalizzazione, costituito dal prodotto degli scarti quadratici medi delle due variabili in esame. Esso può variare in modulo tra zero e uno; in particolare, è nullo, se i due processi evolvono in maniera linearmente indipendente.

La Figura 5.6 esprime l'andamento dell'indice di cross-correlazione, in occasione di eventi di piena nel Fiume Toce e nel Lago Maggiore, in funzione temporale prescelto. Come si può facilmente osservare, aumentando l'ampiezza della finestra temporale, aumenta anche il valore di correlazione, per un assegnato ritardo temporale, in quanto cresce la probabilità di avere, nello stesso intervallo, una manifestazione di entrambi i fenomeni. Inoltre il ritardo temporale certamente sussistente, dove si verifica la massima correlazione, non dipende significativamente dall'ampiezza della finestra temporale adottata. Infatti, passando da $\Delta t = 6$ ore a $\Delta t = 48$ ore, il ritardo temporale si mantiene sempre tra 20 e 24 ore.

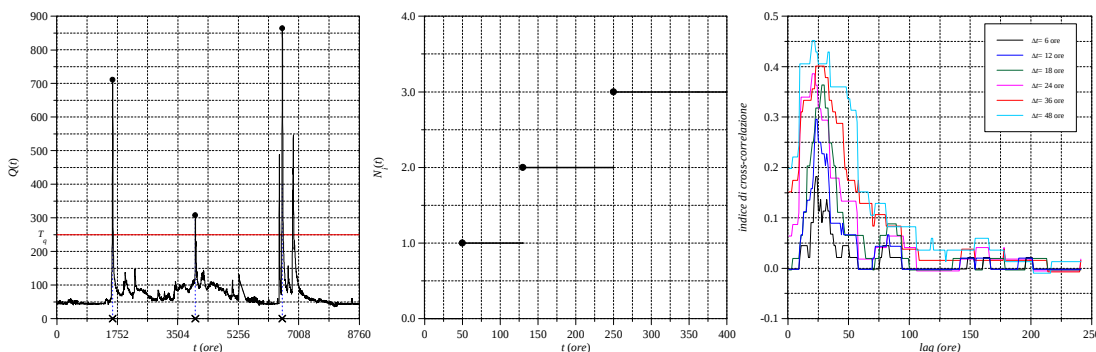


Fig. 5.4 – Modalità di selezione degli eventi

Fig. 5.5 – Andamento del processo stocastico

Fig. 5.6 – Indice di cross-correlazione in funzione del ritardo temporale

5.4 FUNZIONE DI PROBABILITÀ COMPOSTA DI DUE VARIABILI ESTREME

Negli ultimi anni, il territorio italiano, fortemente antropizzato, è stato duramente minacciato da alluvioni e frane i cui danni sono in continua crescita e, a questa situazione, gli strumenti di pianificazione del territorio hanno cercato di rispondere con un uso sempre più accorto del territorio. Di conseguenza, come premessa per l'implementazione di un sistema informativo territoriale, orientato al supporto delle decisioni, si analizza il tratto terminale del Fiume Toce, in corrispondenza della sua confluenza nel Lago Maggiore, e si determina, mediante simulazione idraulica, le fasce di pertinenza fluviale. Lo strumento statistico adeguato è pertanto lo studio della funzione di probabilità composta di non – superamento di due variabili estreme (portate di piena del fiume e massimi livelli idrici del lago), in modo da stimare quelle coppie di punti, caratterizzate dalla stessa probabilità di accadimento. Successivamente nelle simulazioni idrauliche, si tiene conto di tali valori, per una corretta assegnazione delle condizioni al contorno, avendo studiato la funzione di probabilità composta delle due variabili e determinato, nel piano $H - Q$, le curve di equiprobabilità. Infatti attualmente,

in particolare, le alluvioni sono divenute un problema sempre più grave i cui danni, economici e sociali, continuano a crescere, minacciando l'intero pianeta, e solo l'implementazione di sistemi informativi territoriali, orientati al supporto delle decisioni, permette di pianificare l'uso del territorio, con precisione, e ridurre così la pericolosità ed i rischi delle esondazioni, mitigandone i danni.

La conoscenza delle distribuzioni marginali non è sufficiente per individuare, in modo univoco, la funzione di probabilità composta, anche imponendo il vincolo della stabilità, ossia che la distribuzione asintotica dei massimi valori debba coincidere, a meno di una trasformazione lineare delle variabili, con la distribuzione doppia, essendo le due distribuzioni marginali due distribuzioni asintotiche del massimo valore. Infatti sebbene siano state ricavate diverse espressioni generali per la distribuzione asintotica dei massimi valori di due variabili (che ammettono date distribuzioni marginali di valore estremo e godono del requisito della stabilità), in letteratura sono note solo due espressioni nelle quali la funzione doppia può essere analiticamente scritta in termini di dette funzioni di probabilità marginali. Le due espressioni che possono essere scritte in forma di prodotto delle distribuzioni marginali e di un fattore dipendente dalle due variabili, e da un indice della loro correlazione sono le seguenti:

$$P(x, y; a) = P(x)P(y) \exp \left[-a \frac{\ln P(x) \ln P(y)}{\ln P(x) + \ln P(y)} \right], \quad 0 \leq a \leq 1$$

$$P(x, y; m) = \exp \left\{ - \left[(-\ln P(x))^m + (-\ln P(y))^m \right]^{\frac{1}{m}} \right\}, \quad 0 \leq \frac{1}{m} \leq 1$$

Le funzioni di probabilità $P(x, y; a)$ e $P(x, y; m)$ sono funzioni crescenti dei due parametri e sono ovviamente funzioni crescenti di ciascuna delle due variabili per valori fissati dei parametri. Se le due funzioni marginali sono dello stesso tipo e x è uguale a y , la funzione composta è una potenza della funzione di distribuzione marginale e, per l'ipotesi di stabilità, deve essere pari alla distribuzione di probabilità marginale a meno di una trasformazione lineare della variabile. L'indipendenza delle due variabili corrisponde alle condizioni: $a = 0$, oppure $m = 1$. Nel seguito, si assume che le distribuzioni di probabilità marginali siano entrambe distribuzioni di Gumbel e, introducendo le variabili ridotte, le due funzioni di probabilità contengono un solo parametro e divengono simmetriche nelle due variabili:

$$P(x, y; a) = \exp \left[-e^{-x} - e^{-y} + \frac{a}{e^x + e^y} \right], \quad 0 \leq a \leq 1$$

$$P(x, y; m) = \exp \left[- \left(e^{-mx} + e^{-my} \right)^{\frac{1}{m}} \right], \quad 0 \leq \frac{1}{m} \leq 1$$

Per la stima dei parametri a e m , Gumbel ha proposto tre metodi diversi: il primo – metodo dei quadranti – prescinde dallo studio della correlazione tra le due variabili, mentre gli altri due sono basati su relazioni tra i parametri ed opportuni indici della correlazione tra le due variabili.

Metodo dei quadranti

I valori delle mediane delle popolazioni delle variabili, entrambe distribuite secondo la legge di Gumbel, dividono il piano in quattro quadranti. Lo schema di figura 5.7 indica i valori della probabilità di appartenenza ad un dato quadrante,

ottenuti rispettivamente dalle due sopraccitate funzioni.

$P_2(a) = \frac{1}{2} - P_1(a)$	$x = \bar{x}$	$P_1(a) = \left(\frac{1}{4}\right)^{1-\frac{a}{4}}$
$P_2(m) = \frac{1}{2} - P_1(m)$		$P_1(m) = 2^{-\frac{1}{2m}}$
$P_3(a) = P_1(a)$	$y = \bar{y}$	$P_4(a) = \frac{1}{2} - P_1(a)$
$P_3(m) = P_1(m)$		$P_4(m) = \frac{1}{2} - P_1(m)$

Fig. 5.7 – Metodo dei quadranti

Indicando con N il numero di coppie di valori osservati e con N_i il numero di coppie ricadenti nel quadrante i -esimo, si può ottenere una stima dei parametri, imponendo:

$$P_1(a) = F_{13} \quad \text{e} \quad P_1(m) = F_{13} \quad \text{essendo} \quad F_{13} = \frac{N_1 + N_3}{2N}$$

dove F_{13} rappresenta la frequenza osservata, di appartenenza al primo e terzo quadrante. Dall'ultima relazione, si ottengono le seguenti espressioni di stima per i parametri:

$$a = 4 + 4 \frac{\log F_{13}}{\log 4} \quad \text{e} \quad m = \frac{\log 2}{\log(-\log F_{13}) - \log(\log 2)}$$

Dalle condizioni $0 \leq a$, $1/m \leq 1$, seguono due disequazioni, ovvero che la stima, con il metodo dei quadranti, può essere effettuata solo se $0.25 \leq F_{13} \leq 0.35355$, nel caso della prima distribuzione, e $0.25 \leq F_{13} \leq 0.50$, nel caso della seconda distribuzione. Come evidente, la seconda distribuzione ha una possibilità di applicazione più vasta rispetto alla prima; pertanto nell'ipotesi di validità della prima, possono essere utilizzate entrambe le distribuzioni ed è necessario un criterio aggiuntivo per stabilire quale distribuzione sia preferibile.

Metodo dei momenti

Si può dimostrare che, se due variabili aleatorie indipendenti sono distribuite secondo una legge di Gumbel in forma canonica, la loro differenza Z segue una distribuzione logistica. Si può anche dimostrare che lo stesso risultato vale nel caso in cui le due variabili aleatorie non sono indipendenti, se la distribuzione congiunta delle due variabili ha la forma della seconda distribuzione presentata. In particolare, risulta:

$$P_Z(z) = \frac{1}{1 + e^{-mz}} \quad \sigma(Z) = \frac{\pi}{\sqrt{3}m}$$

dove la media della distribuzione è nulla, mentre $\sigma(Z)$ è lo scarto quadratico medio. Se invece la distribuzione congiunta delle due variabili aleatorie ha la forma della prima distribuzione presentata, la variabile differenza non segue una distribuzione logistica.

Questo risultato ha due importanti implicazioni; anzitutto può essere impiegato per fornire un test statistico che permette di stabilire quale delle due distribuzioni, sia preferibile per interpretare i campioni dei valori osservati. Infatti se per il campione dei valori della differenza è verificata l'ipotesi di adattamento ad una

distribuzione logistica, deve essere accettata l'ipotesi di validità della seconda distribuzione presentata (e rigettata l'ipotesi di validità della prima distribuzione presentata). Inoltre data l'espressione dello scarto quadratico medio, segue la relazione:

$$m = \frac{\pi}{\sqrt{3}\sigma(Z)}$$

che fornisce un metodo di stima del parametro m , alternativo al metodo dei quadranti.

Stima attraverso il coefficiente di correlazione

Nell'ipotesi di validità della prima disequazione, il parametro m può essere espresso in funzione del coefficiente di correlazione tra le due variabili aleatorie. Si ha infatti:

$$\mu(X) = \mu(Y) = \gamma \qquad \mu(X^2) = \mu(Y^2) = \frac{\pi^2}{6} + \gamma^2 \qquad \sigma(X) = \sigma(Y) = \frac{\pi}{\sqrt{6}}$$

dove γ è la costante di Eulero, e $\sigma(X, Y) = \rho\sigma(X)\sigma(Y) = \rho\frac{\pi^2}{6}$. Combinando le due ultime espressioni, si ha:

$$\sigma^2(Z) = \mu(Z^2) = \mu(X^2) + \mu(Y^2) - 2\mu(XY) = \mu(X^2) + \mu(Y^2) - 2\sigma(X, Y) - 2\mu(X)\mu(Y) = \frac{\pi^2}{3}(1 - \rho)$$

e, inserendo la varianza trovata nella espressione per il calcolo di m con il metodo dei momenti, si ottiene:

$$m = \frac{1}{\sqrt{1-\rho}}$$

che fornisce infine un ulteriore metodo di stima del parametro m .

5.5 DETERMINAZIONE DELLA FUNZIONE DI PROBABILITÀ COMPOSTA DELLE VARIABILI H E Q

Le analisi dedicate alla determinazione della funzione di probabilità composta delle portate al colmo del Fiume Toce e dei livelli massimi del Lago Maggiore sono state condotte a partire dai campioni dei valori massimi annuali delle due variabili relativi al periodo 1943-1998 (come riportato nella tabella di figure 5.8).

Anno	H (m)	Q (m ³ /s)	Anno	H (m)	Q (m ³ /s)
1943	1.68	273	1966	2.32	916
1944	1.99	493	1967	1.94	261
1945	2.12	1080	1968	3.45	2030
1946	2.11	872	1969	1.99	750
1947	1.58	1730	1970	1.51	518
1948	2.65	1930	1977	3.52	1860

1949	1.695	615	1978	2.3	1572
1950	1.73	597	1979	3.61	1835
1951	3.65	1410	1980	1.45	450
1952	1.77	342	1981	3.88	1864
1953	2.71	1040	1982	2.08	1060
1954	2.65	2100	1983	3.37	1560
1955	2.25	639	1984	1.81	620
1956	2.19	1310	1989	1.7	252
1957	2.75	843	1990	1.47	264
1958	1.97	954	1991	3	864
1959	1.795	324	1992	1.92	1415
1960	3.12	1620	1993	4.21	2535
1961	1.66	746	1994	2.29	984
1962	1.4	827	1995	1.39	304
1963	3.3	900	1996	2.91	1021
1964	1.76	582	1997	2.29	930
1965	2.94	1026	1998	1.71	485

Fig. 5.8 - Campioni dei valori massimi annuali utilizzati nell'analisi.

Per individuare quale delle due forme della distribuzione congiunta maggiormente si adatta ad interpretare statisticamente il campione dei valori osservati, si è utilizzato il metodo dei quadranti. Applicando tale metodo risulta: $F_{13}=0.380$, e pertanto la funzione di distribuzione congiunta da adottare è la seconda distribuzione presentata. Le stime del parametro caratteristico, secondo i tre metodi descritti, sono tutti molto vicini tra loro: $m_a = 2.085$, $m_b = 1.9981$, $m_c = 1.9998$.

Dato che, nell'ipotesi di validità della seconda distribuzione presentata, la variabile differenza risulta distribuita come una logistica, il problema dell'individuazione del parametro m (in corrispondenza del quale l'adattamento della suddetta distribuzione di probabilità al campione di osservazioni delle variabili aleatorie risulta migliore), è ricondotto alla determinazione del valore del parametro caratteristico per il quale la distribuzione di probabilità logistica meglio si adatta al campione della variabile differenza. A tal fine, sono stati eseguiti il test di Pearson e quello di Kolmogorov. Il valore ottimale è quello in corrispondenza del quale le statistiche χ^2 e D_{max} , considerate nei due test, assumono il valore minimo. Dalla tabella di figura 5.9, si evince che entrambi i test considerati indicano il valore ottimale $m=2.085$, come fornito dal metodo dei quadranti. Dalla stessa tabella, risulta che entrambi i test sono verificati ad un livello di significatività pari al 5% (ed anche al 10%) e, nella carta probabilistica della distribuzione logistica di figura 5.10, sono mostrati la distribuzione teorica, rappresentata dalla retta di equazione $u=mt$, con i valori osservati della variabile Z . Infine per la funzione di probabilità congiunta delle variabili H e Q , si è ricavata la seguente espressione:

$$P(h, q) = \exp\left\{-\left[\exp\left(-m \frac{h-u_H}{\alpha_H}\right) + \exp\left(-m \frac{q-u_Q}{\alpha_Q}\right)\right]^{\frac{1}{m}}\right\}$$

$$u_H = 2.00 \text{ m}, \quad \alpha_H = 0.584 \text{ m}, \quad u_Q = 751.06 \text{ m}^3/\text{s}, \quad \alpha_Q = 453.97 \text{ m}^3/\text{s}, \quad m = 2.085$$

Si noti che, nei limiti: $h \rightarrow \infty$ e $q \rightarrow \infty$, questa distribuzione di probabilità congiunta si riduce rispettivamente alla distribuzione marginale $P_Q(q)$ della variabile Q e alla distribuzione marginale $P_H(h)$ della variabile H , e per $m=1$, al prodotto delle distribuzioni di probabilità marginali di due variabili aleatorie indipendenti.

Imponendo $P(h, q) = \text{costante}$, dalla suddetta distribuzione di probabilità congiunta si ottiene l'equazione del luogo dei punti (h, q) caratterizzati dalla medesima probabilità di non superamento. In figura 5.11, sono mostrati i luoghi dei punti (h, q) corrispondenti ad alcuni valori significativi del tempo di ritorno, ottenuti utilizzando la nota relazione: $T(h, q) = 1/[1 - P(h, q)]$. Come si nota dalla stessa figura, le curve presentano due asintoti le cui equazioni si ricavano dalle relazioni: $P_H(h) = 1 - 1/T$ e $P_Q(q) = 1 - 1/T$, dove gli asintoti corrispondono ai valori delle due variabili aleatorie, forniti dalle funzioni di probabilità marginali, in corrispondenza del valore del tempo di ritorno che caratterizza la generica curva (la figura 5.12 mostra invece la distribuzione dei dati sperimentali che hanno permesso lo studio in esame).

Statistica del test	Valori di X^2 e D_{max}		
	$m=m_a$	$m=m_b$	$m=m_c$
X^2	9.1739	9.5652	9.5652
D_{max}	0.0971	0.1002	0.1002

Fig. 5.9 – Valori delle statistiche ottenute eseguendo i test di buon adattamento di Pearson e Kolmogorov

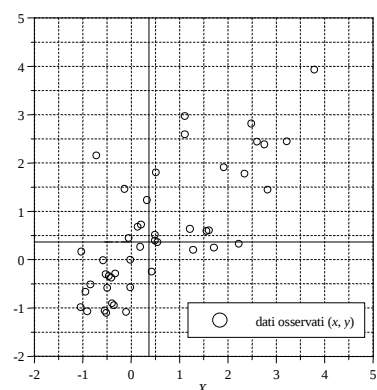
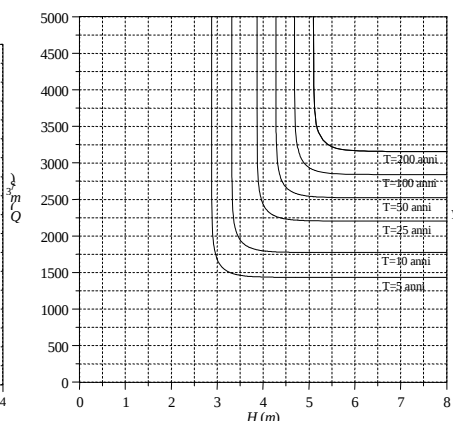
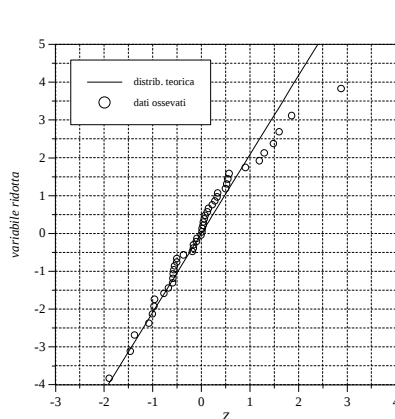


Fig. 5.10 – Distribuzione di probabilità teorica (per $m=2.085$) e valori osservati della variabile differenza

Fig. 5.11 – Luogo dei punti (h, q) a $T=\text{costante}$

Fig. 5.12 – Distribuzione dei punti sperimentali

6.1 TECNICHE SPETTRALI PER LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA STRUTTURALE

L'esperienza, in seguito a numerosi eventi catastrofici, ha mostrato che molte strutture civili non potrebbero mantenere la loro funzione, a causa di danni sia strutturali che non – strutturali. La valutazione della sicurezza strutturale è molto importante, per stabilire se sostituire o meno determinati elementi strutturali. I metodi correntemente impiegati si affidano al controllo visivo ma, poiché non è possibile accedere alle parti nascoste della struttura, possono portare a risultati troppo conservativi.

In questo lavoro, sviluppato a partire da un progetto di ricerca svolto dal Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano congiuntamente con l'Istituto di Ingegneria dell'Università Nazionale del Messico, si affronta il problema dell'analisi della sicurezza strutturale mediante l'elaborazione dei segnali provenienti da misurazioni di vibrazioni ambientali.

Le informazioni qualitative, fornite dai metodi tradizionali, sono integrate dai risultati dell'elaborazione di segnali relativi a moderati terremoti, misurati su un edificio a Città del Messico: in particolare, si discutono le applicazioni dell'analisi di Fourier e si introduce l'analisi di ondine (wavelet). Il monitoraggio della sicurezza strutturale ha lo scopo di identificare, localizzare e misurare danni in strutture e fornire informazioni quantitative che, insieme a quelle qualitative, migliorano l'affidabilità del controllo.

L'accurata indagine dei segnali predominanti di serie di vibrazioni ambientali risulta di fondamentale importanza in molteplici campi: in particolare modo, nell'ambito dell'ingegneria civile, si sono analizzati moderati terremoti, determinando la variazione temporale delle frequenze naturali dell'edificio e del suolo, sia riguardo a successivi eventi sismici che nell'arco del medesimo evento. L'edificio si trova in una delle zone maggiormente colpite dal terremoto del Messico del 1985, durante il quale subì un moderato danno strutturale. L'analisi della variazione temporale delle frequenze naturali permette di osservare il comportamento non – lineare della struttura, attribuito ad un'inadeguata riparazione dei danni sofferti dall'edificio, a seguito del Terremoto del Messico del 19/09/1985.

6.1.1 ANALISI DI FOURIER

Per la determinazione delle frequenze predominanti di una serie di vibrazioni ambientali, ovvero per individuare la periodicità caratteristica di una serie temporale, è opportuno far riferimento all'analisi spettrale che consente di decomporre una serie temporale in una combinazione lineare di funzioni di basi ortogonali. In tale ambito, l'analisi di Fourier si basa sulla conversione matematica di dati in un dominio temporale a dati in un dominio di frequenza e viceversa.

Nel caso in cui sia dato un segnale discreto composto da una serie complessa, tale conversione è resa possibile tramite l'applicazione della trasformata discreta di Fourier. Per poter esattamente ricostruire un segnale analogico a partire dai dati campionati, in modo da descrivere l'informazione chiave del processo, il segnale continuo deve essere campionato in modo appropriato. Per il teorema del campionamento di Nyquist, un segnale continuo non può contenere componenti di frequenza superiori alla metà del tasso di campionamento: se sono presenti frequenze superiori, esse si andranno a combinare con le frequenze ufficiali all'interno dell'intervallo.

La Fast Fourier Transform (FFT) è uno dei più efficienti approcci, per minimizzare il numero di operazioni di calcolo e il tempo richiesto al calcolo della trasformata discreta di Fourier. Il successo di tale algoritmo

consiste nel fatto che le ridondanze intrinseche della trasformata discreta di Fourier (che accrescono il carico computazionale) possono essere ridotte, in modo tale da minimizzare il carico computazionale da un'operazione di ordine N^2 ad una di ordine $N \log_2 N$.

Tuttavia la FFT, applicata a serie temporali, può rivelare alcune restrizioni quali dispersione spettrale, aliasing e risoluzione. Tali limitazioni sono particolarmente problematiche, se si desidera analizzare la variazione temporale delle frequenze predominanti, ed è necessario dividere la serie temporale in diverse parti, con una estrema precisione. La dispersione spettrale causa la dispersione delle energie da distinti valori spettrali in canali di frequenze adiacenti, dando luogo a componenti spurie nello spettro di frequenza del segnale e facendo in modo che le componenti di frequenza non appaiano come singole linee nette. La dispersione spettrale può essere ridotta filtrando i valori campionati, in modo tale che il segnale si sviluppi e si estingua gradualmente. L'aliasing si presenta nei casi in cui il teorema del campionamento di Nyquist non è soddisfatto e componenti di alta frequenza del segnale appaiono a frequenze inferiori, rendendo impossibile la corretta ricostruzione dell'informazione contenuta nel segnale originale. La risoluzione spettrale indica il livello di dettaglio nello spettro di frequenza o l'abilità nel distinguere le risposte spettrali di due o più segnali. Per un numero di campioni N ed un intervallo di campionamento Δt , la risoluzione spettrale è data da $1 / N\Delta t$. Se la risoluzione spettrale è troppo grezza, i dettagli saranno persi; pertanto si dovrà aumentare $N\Delta t$. Tuttavia se Δt è troppo grande, può verificarsi aliasing; mentre aumentando N , ne può conseguire che la memoria necessaria per memorizzare i dati sia troppo grande e il tempo di calcolo eccessivamente lungo.

6.1.2 SPETTRI EVOLUTIVI

Gli spettri evolutivi (Windowed Fourier Transform) sono considerati una buona alternativa per rappresentare segnali non periodici e fornire informazione simultaneamente nel dominio del tempo ed in quello di frequenza, in modo da valutare la variazione temporale di segnali. Gli spettri evolutivi rappresentano una contraddizione matematica poiché, mentre nell'analisi di Fourier frequenza e tempo sono ortogonali, gli spettri evolutivi si basano sul concetto di una frequenza variante rispetto al tempo. Sebbene nel mondo fisico i segnali abbiano componenti di frequenza che cambiano nel tempo, la risoluzione dell'asse temporale e di quello della frequenza è comunque limitata dal principio di indeterminazione di Heisenberg per il quale si può scegliere tra alta risoluzione temporale ed alta risoluzione di frequenza, ma non entrambe.

Con gli spettri evolutivi, il segnale di input è suddiviso in più parti ed ognuna è analizzata per il suo contenuto di frequenza separatamente. Se il segnale ha nette transizioni, i dati di input sono moltiplicati per una funzione finestra, in modo che le sezioni convergano a zero agli estremi. L'effetto della finestra è quello di localizzare il segnale nel tempo ed è ottenuto tramite una funzione peso che pone minore enfasi vicino agli estremi dell'intervallo rispetto al centro. Lo spettrogramma risultante rappresenta la tendenza della variazione temporale rispetto al tempo, piuttosto che illustrare il comportamento frequenza – tempo con precisione.

6.1.3 ANALISI CON ONDINE (WAVELET)

La trasformata wavelet è particolarmente appropriata per l'analisi di segnali transitori e di sistemi tempo – varianti, poiché è localizzata sia nel tempo che in frequenza. Da questo punto di vista, le registrazioni della

risposta strutturale ad un terremoto sono transitori in natura e consistono di molteplici impulsi. Le ondinie sono funzioni matematiche che separano i dati in diverse componenti di frequenza, in modo da studiare ogni componente con una risoluzione abbinata alla scala. Paragonate ai tradizionali metodi dell'analisi di Fourier, le ondinie sono adatte per approssimare dati con cuspidi e discontinuità, perchè i dati sono processati a differenti scale e risoluzioni:

- ❑ utilizzando larghe finestre, si determinano gli aspetti più generali;
- ❑ mentre piccole finestre permettono di analizzare nel dettaglio.

Matematicamente le ondinie sono funzioni a durata limitata, localizzate sia nel tempo che nella frequenza, con valore medio nullo. Affinché la condizione di media nulla sia soddisfatta, la funzione dovrà essere oscillatoria da cui il nome ondina (wavelet). La procedura dell'analisi con ondinie consiste nell'adottare una funzione prototipo $\psi(t)$, chiamata ondina (wavelet) madre. La famiglia di ondinie $\psi_{a,b}(t)$ può essere costruita tramite operazioni elementari che consistono di traslazioni e variazioni di scala (dilatazioni e contrazioni) dell'ondina madre:

$$\psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad b \in R, a > 0$$

dove a è il fattore di scala che indica la larghezza dell'ondina e b lo sfasamento temporale che ne definisce la posizione. L'ondina prototipo corrisponde a: $b=0$ ed $a=1$; mentre a maggiore dell'unità corrisponde ad una dilatazione della ondina madre ed a minore dell'unità ad una contrazione. Il coefficiente $1/a$ è un fattore di normalizzazione per l'ampiezza dell'ondina, selezionato in modo tale che tutte le ondinie nella famiglia abbiano la medesima norma.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi_{(a,b)}(t)| dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)| dt$$

L'accuratezza è controllata selezionando la larghezza della finestra dell'ondina: grandi finestre temporali forniscono una migliore localizzazione in frequenza, ma più povera nel tempo e viceversa. Uno dei principali vantaggi dell'analisi con ondinie è l'abilità di effettuare analisi locali, ovvero di analizzare una parte localizzata di un segnale più grande. L'analisi temporale è effettuata utilizzando versioni contratte ed ad alta frequenza della ondina prototipo, mentre l'analisi di frequenza è effettuata con una versione dilatata ed a bassa frequenza della medesima ondina.

6.1.4 LA TRASFORMATTA CONTINUA WAVELET (CWT)

Come l'analisi di Fourier consiste nella scomposizione di un segnale in onde sinusoidali di differenti frequenze, in maniera simile, nell'analisi con ondinie il segnale è scomposto in versioni traslate e messe in scala dell'ondina madre. La trasformata continua Wavelet di una funzione è definita come la somma sul tempo di un segnale moltiplicato per versioni traslate e messe in scala della funzione ondina. I risultati della

CWT sono differenti coefficienti Wavelet T_f , in funzione di scala e posizione:

$$T_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi}_{(a,b)}(t) dt$$

A partire dai coefficienti Wavelet, il metodo più diretto per la determinazione della frequenza istantanea di un segnale consiste nel trovare, per ogni istante b , la scala a per la quale l'ampiezza della trasformata risulta massima. In questo modo, non si ha bisogno di usare alcuna informazione aprioristica circa i massimi, poiché il metodo si basa sull'osservazione euristica che, in un certo intervallo ristretto, l'energia del segnale è concentrata vicino alla sua frequenza istantanea. Una volta determinato il massimo, le frequenze istantanee sono calcolate come:

$$\omega_s(b) = \frac{\omega_0}{a_r(b)}$$

in cui ω_0 è la frequenza centrale della Wavelet madre, implicando che la Wavelet dilatata ($a > 1$) ha una frequenza minore della Wavelet prototipo di a volte.

6.1.5 UN'APPLICAZIONE

Gli spettri evolutivi e la trasformata con ondine sono stati impiegati, come già detto in precedenza, per l'analisi di dati provenienti da registrazioni di moderati terremoti, effettuate su un edificio di cemento armato di 14 piani, situato nella regione centrale di Città del Messico. In seguito al terremoto del 1985, durante il quale l'edificio subì un moderato danno strutturale, sono state aggiunte pareti di calcestruzzo e la sezione delle colonne è stata aumentata tramite jacketing, mentre le fondazioni non sono state modificate. Tra il 1993 ed il 1995, si sono registrate sei misurazioni di lievi terremoti. Tali eventi non hanno prodotto danni significativi a Città del Messico, ma la struttura ha subito danni non – strutturali secondari. L'edificio è stato strumentato con una rete di 14 accelerogrammi: 11 strumenti sono stati posizionati nella costruzione, 1 sul suolo e 2 nel sottosuolo. In questo lavoro, per ogni evento sismico, si sono analizzate solo le registrazioni effettuate sul tetto dell'edificio e sul suolo, per poter stabilire le proprietà dinamiche della struttura e del sottosuolo circostante.

Le variazioni temporali delle frequenze naturali sono state esaminate sia riguardo a successivi eventi sismici che all'interno di uno specifico evento, prendendo in considerazione i risultati di misurazioni di vibrazioni ambientali e le differenze con i risultati ottenuti da registrazioni relative a moderati terremoti. Per determinare l'abilità e la precisione degli spettri evolutivi, lo spettrogramma è stato calcolato per 2^{10} dati. I risultati di Figura 6.1.1 si riferiscono ad una misurazione effettuata il 10/12/1994, ad un tasso di campionamento di 0,01 secondi, relativamente all'accelerometro che si trovava sul tetto dell'edificio. Tramite gli spettri evolutivi (Windowed Fourier Transform), il segnale è simultaneamente rappresentato nel dominio del tempo e in quello di frequenza. Tuttavia la risoluzione è limitata dal principio di indeterminazione di Heisenberg e, di conseguenza, si può scegliere un'alta risoluzione temporale o un'alta risoluzione di frequenza, ma non

entrambe. Inoltre lo spettrogramma rappresenta la tendenza di variazione temporale, piuttosto della precisa relazione tra frequenza e tempo.

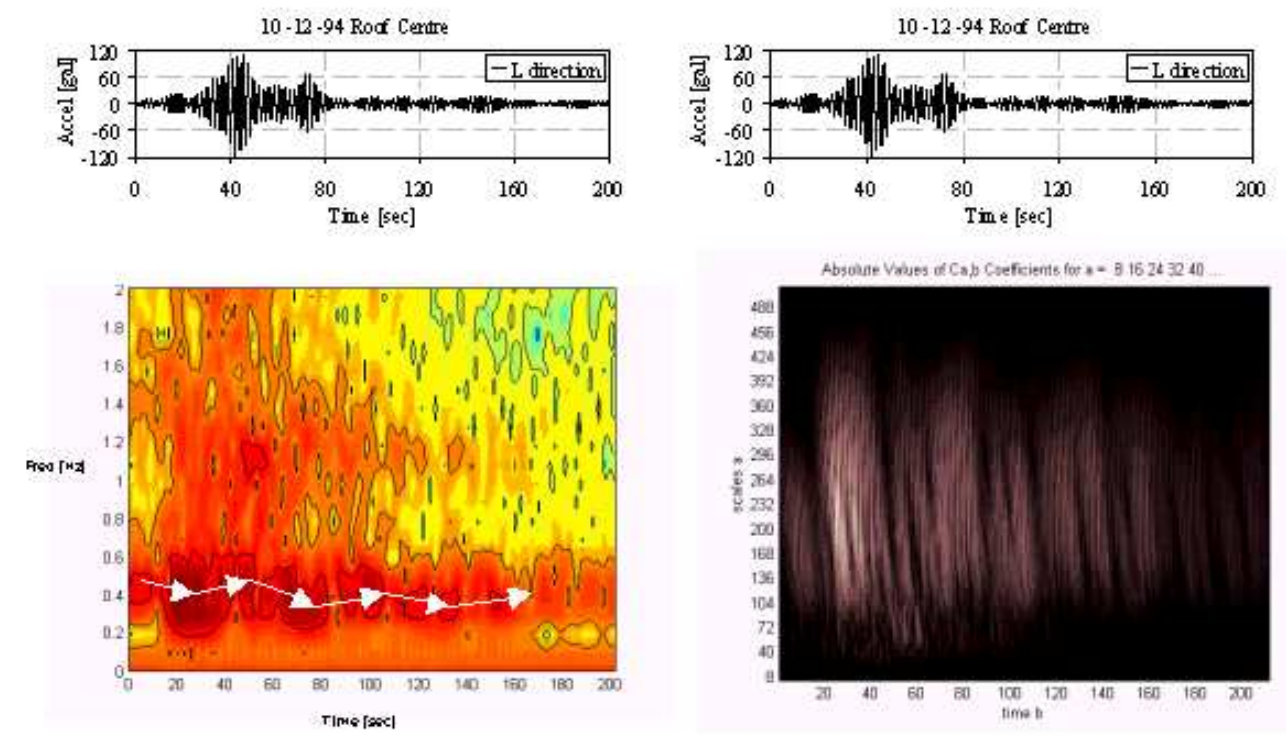


Fig. 6.1.1 – Spettrogramma della scossa registrata il 10/12/1994 sul tetto dell'edificio in direzione longitudinale (a sinistra) e esempio dell'ampiezza della trasformata Wavelet per il medesimo evento sismico

Tramite l'analisi con ondine, poiché l'accuratezza è controllata selezionando la larghezza della finestra della Wavelet, la determinazione della variazione temporale delle frequenze predominanti può essere determinata con molta efficacia. D'altra parte, solo selezionando l'ondina appropriata, le caratteristiche dei dati possono essere rappresentate accuratamente; altrimenti il metodo potrebbe risultare non rappresentativo del processo in esame e fornire solo risultati preliminari, privi di significato fisico diretto.

I risultati delle analisi (riportati nella tabella di figura 6.1.2) mostrano che il periodo delle vibrazioni rimane costante ed uguale a 0.5 Hz sul suolo, mentre cresce significativamente, in prossimità del tetto, all'aumentare dell'intensità delle scosse sismiche. Questo fatto suggerisce la presenza di danni permanenti della struttura ed è indice di un comportamento non – lineare, attribuito all'inadeguata riparazione dei danni sofferti a seguito del Terremoto del Messico, a seguito del quale si sono determinate le parti lesionate della struttura, allo scopo di eseguire un idoneo adeguamento sismico dell'edificio.

6.2 APPLICAZIONI GEOFISICHE DELL'ANALISI AUTOREGRESSIVA DI SERIE TEMPORALI

L'accurata indagine dei segnali predominanti di serie temporali di vibrazioni ambientali risulta di fondamentale importanza per la risoluzione di problemi geofisici. La struttura sotterranea è infatti eterogenea nello spazio, a causa della geologia del suolo e della presenza di costruzioni sotterranee; inoltre attività umane e fattori naturali (deformazioni e fratture della cavità sotterranea, eventi sismici e così via) determinano cambiamenti e portano informazioni sulla struttura.

Data	Condizione	Frequenza [Hz]	Naturale	Max. [gal]	Acc. (RC)	Max. Acc. (G) [gal]	
		<i>L</i>	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>T</i>
1992/09/23	AV	0.73	0.44	—	—	—	—
1993/05/15	Sisma	0.65	0.37	10.54	9.58	4.31	3.83
1993/05/15	Sisma	0.61	0.35	23.95	22.99	7.42	7.90
1993/10/24	Sisma	0.57	0.35	51.73	32.57	10.53	13.17
1993/11/25	AV	0.70	0.44	—	—	—	—
1994/05/23	Sisma	0.55	0.37	17.24	16.29	5.75	6.71
1994/12/10	Sisma	0.42–	0.29–	117.83	37.36	17.48	12.69
		0.53	0.31				
		0.64–	0.44				
1995/02/04	AV	0.66	0.44	—	—	—	—
1995/09/14	Sisma	0.45	0.28	117.83	87.18	37.60	34.97
1995/09/23	AV	0.66	0.42–	—	—	—	—
			0.44				

Fig. 6.1.2 – Schema riassuntivo delle frequenze naturali trovate a livello del tetto dell'edificio:

- durante i sei eventi sismici;
- in seguito ad esperimenti effettuati con vibrazioni ambientali

In questo lavoro, risultato di una ricerca sviluppata presso l'Earthquake Research Institute dell'Università di Tokyo, nell'ambito di un progetto di studio in paesi extraeuropei, supportato dal Politecnico di Milano, sono state analizzate le vibrazioni ambientali misurate all'interno delle gallerie della Centrale Idroelettrica di Kazunogawa, nella prefettura Yamanashi, in Giappone. Il sito si trova in una delle zone più attive del mondo dal punto di vista tettonico, a causa della subduzione della zolla del Mar delle Filippine che sprofonda sotto la zolla Eurasiatica. Il lavoro presenta le tecniche autoregressive di Prony e Sompi, e ne illustra l'applicazione per l'indagine delle proprietà meccaniche e tettoniche del luogo in esame.

La sismologia riguarda sia lo studio di improvvisi processi transitori dai quali si irradiano onde elastiche, come i terremoti, che l'analisi di fenomeni sismici non – transitori, quali i microtremiti, vibrazioni del terreno pressoché continue. Tali tremori risultano dalla combinazione di diverse fattori tra cui sorgenti di energia di deformazione che eccitano onde sismiche, maree, pressione atmosferica, riscaldamento della superficie e vibrazioni indotte da attività umane.

In particolare, nel Giappone meridionale, lungo la linea di subduzione della zolla delle Filippine, che sta sprofondando sotto la zolla Eurasiatica, sono stati rilevati tremori metamorfici, di periodo compreso tra 0.2 e 2 sec, e dovuti al moto di fluido liberato da un processo di disidratazione del basalto. Si è inoltre rilevato che tale fenomeno non si verifica nelle regioni settentrionali del Giappone, dove la zolla del Pacifico, circa 100 milioni di anni più antica di quella delle Filippine, è in subduzione sotto la zolla Eurasiatica. I tremori sembrano talvolta innescati da moderati terremoti e persistono generalmente per alcuni giorni. Occasionalmente i tremori si arrestano successivamente ad un terremoto. I tremori non rimangono nella stessa regione, ma si spostano, nel tempo e nello spazio, lungo la regione di subduzione. È stata anche suggerita una correlazione tra tremori metamorfici ed attività sismica.

Anche Kazunogawa (dove sono state effettuate le misurazioni analizzate e discusse in questo lavoro) si trova in prossimità della linea di subduzione della zolla delle Filippine al sotto la zolla Eurasiatica, inoltre una fessura originata sulla zolla delle Filippine si propaga fino al sito in esame. Alcuni segnali rilevati alle basse frequenze sono risultati notevolmente stabili, altri a frequenze più elevate sono attribuibili al funzionamento dell'impianto idroelettrico. A partire dai metodi discussi nel prosieguo, si sono analizzate le proprietà meccaniche e tettoniche del sito e la loro variazione temporale, fino ad individuarne la causa, ove possibile.

6.2.1 MODELLI AUTOREGRESSIVI

Per poter analizzare il fenomeno descritto si è fatto uso di modelli autoregressivi; infatti molti fenomeni geofisici sono processi lineari e deterministici, fisicamente descritti attraverso equazioni differenziali lineari del tipo:

$$c_0 \frac{d^P x(t)}{dt^P} + c_1 \frac{d^{P-1} x(t)}{dt^{P-1}} + \dots + c_P x(t) = u(t)$$

dove i coefficienti c_j rappresentano le caratteristiche del sistema dinamico, $u(t)$ l'eccitazione esterna e $x(t)$ lo spostamento causato dall'eccitazione cui il sistema reagisce secondo i suoi parametri caratteristici. Per poter spiegare i meccanismi fisici del sistema, occorre analizzare $x(t)$ e stimare i valori di c_j ed $u(t)$. La serie temporale $x(t)$ è generalmente non – stazionaria: ad esempio, se i coefficienti cambia temporalmente (allora il sistema è tempo – variante), oppure se esiste un'eccitazione generale.

6.2.2 METODO PRONY (EXTENDED PRONY METHOD)

L'algoritmo di Prony è una tecnica per modellare dati campionati ad intervalli costanti, come combinazione lineare di onde sinusoidali smorzate, tramite la determinazione dei parametri interni (smorzamento α , frequenza f) ed esterni (ampiezza A , fase θ) di soluzioni di un sistema dinamico lineare. Data una serie di osservazioni X_j , definita come somma del segnale H_j e del rumore E_j , per un numero di campioni N , il modello assunto nel metodo di Prony consiste nella combinazione di p serie di funzioni esponenziali di ampiezza, fase, frequenza e fattore di smorzamento ignote:

$$H_j = \sum_{l=1}^p b_l z_l^j \quad \forall j = 0, \dots, N-1 \quad \text{dove:} \quad b_l = A_l \exp[i\theta_l]$$

$$\text{e:} \quad z_l = \exp[(\alpha_l + i2\pi f_l)\Delta t]$$

La soluzione, basata sulla determinazione di A_l , θ_l , α_l , f_l e p , può essere ottenuta tramite minimizzazione dell'errore quadratico medio che implica una stima preliminare dei parametri incogniti, seguito da successive iterazioni, in modo da migliorare i risultati, ovvero:

$$E = \sum_{j=0}^{N-1} |X_j - H_j|^2 \rightarrow \min$$

Il metodo Prony fornisce una soluzione sub – ottimale che, pur non minimizzando il funzionale quadratico, giunge a risultati soddisfacenti in modo più efficiente. Si definisce una funzione a valori complessi $\psi(z)$:

$$\psi(z) = \prod_{k=1}^p (z - z_k) = \sum_{k=0}^p a_k z^{p-k} \quad \text{per} \quad p \leq k \leq N-1 \quad \text{e} \quad a_0 = 1$$

Determinato il valore di a_k per il quale $\psi(z)=0$, le soluzioni omogenee di $\psi(z)$ individuano le z_k del problema. Si può poi definire H_{j-m} in base alla relazione precedente, moltiplicarlo per a_m e, costruendo la combinazione lineare $p+1$ valori, si ottiene:

$$\sum_{m=0}^p a_m H_{j-m} = \sum_{l=1}^p b_l \sum_{m=0}^p a_m z_l^{j-m} = \sum_{l=1}^p b_l z_l^{j-p} \sum_{m=0}^p a_m z_l^{p-m} = \sum_{l=1}^p b_l z_l^{j-p} \psi(z_l) = 0$$

Poiché $\psi(z_l)$, valutato in una delle sue radici, risulta nullo. Dall'ultima relazione, si ha:

$$\sum_{m=0}^p a_m H_{j-m} = H_j + \sum_{m=1}^p a_m H_{j-m} = 0 \Rightarrow H_j = -\sum_{m=1}^p a_m H_{j-m} \quad \forall p \leq j \leq N-1$$

Ridefinendo X_j in termini di H_j e E_j , da questa relazione, risulta:

$$X_j = -\sum_{m=1}^p a_m H_{j-m} + E_j = -\sum_{m=1}^p a_m X_{j-m} + \sum_{m=0}^p a_m E_{j-m} = -\sum_{m=1}^p a_m X_{j-m} + \varepsilon_j$$

Anziché stimare i parametri tramite il metodo dei minimi quadrati, per disporre di un sistema di equazioni più semplice, si minimizza:

$$\sum_{j=p}^{N-1} |\varepsilon_j|^2 = \sum_{j=p}^{N-1} \left| \sum_{m=0}^p a_m X_{j-m} \right|^2 \rightarrow \min \Rightarrow \sum_{m=0}^p a_m \sum_{j=p}^{N-1} X_{j-m} X_{j-l} = 0 \quad \text{con} \quad a_0 = 1$$

La soluzione del sistema permette di definire i coefficienti autoregressivi a_m , per poi ricavare le radici polinomiali z_m dalla suddetta combinazione lineare. Allora il sopracitato funzionale quadratico si riduce ad un sistema di equazioni lineari nelle incognite b_m :

$$E = \sum_{j=0}^{N-1} \left| X_j - H_j \right|^2 = \sum_{j=0}^{N-1} \left| X_j - \sum_{l=1}^p b_l z_l^j \right|^2 \rightarrow \min$$

$$\sum_{j=0}^{N-1} z_m^j \left(X_j - \sum_{l=1}^p b_l z_l^j \right) = 0 \Rightarrow \sum_{l=1}^p b_l \sum_{j=0}^{N-1} z_m^j z_l^j = \sum_{j=0}^{N-1} X_j z_m^j$$

Infine a partire da z_i e b_i , si ottengono i valori di A_i , θ_i , α_i e f_i .

6.2.3 METODO SOMPI

Nel metodo Sompi il segnale è costituito da una combinazione di onde sinusoidali, smorzate o crescenti.

Questo metodo si basa sulla risoluzione di un'equazione omogenea, formalmente basata sui modelli autoregressivi, che descrive le proprietà caratteristiche di un sistema dinamico lineare e su un'ottimizzazione, derivata dal principio di massima verosimiglianza. Il segnale soddisfa l'equazione autoregressiva: $A(z)H_j=0$, dove $A(z)$ è un operatore complesso:

$$A(z) = \sum_{l=0}^p a_l z^{-l}$$

in cui a_l rappresenta i parametri autoregressivi, mentre p è l'ordine autoregressivo. La corrispondente equazione caratteristica è: $A(z) = 0$, e la stima ottimale dei coefficienti a_l risulta dalla massimizzazione della funzione di verosimiglianza L . Quando il segnale ed il rumore sono indipendenti, definendo i vettori $\underline{X}$ ed $\underline{A}$ corrispondenti a X_j e $A(z)$, con $|\underline{A}| = A^2 \neq 0$, risulta:

$$L = -\frac{1}{2} \log(2\pi\sigma_E^2) - \frac{1}{2A^2\sigma_E^2} \frac{1}{N-p} \sum_{j=p}^{N-1} \left(\sum_{l=0}^p a_l X_{j-l} \right)^2 \rightarrow \max$$

Massimizzando L rispetto a σ_E^2 ed a_m , si ottiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \sigma_E^2} &= 0 & \sigma_E^2 &= \frac{1}{N-p} \cdot \frac{1}{A^2} \cdot \sum_{j=p}^{N-1} \left(\sum_{l=0}^p a_l X_{j-l} \right)^2 \\ \frac{\partial L}{\partial a_m} &= 0 & \frac{1}{N-p} \sum_{l=0}^p a_l \sum_{j=p}^{N-1} X_{j-l} X_{j-m} &= \sigma_E^2 a_m \quad \forall m = 0, \dots, p \end{aligned}$$

ponendo come condizione, per evitare soluzioni banali, $\sum_{l=0}^p a_l^2 = 1$.

I coefficienti autoregressivi a_l sono determinati a partire dall'ultima equazione omogenea, risolvendo un problema agli autovalori. Tra i $p+1$ risultati, si seleziona l'autovettore A' , corrispondente al minimo autovalore, e successivamente dal sopraccitato operatore complesso, si stimano le radici z' . Poiché i coefficienti a_l sono reali, lo stesso operatore avrà $p/2$ paia di radici complesse – coniugate, quando p è pari e $(p-1)/2$ paia di radici complesse – coniugate e una radice reale, quando p è dispari. Infine una volta ricavate le frequenze e gli smorzamenti a partire dalle radici z' , i valori di ampiezze e fasi si ricavano seguendo la stessa procedura applicata nel metodo Prony.

6.2.4 SELEZIONE DEL METODO PIÙ APPROPRIATO

Per comparare i due metodi autoregressivi, precedentemente descritti, si è deciso di generare ed analizzare serie temporali costruite ad hoc. Le serie temporali sono composte da tre onde sinusoidali non smorzate di frequenze 10, 12 e 20 Hz cui era stato aggiunto rumore bianco. Mentre le frequenze delle tre onde sinusoidali, costituenti l'onda artificiale, sono rilevate con precisione, le ampiezze talvolta differiscono dai valori reali. Tutto ciò risulta dal fatto che, in entrambi i metodi, la frequenza è una variabile primaria

direttamente calcolata dai dati, mentre per l'ampiezza è determinata in seguito, a partire dalle variabili primarie e, di conseguenza, l'imprecisione numerica delle variabili primarie risulta amplificata nelle secondarie. Inoltre si rileva che la presenza di errore sulle ampiezze ha occasionalmente determinato l'individuazione di falsi segnali.

Successivamente è stato analizzato l'effetto del rumore bianco sulla soluzione per la stessa serie temporale e, aumentando il livello di errore, si è osservato quanto la determinazione della frequenza risultasse influenzata. I risultati (si veda, a riguardo, la figura 6.2.1) indicano che, per bassi livelli di rumore, il metodo di Sompi sembra fornire risultati più precisi, mentre per livelli più alti, il metodo di Prony fornisce valori migliori.

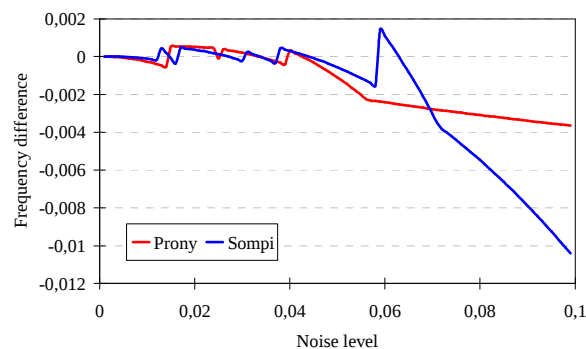


Fig. 6.2.1 – Differenza fra le frequenze reali e quelle ricavate con il metodo Prony e Sompi

6.2.5 ANALISI DI MISURAZIONI AMBIENTALI

Le misurazioni sono state effettuate il 02/06/2002, il 09/01/2003 ed il 30/07/2003. Poiché si è osservato che la precisione dei metodi autoregressivi è influenzata dal livello di rumore, come prima cosa si sono valutate le condizioni di rumore, la temperatura e la pressione nel sito. Infatti si è trovato che, sebbene le gallerie della Centrale idroelettrica di Kazunogawa fossero particolarmente profonde, implicando un livello di rumore molto basso, quando la centrale è in funzione, le turbine generano elettricità ed il livello di rumore risulta eccessivamente elevato. Pertanto nell'analisi, si trascurano le misurazioni effettuate in tale situazione. I risultati, ottenuti per le tre serie di misurazioni, sono illustrati in Figura 6.2.2.

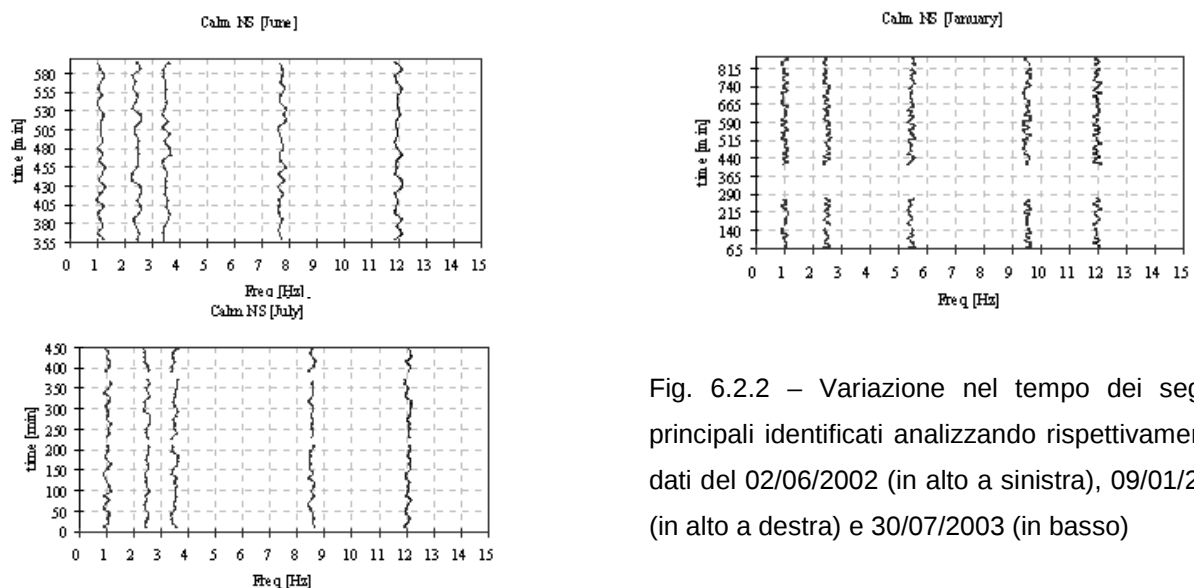


Fig. 6.2.2 – Variazione nel tempo dei segnali principali identificati analizzando rispettivamente i dati del 02/06/2002 (in alto a sinistra), 09/01/2003 (in alto a destra) e 30/07/2003 (in basso)

La precisione degli strumenti di misura può essere disturbata da variazioni nella temperatura e nell'umidità, con conseguente rilevamento di misure erranee. Tuttavia in questo caso, variazioni termiche nel breve periodo devono essere prevenute tramite isolamento termico, mentre variazioni stagionali, pur non interferendo con il segnale sismico, possono condurre lo strumento oltre i suoi limiti operativi.

Successivamente il metodo Prony è stato applicato ai dati misurati, fornendo risultati coerenti con quelli ottenuti tramite lo spettro di Fourier, ma segnali essenzialmente ad alta frequenza. Pertanto utilizzando un filtro passa – basso a 20 *Hz* e poi riducendo la lunghezza dei dati, è stato possibile determinare anche i segnali a basse frequenze. Segnali stabili sono stati individuati a circa 1 *Hz* e 2.5 *Hz*. Il segnale a 2.5 *Hz* è coerente con le frequenze dei microtemori, e si suppone sia associato al movimento della zolla delle Filippine. Relativamente al segnale individuato ad 1 *Hz*, è stato osservato che tale frequenza sia stata spesso misurata, sebbene la relativa causa sia ancora sconosciuta. A 3.5 *Hz* è rilevato un segnale che tuttavia scompare durante le misurazioni effettuate nei mesi invernali ed è probabilmente associato ad effetti stagionali. Infine un segnale la cui frequenza oscilla tra 8.8 e 9.5 *Hz* è individuato con una frequenza inferiore durante la stagione più piovosa (giugno 2002), quando anche il terreno è più umido, e cresce gradualmente con l'approssimarsi della stagione secca (luglio 2003), per raggiungere il valore più alto in inverno (gennaio 2003), quando nel sito sperimentale stava nevicando e, sotto al manto nevoso, il terreno era particolarmente secco. Si suppone che tale segnale sia collegato alla frequenza naturale della superficie, facendo riferimento al modo libero di oscillazione del terreno.

APPENDICE B –TECNOLOGIA DEI MATERIALI

L'analisi di varianza, di seguito effettuata, intende spiegare la variabilità dei dati rilevati, nelle prestazioni di materiali da costruzione stradale, in funzione della variabilità delle metodiche, dei siti e delle ripetizioni delle prove. Essa fornisce i risultati attesi in maniera assolutamente ottimale; del resto, è particolarmente difficile non accogliere favorevolmente risposte che dichiarano significative le metodiche e non – significativi tanto i siti, quanto le ripetizioni, dove i secondi sono tuttavia un po' più rilevanti delle ultime.

B.1 ANALISI DI VARIANZA A TRE VIE SENZA INTERAZIONI FRA LE CELLE:

$$\begin{aligned}\bar{a} + \hat{a}_i + \hat{a}_j + \hat{a}_k &= s_{ijkl}^o + \hat{v}_{ijkl} & \forall i = 1, \dots, I \\ & & \forall j = 1, \dots, J \\ & & \forall k = 1, \dots, K \\ & & \forall l = 1, \dots, L = 1\end{aligned}$$

Nella espressione precedente I è il numero trattamenti (cioè le metodiche sperimentate), J è il numero di blocchi (cioè i siti dove è avvenuta la sperimentazione), K è il numero di strati (cioè le ripetizioni delle prove) ed $L=1$ è la dimensione della variabile statistica. Il numero complessivo di osservazioni (si veda, a riguardo, la tabella sottostante) è $m = I \cdot J \cdot K \cdot L = 30$, ed il numero di parametri è $n = I + J + K + 1 = 11$.

A tali equazioni è necessario aggiungere alcune condizioni di vincolo, a causa della sovrapparametrizzazione dovuta ad incognite non linearmente indipendenti che determinano singolarità del sistema. Pertanto per ogni gruppo di parametri, si è imposto che la loro somma fosse esattamente nulla, ovvero una matrice di

coefficienti tutti unitari a basso peso (10^{-2}) è stata addizionata alla matrice normale per ogni gruppo di parametri.

10711	10444	7438	8999	10451
19273	17944	12957	18358	17912
10813	9992	9384	9320	12473
18864	17278	17916	16791	19018
10396	10395	8070	10057	10245
18630	18458	15318	18612	19724

I valori numerici ad esse relativi possono, ancora, essere facilmente ottenuti risolvendo, a minimi quadrati, i suddetti sistemi di equazioni d'osservazione e, tramite essi, propagando, opportunamente, le varianze delle osservazioni.

SOLUZIONE, SQM E TEST T DI STUDENT

MEDIA:		1		
1	1.3875	0.6263	2.2153	2.07
TRATTAMENTI:		2		
2	-0.3929	0.4946	-0.7944	2.07
3	0.3929	0.4946	0.7944	2.07
BLOCCHI:		5		
4	0.0906	0.2010	0.4511	2.07
5	0.0210	0.2010	0.1047	2.07
6	-0.2027	0.2010	-1.0089	2.07
7	-0.0185	0.2010	-0.0922	2.07
8	0.1096	0.2010	0.5453	2.07
STRATI:		3		
9	-0.0426	0.3305	-0.1289	2.07
10	0.0310	0.3305	0.0939	2.07
11	0.0116	0.3305	0.0350	2.07

Dalla tabella si evidenzia ovviamente la somma nulla dei parametri di ciascun gruppo, ma soprattutto la non significatività di alcun parametro, fatto salvo la media generale. Eppure come specificato nel prosieguo, l'analisi di varianza a tre vie è del tutto significativa. Infatti dalle stime dei parametri si ricavano, immediatamente, le varianze spiegate, relative ai trattamenti T , ai blocchi B ed agli strati S , concordemente al modello di riferimento prescelto:

$$\sigma_T^2 = \frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I \hat{a}_i^2 \quad \sigma_B^2 = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J \hat{a}_j^2 \quad \sigma_S^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K \hat{a}_k^2$$

e la varianza residua:

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \hat{v}_{ijkl}^2$$

dove il denominatore rappresenta i gradi di libertà del sistema: $\nu = I \cdot J \cdot K \cdot L - (I-1) - (J-1) - (K-1) - 1$

Un giudizio sull'analisi di varianza e sulla validità dei modelli adottati discende dalla comparazione fra la varianza spiegata e residua. In questa sede, si utilizza sempre lo schema rigido di comparazione, confrontando direttamente la varianza spiegata e la varianza residua. Di conseguenza, si ha:

ANALISI DI VARIANZA:

TRATTAMENTI E TEST F DI FISHER	2	15.7972	3.44
BLOCCHI E TEST F DI FISHER	5	1.2715	2.66
STRATI E TEST F DI FISHER	3	0.0993	3.05

dove il test F di Fisher passa, in abbondanza, per quanto riguarda i trattamenti, ovviamente significativi che caratterizzano la prova in esame (e danno senso e significato all'intero trattamento statistico dei dati), mentre lo stesso test non passa per quanto riguarda sia i blocchi che gli strati. Eppure è possibile rilevare come i blocchi diano un po' più di significato al test, rispetto agli strati, in quanto cambiare blocco vuol dire operare in un altro sito, mentre cambiare strato vuol dire semplicemente cambiare campione nello stesso sito. Come evidente, il cambio di sito innesca una certa variabilità, per quanto debole ed indesiderata, mentre il cambio di campione nello stesso sito ne innesca una certamente minore, altrettanto indesiderata e comunque trascurabile. Queste considerazioni danno ragione della effettiva validità dell'analisi di varianza, rispetto al semplice test di significatività dei parametri, effettuato con la distribuzione t di Student. In effetti, confrontando qualitativamente la varianza a priori con il sigma zero a posteriori si può osservare una significativa riduzione della dispersione (a riguardo, data la loro stretta dipendenza, potrebbero essere confrontati solo in termini non – parametrici) ed il test chi quadrato passa con un'abbondanza sbalorditiva:

MEDIA, SQM E

N. DATI E PARAMETRI	1.4067	0.4181	30	11
GDL, SIGMA ZERO E				
TEST CHI QUADRATO	22	0.0988	0.1857	33.9

Controlli numerici danno ragione della sostanziale correttezza del modo di procedere. Infatti tanto il numero di condizione del sistema (calcolato sulla norma dell'estremo superiore delle matrici normale ed inversa), quanto le ridondanze locali delle singole osservazioni (calcolate in base al teorema di decomposizione ortogonale della varianza) sono relativamente prossimi ad uno:

NUMERO DI CONDIZIONE	0.8364
RIDONDANZE LOCALI	0.7333

cosa che garantisce di una sufficiente lontananza tanto dalla condizione di singolarità e malcondizionamento del sistema, quanto dalla condizione di inaffidabilità e non – controllabilità delle singole osservazioni. Da ultimo per quanto riguarda l'eventuale presenza di dati anomali, occorre segnalare come il test tau di Thompson evidenzi due osservazioni, su trenta, appena oltre la soglia di criticità:

DATI ANOMALI, SCARTI, SQM, TEST TAU DI THOMPSON

14	1.2957	0.2393	0.0846	2.8270	1.9386
16	1.7916	-0.1830	0.0846	-2.1616	1.9386

cosa che assicura della sufficiente bontà dei dati rilevati ed esclude particolari necessità di eliminare dati anomali, prima di effettuare il calcolo di statistiche ottimali.

Nell'immediato prosieguo, si riportano le stime delle osservazioni compatibili con il modello funzionale adottato, precedute dai valori delle osservazioni (divisi per 10^4) e seguite dal loro scarto quadratico medio:

1	1.0711	1.0426	0.0510	16	1.7916	1.6086	0.0510
2	1.9273	1.8284	0.0510	17	0.8070	0.8034	0.0510
3	1.0813	1.1163	0.0510	18	1.5318	1.5892	0.0510
4	1.8864	1.9020	0.0510	19	0.8999	0.9335	0.0510
5	1.0396	1.0968	0.0510	20	1.8358	1.7192	0.0510
6	1.8630	1.8826	0.0510	21	0.9320	1.0071	0.0510
7	1.0444	0.9730	0.0510	22	1.6791	1.7929	0.0510
8	1.7944	1.7588	0.0510	23	1.0057	0.9876	0.0510
9	0.9992	1.0467	0.0510	24	1.8612	1.7734	0.0510
10	1.7278	1.8324	0.0510	25	1.0451	1.0616	0.0510
11	1.0395	1.0272	0.0510	26	1.7912	1.8473	0.0510
12	1.8458	1.8130	0.0510	27	1.2473	1.1352	0.0510
13	0.7438	0.7492	0.0510	28	1.9018	1.9210	0.0510
14	1.2957	1.5350	0.0510	29	1.0245	1.1157	0.0510
15	0.9384	0.8229	0.0510	30	1.9724	1.9015	0.0510

Si noti altresì come, essendo tutti uguali gli scarti quadratici medi delle stime suddette, il teorema di decomposizione ortogonale della varianza faccia sì che anche lo scarto quadratico medio di tutti gli scarti residui sia sempre uguale e pari a 0.0846. Infine giova ribadire come i test di validazione dei modelli, quali quelli qui presentati e svolti, permettano di sottoporre a verifica, mediante opportuni controlli e confronti d'ipotesi, le stime effettuate come, del resto, tutti i risultati ottenuti nell'ambito della statistica.

B.2 OLTRE IL GIUDIZIO STATISTICO

L'analisi di varianza effettuata, come già detto in precedenza, ha fornito i risultati attesi, in maniera assolutamente ottimale. Eppure tutto ciò potrebbe far sorgere il dubbio di un'analisi pilotata e, di conseguenza, alcune considerazioni / precisazioni devono essere messe in chiaro, come esposto nell'immediato prosieguo.

- ❑ Una qualsiasi analisi statistica fallisce, quasi certamente, se chi la conduce non dispone delle capacità operative e dei mezzi tecnici per effettuarla a regola d'arte.
- ❑ Una qualsiasi analisi statistica deve obbligatoriamente muoversi sulla base di alcune aspettative, fondate sulle preconoscenze dei fenomeni e/o dei processi oggetto di studio.
- ❑ Una qualsiasi analisi statistica può confermare liberamente o, altrettanto liberamente, smentire quanto ipotizzato, sulla base delle suddette preconoscenze.
- ❑ In entrambi i casi, i dati raccolti portano a calcolare statistiche campionarie di alcuni modelli, come stime dei valori teorici della popolazione, in generale, incogniti ed inconoscibili.
- ❑ Successivamente le statistiche campionarie sono confrontate con i valori di riferimento, rappresentativi dei sopracitati valori teorici, dove l'aderenza o meno determina una conferma od una smentita.
- ❑ Nel primo caso infatti, l'aderenza probabilistica fra statistiche campionarie e valori di riferimento porta a confermare le ipotesi effettuate ed i modelli prescelti.

- ❑ Nel secondo caso invece, la non – aderenza probabilistica fra statistiche campionarie e valori di riferimento porta viceversa a smentire le ipotesi effettuate.
- ❑ Pertanto l'accadere del secondo caso richiede di abbandonare i modelli prescelti, modificare le ipotesi effettuate e riconsiderare le preconoscenze, per quanto possibile.
- ❑ Al contrario, l'accadere del primo caso è certamente un'utile validazione sperimentale di modelli, ipotesi e preconoscenze, anche se non costituisce alcuna dimostrazione.
- ❑ Resta da notare come una dimostrazione non sia una verifica sperimentale concreta, ma un'operazione logica astratta per cui basta un solo controesempio, mentre non servono innumerevoli esempi.

Un'ultima importante considerazione / precisazione non attiene all'epistemologia della ricerca, ma all'etica del ricercatore. Questi infatti non deve falsare i risultati ottenuti, in alcun modo, alterandoli verso una qualche direzione cui vuole far giungere la ricerca in corso. Proprio per questo, è auspicabile che sappia resistere a lusinghe e/o minacce di tipo tribale, culturale, religioso, ideologico, politico, economico, accademico, ecc., compreso il prestigio personale, che possono gravemente compromettere la libertà della ricerca e del ricercatore stesso. E' un compito arduo, perché ancora più delle minacce, le lusinghe possono essere subdole e sottotaciute. Ciononostante la stima di un ricercatore ed il valore effettivo di una ricerca stanno sostanzialmente nella capacità di rifiutare clausole compromissorie invalidanti e nell'eventuale denuncia pubblica del venire meno dei mezzi materiali, per poter impostare liberamente, sviluppare nel modo dovuto e condurre a termine con dignità la ricerca intrapresa.

INGEGNERIA GENETICA ¹⁷

7.1 PRE-PROCESSAMENTO DI DATI DI ESPRESSIONE DA MICROARRAY

La tecnologia dei saggi di espressione genica su microarray permette di studiare il comportamento di un elevato numero di geni nell'ambito di una o più popolazioni cellulari. Le sequenze geniche target, depositate su piccole membrane di materiali come nylon e vetro, sono fatte reagire con RNA messaggero estratto dalle cellule oggetto di studio. Il prodotto finale è un'immagine digitale che contiene l'informazione sul livello di espressione dei target. SpotView è un programma, sviluppato allo scopo di leggere immagini da microarray, che utilizza griglie regolari di aree di interesse per il recupero dei dati. L'integrazione con un simulatore di spot costituisce la base per produrre esempi sintetici sui quali compiere studi.

Negli ultimi anni, è stata sviluppata una metodologia, basata su microarray, il cui scopo è la comprensione del ruolo dei geni, attraverso il processamento di immagini digitali. Quantità note di RNA messaggero (mRNA) sono estratte dalle cellule oggetto del saggio, marcate con sostanze fluorescenti e, in seguito, sottomesse a reazione di ibridazione con il pannello dei target del microarray. Ad ibridazione avvenuta, i segnali di fluorescenza sono letti e trasformati in immagine digitale ad una o più bande. L'intensità del segnale, nella generica posizione del target, è comunemente attesa che sia direttamente proporzionale al livello di espressione del target nell'mRNA ibridato. Il processamento dell'immagine (la figura 7.1 mostra un esempio reale) si rivela cruciale per associare, ad ogni target, il suo valore di espressione in una delle

¹⁷ Anni fa, l'autore ha avuto l'occasione di leggere uno dei primi annunci della volontà della comunità scientifica dei genetisti e dei biomedici, guidata dai suoi più autorevoli esponenti, di voler procedere alla classificazione ed alla mappatura del genoma umano. Un contatto diretto ha permesso di individuare in alcune metodologie della geomatica e, in particolare, nelle procedure della fotogrammetria numerica e della cartografia informatica, interessanti contributi offerti dal trattamento delle osservazioni all'analisi dei dati.

popolazione cellulari studiata. La quantificazione dell'immagine si rivela fondamentale, per giungere a dati finali corretti e affidabili, e la localizzazione dello spot di segnale permette, per ogni banda dell'immagine, la lettura di un valore di espressione grezza e la stima del rumore locale.

A questo scopo, è stato sviluppato un programma di lettura dei pattern di espressione di un'immagine da microarray che definisce griglie regolari di aree di interesse di recupero del segnale di espressione e di stima del rumore. I differenti momenti del saggio inducono l'immagine a contenere numerosi disturbi tra i quali il rumore di background è il più considerevole. Un simulatore di immagini è stato sviluppato, al fine di studiare i numerosi problemi che inficiano la bontà delle immagini.

7.2 RAPPRESENTAZIONE DEI DATI PER LA LETTURA DELL'IMMAGINE

Il primo passo, verso l'ottenimento dei dati di espressione genica, è la lettura dell'immagine. Griglie regolari di aree di interesse sono poste sull'immagine ed il segnale è recuperato per ogni banda. Tale procedura è vantaggiosa per quelle immagini di espressione contenenti pattern regolari. Una griglia di lettura è composta di elementi disposti secondo righe e colonne. Più griglie di lettura indipendenti possono essere usate per la stessa immagine. Ogni elemento di griglia è composto da un'area di interesse dell'espressione e da un'area per la stima del rumore di fondo. La griglia è definita attraverso il numero di elementi per riga e per colonna, lo spacing lungo le righe e le colonne, la forma e la dimensione delle due aree di interesse. Se la posizione della griglia segue il pattern di segnale, il valore di integrazione del segnale, nell'area di interesse del segnale di espressione, fornisce una misura grezza del livello di espressione nella popolazione cellulare associata ad una certa banda. Definendo con A_s l'area di interesse del segnale di espressione, si ha un valore di integrazione I_b per ogni target del pannello e per ogni banda b dell'immagine:

$$I_b = \sum_{i \in A_s} s(i, b)$$

Il rumore di background N_b è atteso essere un valore costante nell'area di interesse del segnale di espressione. Questo valore è stimato, per ogni banda b , come la media dell'intensità dei pixel nell'area di stima del rumore A_n contenente C_n pixel:

$$n_b = \frac{1}{C_n} \sum_{i \in A_n} s(i, b)$$

Il rumore di fondo N_b del generico spot sarà dato, per la banda b , dal rumore medio stimato, moltiplicato per l'area di interesse del segnale di espressione A_s :

$$N_b = n_b \times A_s$$

Sottraendo il rumore di fondo stimato al valore del dato di integrazione I_b , lo stesso è purificato dal rumore e si trasforma in dato grezzo di espressione E_b : $E_b = I_b - N_b$. Tuttavia poiché spot luminosi, posti nelle vicinanze, possono distorcere il valore locale del background. Tale disturbo può essere eliminato, sostituendo la precedente stima del rumore, con la mediana delle stime dei background dei circostanti e di quella dello spot corrente.

La posizione di una griglia di lettura è fornita nel sistema di riferimento dell'immagine che ha il pixel (0,0) nell'angolo superiore sinistro, l'asse X lungo le righe verso destra e l'asse Y lungo le colonne verso il basso. I parametri di posizione della griglia sono le coordinate (x,y) del centro dell'elemento superiore sinistro della griglia e l'angolo orario di rotazione, a partire dalla direzione positiva dell'asse X . Affinché la griglia sia adattata il più possibile al pattern di segnale, l'ancora del movimento di rotazione può essere un qualsiasi elemento della griglia e il movimento di rotazione può essere diverso da una semplice rotazione rigida. Una conoscenza a priori del processo di acquisizione dell'immagine aiuta a definire ed a posizionare la griglia di lettura sull'immagine. Solo il reale pattern di segnale è in grado di indirizzare la griglia verso la sua esatta posizione. Ad un primo posizionamento approssimato e manuale, segue un aggiustamento automatico basato sul pattern di segnale. I parametri della griglia sono aggiornati progressivamente fino a raggiungere l'equilibrio permanente. Tale ultima condizione è raggiunta attraverso la massimizzazione (o la minimizzazione) di una predefinita misura correlata alla griglia stessa. Più in dettaglio, il raffinamento della posizione è prodotto da una serie ordinata di processi di raggiungimento dell'equilibrio, uno per ogni grado di libertà della griglia, ossia due traslazioni lungo gli assi, una rotazione attorno all'elemento d'ancora, due espansioni lungo gli assi e attorno all'elemento d'ancora e due contrazioni lungo gli assi e attorno all'elemento d'ancora. Ogni singolo stato di equilibrio è raggiunto, per il generico grado di libertà, inducendo la griglia a compiere una piccola e limitata oscillazione, attorno alla sua posizione corrente, ed individuando la posizione di massimo (o di minimo) locale della misura correlata alla griglia. La più recente posizione raggiunta diventa la posizione corrente dalla quale proseguire, con una nuova oscillazione dello stesso movimento, fino a raggiungere una posizione di equilibrio permanente per il corrente grado di libertà. La sequenza di aggiustamento e la posizione finale sono determinate dai movimenti scelti (numero, tipo e ordine), dalla banda di segnale selezionata ed infine dalla misura che conduce l'intero processo. Il calcolo di alcune statistiche permette di associare, ad ogni spot, una misura della sua qualità. La deviazione standard delle intensità di segnale, la percentuale di saturazione e la percentuale dei pixel con intensità maggiore o uguale ad una deviazione standard, sopra la mediana del background, forniscono una buona misura di qualità dello spot nel fornire dati di espressione.

7.3 SIMULAZIONE CON METODO DI MONTE CARLO

Il simulatore, basato su metodo di Monte Carlo, è un tool estensibile che tenta di riprodurre il processo di generazione del segnale del singolo spot simulando il comportamento delle infinite sorgenti puntiformi che compongono l'area di deposizione del target. Si suppone che il sistema sia lineare e tempo-invariante e che ogni sorgente sia trasformata dalla Point Spread Function (PSF) del sistema. Siano date le distribuzioni di probabilità $f(x)$ e $g(y)$ di due variabili casuali e, tra esse, esista la seguente relazione:

$$\int_{-\infty}^x f(s)ds = \int_{-\infty}^y g(t)dt$$

dove per $g(y)$ si è scelta la distribuzione rettangolare, definita per valori di y nell'intervallo da 0 ad 1:

$$\begin{aligned} g(y) &= 1 & 0 \leq y \leq 1 \\ g(y) &= 0 & y < 0 \text{ e } y > 1 \end{aligned}$$

La frequenza cumulata $F(x)$ e la variabile stocastica x sono fornite dalle seguenti relazioni:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(s) ds = \int_0^y dt = y \quad 0 \leq y \leq 1 \quad \text{da cui} \quad x = F^{-1}(y)$$

Un'estrazione dalla popolazione di y può così ricostruire la funzione di frequenza cumulata di una variabile stocastica x e la variabile x stessa. La scelta della funzione di distribuzione da campionare influenza il sistema di campionamento. Se la funzione di distribuzione può essere integrata e la funzione di frequenza cumulata è reversibile, è possibile il campionamento diretto. In caso contrario, si utilizza il campionamento con rigetto. Il secondo caso forza a campionare la funzione di distribuzione $f(x)$ con x tra 0 e l'ampiezza A del fenomeno studiato. E' estratto un valore di y_1 , tra 0 e 1. Si ottiene poi il valore di $f(x)$ in corrispondenza di y_1A e $f(y_1A)$ è la probabilità che x sia proprio uguale a y_1A . Un nuovo valore y_2 è estratto e $f(y_1A)$ è comparato a $y_2f_{\max}(x)$ che è il prodotto tra y_2 e il valore massimo di $f(x)$. Dopodiché y_1A è accettato, se è vera la seguente relazione:

$$f(y_1A) \geq y_2f_{\max}(x)$$

È evidente che la frequenza di rigetto dipenderà dalla forma della funzione di distribuzione. Quanto più è costante la funzione di distribuzione nel range del fenomeno, tanto più piccola è la frequenza di rigetto. Si suppone che l'area di deposizione del materiale genetico, con raggio R , sia composta di un numero infinito di sorgenti puntiformi di segnale. Se si suppone che target e mRNA reagiscano in maniera uniforme nell'area di deposizione, allora ogni sorgente ha la stessa capacità di produrre il segnale di espressione. L'uso di un campionamento uniforme dell'area di deposizione è ragionevole per selezionare un gran numero di sorgenti origine del segnale. Ogni sorgente è poi trasformata secondo la PSF scelta.

La variabile stocastica x assume il ruolo di distanza dalla sorgente. L'asse x è definito dal suo angolo rispetto ad un asse di riferimento predefinito, angolo determinato da un campionamento uniforme del range di valori tra 0 e 2π . La simulazione di uno spot singolo implica la scelta del raggio R dell'area di deposizione del target, del numero di campionamenti dell'area di deposizione, della funzione di distribuzione $f(x)$, del tipo di campionamento e del numero di campioni della funzione di distribuzione. La diversa capacità di produzione del segnale delle differenti parti dell'area di deposizione dovrebbe essere tenuta in considerazione e una funzione di accettazione $s(z)$, della generica coordinata z della sorgente, dovrebbe essere usata per accettare o rifiutare la sorgente.

7.4 LETTURA DELL'IMMAGINE

Il posizionamento semiautomatico di una griglia di lettura (illustrato in figura 7.2) è stato applicato ad un esempio reale, costruito con 100.000 campionamenti dell'area di deposizione. Esso mostra un pattern di segnale molto semplice con 5 colonne e 5 righe. Una griglia di lettura approssimata di (5×5) elementi è stata posta sull'immagine ed in seguito aggiustata. Entrambe le aree di ogni elemento sono di forma circolare, allo scopo di seguire la simmetria, pressoché circolare, dello spot. La misura di segnale correlata alla griglia è

l'integrazione totale, nelle aree di interesse, del segnale di espressione della collezione G degli elementi della griglia. L'integrazione totale deve essere massimizzata:

$$I_{Tb} = \sum_{j \in G} \sum_{i \in Asj} s_j(i, b)$$

Quando la griglia è centrata sul pattern dell'immagine, i dati grezzi di espressione possono essere letti. L'ordine di lettura degli spot va da destra a sinistra e dall'alto verso il basso.

7.5 SIMULAZIONE DI UNO SPOT

Il metodo di simulazione fornisce un cluster di eventi stocastici attorno al centro di deposizione. La conversione in una matrice di pixel è compiuta contando ogni evento che cade in ogni area dei pixel in cui è stato suddiviso il piano degli eventi. Questo valore sarà l'intensità del segnale digitale nel generico pixel. La risoluzione prescelta determina il numero di eventi in ogni pixel e, di conseguenza, l'intensità del segnale simulato. Il range degli eventi deve essere mappato al range dei livelli di grigio, per convertire l'immagine degli eventi in una immagine standard. La distribuzione normale, scelta per l'esempio di figura 7.3, è ristretta a $x \geq 0$ e ha un valore massimo in corrispondenza di $x=0$, nella sorgente campionata:

$$f(x) = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

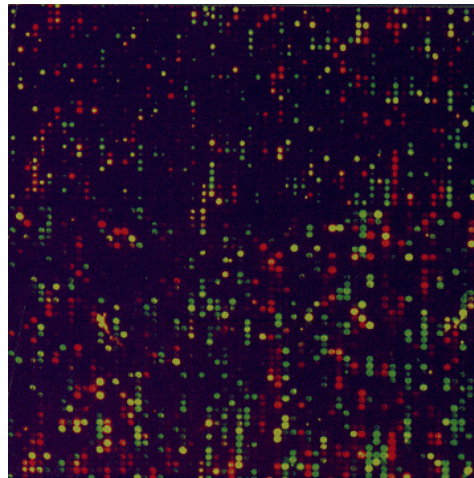


Fig. 7.1 – Esempio di immagine a due bande (due popolazioni cellulari)

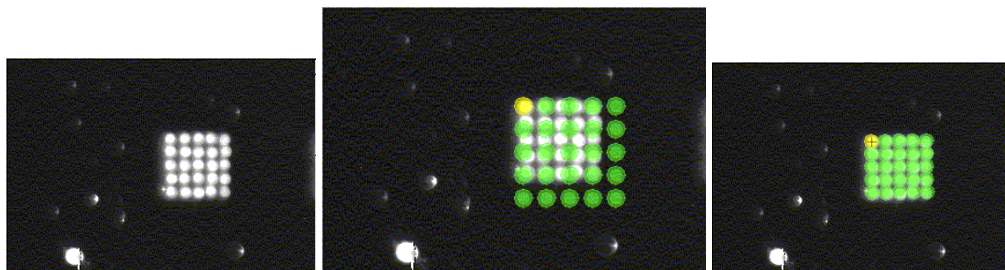


Fig. 7.2 – Aggiustamento automatico di una griglia di lettura

I saggi di espressione genica su microarray producono un'enorme quantità di dati che deve essere analizzata e trattata correttamente, per ottenere valori di espressione affidabili, essere in grado di

interpretarli ed infine poter ottenere informazioni preziose sul comportamento dei geni nelle cellule. Tutto questo al fine di comprendere il funzionamento degli organismi viventi e la genesi delle malattie.

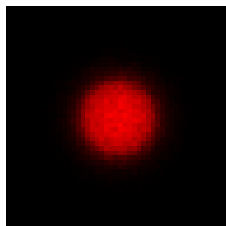


Fig. 7.3 – Simulazione con distribuzione normale standard ($\sigma=1.0$)

In ogni caso, la lettura delle immagini costituisce il primo passo del complicato processo di analisi che conduce ai risultati finali e fornisce i valori di espressione grezza, da normalizzare (rispetto a geni di controllo ad espressione nota) ed elaborare attraverso tecniche di clustering. I problemi che rimangono aperti riguardo la lettura delle immagini sono ancora molteplici, dal momento che comunque la notevole presenza di componenti di disturbo obbliga, già in questa prima fase, a cercare le geometrie di localizzazione degli spot e le statistiche di stima del rumore di fondo più adatte ad eliminare, quanto più possibile, ogni fonte di distorsione del segnale, evitando così di demandare la maggior parte del compito alla successiva fase di normalizzazione del dato. Un aiuto notevole potrebbe derivare dal simulatore di spot e dalla sua estensione alle funzioni di distribuzione di probabilità che meglio riproducono i disturbi che inficiano il pattern.

7.6 UN TOOL PER LA LETTURA DELLE IMMAGINI DI ESPRESSIONE DA MICROARRAY

Nel campo della genetica e della biologia molecolare, come già detto in precedenza, i saggi di espressione genica su microarray costituiscono un passo in avanti verso la comprensione del comportamento dei geni in un organismo vivente e della causa primaria delle malattie. Le sequenze geniche target, depositate sul microarray, reagiscono per ibridazione con gli RNA messaggeri estratti dalle popolazioni cellulari oggetto del saggio. Le sostanze fluorescenti che marcano gli mRNA sviluppano un insieme di spot di segnale che, letti da dispositivi di scansione, sono trasformati in immagine digitale. La lettura dell'immagine permette di estrarre il dato di espressione relativo ad ogni target del microarray. Mediante lettura attraverso griglie regolari di aree di interesse, per ogni target, si ottiene un dato grezzo di espressione ed una stima del rumore locale di fondo, per ogni banda dell'immagine.

Dall'immagine digitale, prodotto di un saggio di espressione su microarray, deve essere recuperato il pattern a spot di segnale, se si vuole associare, ad ogni cellula coinvolta nell'esperimento, il profilo di espressione dei target. Ancora come già detto in precedenza, la lettura dell'immagine consente di recuperare dati grezzi di espressione da sottoporre a normalizzazione rispetto a target noti. Dato il particolare pattern a spot di segnale, risulta immediato leggere i dati per mezzo di griglie regolari di aree di interesse, posizionate sull'immagine. Se la griglia segue il pattern, è possibile leggere un valore di integrazione delle intensità dei pixel, come dato grezzo di espressione, ed effettuare una stima del rumore di background locale allo spot (per ogni banda di segnale e, di conseguenza, per ogni popolazione cellulare). Un opportuno programma permette all'utente di effettuare il posizionamento semiautomatico delle griglie regolari, introdotte sopra, ed effettuare la lettura del pattern di espressione dell'immagine.

7.7 GRIGLIE DI LETTURA DEL PATTERN DI ESPRESSIONE

Una griglia di lettura delle immagini di espressione da microarray è, in sostanza, composta di aree di interesse disposte secondo uno schema a matrice. La loro regolarità ne semplifica notevolmente la definizione ed il posizionamento. Un'immagine può essere letta utilizzando più griglie indipendenti che, in seguito, sono riunite in un unico profilo di lettura. Ogni singolo elemento della griglia è composto di un'area di interesse del segnale di espressione ed un'area di stima del rumore di fondo locale allo spot.

I parametri geometrici definiscono una griglia di lettura indipendentemente dalla sua posizione sul sistema immagine e, più in dettaglio, sono il numero di elementi per riga e per colonna, lo spacing lungo le righe e lungo le colonne, la forma e la dimensione delle due aree di interesse componenti il generico elemento della griglia. La figura 7.4 fornisce un esempio di griglia di lettura in cui le aree di interesse hanno forma circolare: l'area di interesse del segnale di espressione è il cerchio interno, mentre l'area di stima del rumore locale è la corona circolare trasparente. Per ognuno dei target del pannello, si possono produrre dati grezzi di espressione in ognuna delle popolazioni cellulari coinvolte nell'esperimento.

Come già detto in precedenza, la posizione della griglia è data nel sistema immagine che ha il pixel (0,0) nell'angolo superiore sinistro, l'asse X lungo le righe verso destra e l'asse Y lungo le colonne verso il basso.

I parametri di posizione sono le coordinate (x,y) del centro dell'elemento in alto a sinistra e l'angolo di rotazione oraria a partire dalla posizione positiva dell'asse X . L'elemento attorno a cui la griglia ruota è l'ancora della griglia e può essere qualsiasi elemento di essa. La rotazione può avvenire rigidamente attorno all'ancora, o attorno alla colonna passante per l'ancora, o infine alla riga passante per l'ancora (fig. 7.5). Il posizionamento della griglia è compiuto seguendo una procedura semiautomatica consistente in un posizionamento manuale approssimato, sulla base della conoscenza del processo di acquisizione dell'immagine, e in un successivo raffinamento automatico, basato sul pattern di segnale mediante massimizzazione (o minimizzazione) di una misura di segnale, calcolata per la griglia intera. Il raffinamento automatico aggiorna progressivamente i parametri della griglia fino a raggiungere una situazione d'equilibrio permanente, cosicché la misura di segnale raggiunge il suo massimo (o minimo) valore. Più precisamente, il posizionamento automatico aggiorna, in una serie ordinata e predefinita, ogni grado di libertà della griglia: due traslazioni lungo gli assi X e Y , una rotazione, due espansioni, due contrazioni (fig. 7.6). Il gruppo di movimenti scelto (numero, tipo e ordine), la banda di segnale e la misura di segnale determinano la posizione finale di equilibrio della griglia. Il processo di aggiustamento per il generico movimento M induce la griglia a compiere un'oscillazione, limitata in un range R , attorno alla posizione corrente. Esisterà una posizione di massimo (o minimo) locale dalla quale ripartire con una nuova oscillazione dello stesso movimento, finché l'equilibrio permanente sarà stato raggiunto per il movimento M .

7.8 LETTURA DEL PATTERN DI ESPRESSIONE: SPOTVIEW

SpotView è un software che recupera i dati grezzi di espressione da un'immagine da microarray; esso è strutturato in tre sezioni di base: visualizzazione dei profili di segnale per facilitare il posizionamento manuale delle griglie, posizionamento semiautomatico delle griglie, lettura e registrazione dei dati. Una quarta sezione riguarda l'enhancement dell'immagine.

Il posizionamento semiautomatico si compone della fase manuale e della fase di aggiustamento della posizione. La prima fase è compiuta attraverso un wizard (fig. 7.8) che guida l'utente attraverso il

posizionamento del centro dell'elemento superiore sinistro della griglia (tramite semplice click del mouse nel punto desiderato), la definizione della forma e delle dimensioni delle aree di composizione degli elementi, la definizione del numero di colonne e righe, e del loro spacing. Ogni griglia aggiunta all'immagine è gestita attraverso un Grid Manager (fig. 7.10) che permette di impostare i colori degli elementi significativi delle griglie, muovere manualmente la griglia (traslazione lungo X e Y e rotazione), aggiustare automaticamente la posizione sulla base della banda di segnale e della sequenza dei gradi di libertà prescelti, rimuovere le griglie aggiunte, leggere il pattern di espressione per una banda di segnale, salvare i dati letti in formato importabile in database relazionali, salvare e ricaricare un profilo di lettura per una riletura del pattern.

Un profilo di lettura è una sequenza ordinata di griglie di lettura alle quali l'utente associa una precisa modalità di lettura. La modalità di lettura della generica griglia definisce l'ordine in cui gli elementi (o spot) devono essere presi e dipende dal verso secondo cui la griglia è scandita (ad esempio, prima da sinistra a destra e poi dall'alto verso il basso). Ogni elemento di una griglia del profilo ottiene un indice progressivo, necessario all'utente per collegare i dati salvati all'informazione contenuta in un eventuale database esterno. Un esempio di lettura di pattern è riportato nella tabella di figura 7.9.

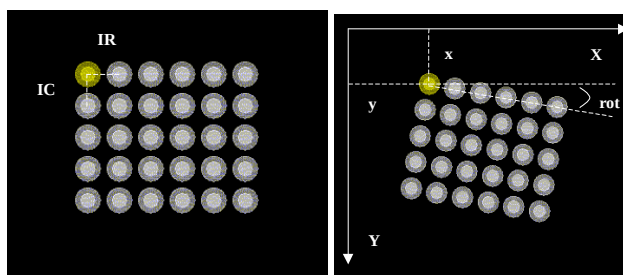


Fig. 7.4 – Griglia di lettura a elementi circolari utilizzata da SpotView.
I parametri di posizione sono sulla destra

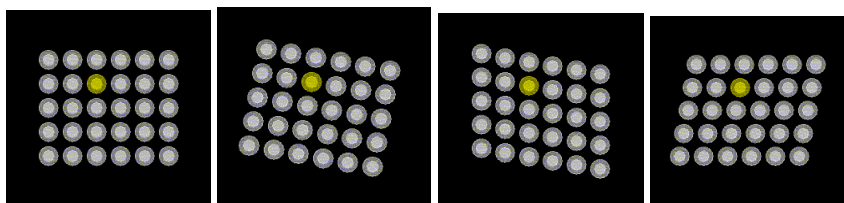


Fig. 7.5 – Modalità di rotazione di una griglia di lettura attorno all'elemento d'ancora

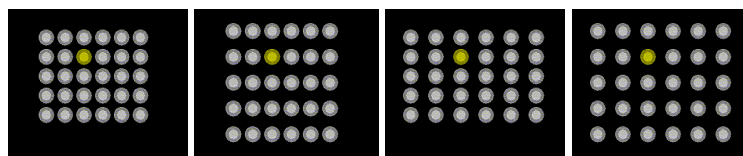


Fig. 7.6 – Espansioni (contrazioni) di una griglia: lungo le righe e lungo le colonne

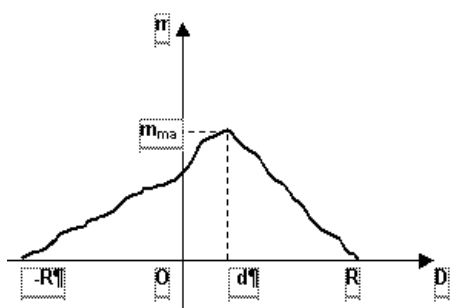


Fig. 7.7 – Diagramma della misura di segnale, associata all'intera griglia, in funzione dell'oscillazione del generico movimento nel range R attorno alla posizione corrente (origine O); l'asse X rappresenta la distanza D dell'oscillazione dalla posizione corrente; l'asse Y rappresenta la misura di segnale m per la griglia e per una banda dell'immagine; il valore m_{max} fornisce la distanza di oscillazione d alla quale aggiornare la posizione della griglia per il movimento

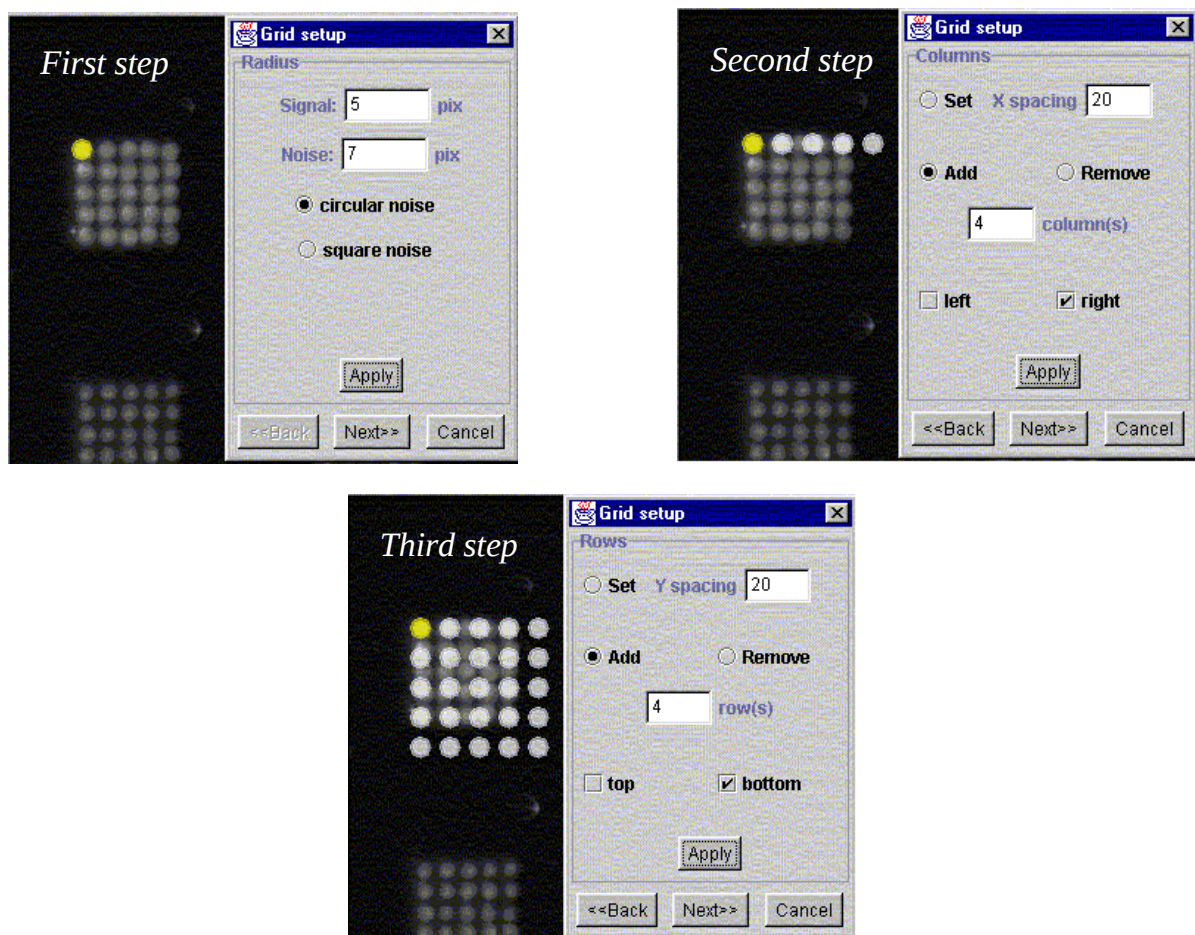


Fig. 7.8 – Aggiunta di una nuova griglia di lettura all'immagine

Indice dello spot	Valore nell'area segnale	di integrazione di interesse del	Stima del rumore di fondo	Dato grezzo di espressione	Saturazione
1	2102816		1369422	733394	0.0
2	1997968		1410170	587798	0.0
3	2047104		1367803	679301	0.0
4	2058272		1303617	754655	0.0
5	1828368		1245416	582952	0.0
6	2361712		1421119	940593	0.0
7	2238768		1475194	763574	0.0
8	2149344		1509081	640263	0.0
9	2148288		1345145	803143	0.0
10	1989664		1245416	744248	0.0
11	2212368		1485265	727103	0.0
12	2280880		1495336	785544	0.0
13	2289120		1510610	778510	0.0
14	2287472		1414497	872975	0.0
15	1965216		1309603	655613	0.0
16	2121440		1416890	704550	0.0
17	2278480		1428055	850425	0.0
18	2280704		1510610	770094	0.0
19	2352976		1414497	938479	0.0
20	2003424		1271489	731935	0.0

21	2169632	1416890	752742	0.0
22	2154320	1421276	733044	0.0
23	2203984	1461696	742288	0.0
24	2208288	1405037	803251	0.0
25	1669232	1271489	397743	0.0

Fig. 7.9 – Risultati ottenuti dalla lettura della griglia presentata nella figura 7.8. Il rumore di background è stimato come la mediana dei valori dello spot corrente e degli otto spot circostanti per eliminare l'effetto dovuto a spot vicini eccessivamente luminosi

La regolarità delle griglie di lettura rende semplice e immediata la loro definizione e il loro posizionamento. Inoltre esso fornisce statistiche per misurare l'affidabilità del singolo spot nel fornire dati di espressione. Infine il salvataggio dei dati, in formato importabile in database relazionali, consente la costruzione di un sistema di informazioni accessibili e riproducibili. Infatti il progresso di numerosi progetti di sequenziamento genomico ha condotto allo sviluppo di collezioni di dati riguardanti i differenti aspetti di un organismo vivente e contenenti specifici tipi di informazione (geni, proteine, strutture, cromosomi, malattie, etc.).

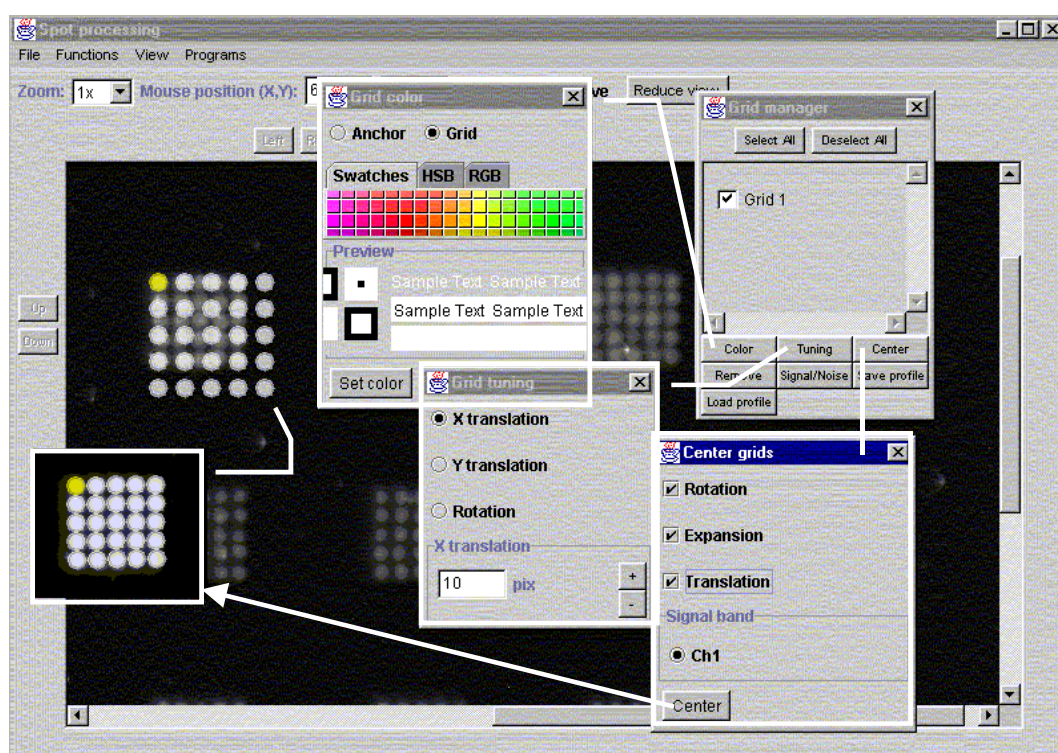


Fig. 7.10 – Funzioni offerte dal Grid Manager

7.9 L'INTEGRAZIONE DI BANCHE DATI GENOMICHE E PROTEICHE

La fondamentale proprietà delle banche genomiche è la possibilità di integrazione dell'informazione contenuta. Dati, provenienti da differenti banche, possono essere utilizzati per ottenere l'informazione completa dal gene alla struttura proteica; infatti unendo l'informazione da diverse sorgenti è possibile ricavare più facilmente dati di posizione di una particolare struttura genica all'interno di una mappa cromosomica, la struttura secondaria e terziaria della conseguente proteina ed inferire la sua funzionalità all'interno di un organismo.

Al momento attuale, sono reperibili diverse banche dati riguardanti i diversi aspetti di un organismo vivente. Ognuna di esse prende in esame uno specifico tipo di informazione (ad es., differenti zone di DNA, come

esoni e introni). Per alcuni geni, è anche possibile trovare informazioni sulla struttura tridimensionale della proteina codificata, definita per mezzo delle tre coordinate spaziali di ogni atomo del residuo amminoacidico. L'integrazione di banche dati genomiche e proteiche costituisce la base per produrre esempi sui quali compiere gli studi. Da queste per estrazione, si ottengono dati grezzi ed una stima del rumore locale da cui derivare informazioni su accuratezza, precisione ed affidabilità.

Le banche dati biologiche hanno lo scopo di fornire, accanto a dati di base (sequenza, organismo sorgente e referenze bibliografiche), annotazioni di livello superiore (funzione proteica e malattie correlate) ed avere una bassa ridondanza dell'informazione. Per mezzo della loro integrazione, sarebbe possibile portare a termine interrogazioni complesse.

- ❑ La banca dati EMBL (European Molecular Biology Laboratory), mantenuta e distribuita da EBI (European Bioinformatics Institute), è una banca di sequenze nucleotidiche;
- ❑ SWISS-PROT (Protein Sequence Database), prodotta e mantenuta da EBI e dal Dipartimento di Biochimica Medica dell'Università di Ginevra, è una banca di sequenze proteiche;
- ❑ PDB (Protein Data Bank) è un archivio di strutture tridimensionali, di macromolecole biologiche, sperimentalmente determinate, contenente coordinate atomiche, citazioni bibliografiche e strutture secondarie e terziarie, ed utile per la comunità globale di ricercatori, educatori e studenti.

L'oggetto principale di tali banche è un'entry (ovvero un indirizzo d'ingresso), univocamente identificata e consistente in linee di testo formattato, veicolo dei diversi tipi di informazione. L'analisi del testo dell'entry permette di estrarre i dati e di trasformare l'informazione testuale in formato importabile in un modello di database relazionale.

7.10 BANCA DATI EMBL

La banca dati EMBL è la risorsa primaria di sequenze nucleotidiche in Europa ed è prodotta in collaborazione con GenBank (USA) e DDBJ (DNA Database of Japan). Ogni entry EMBL rappresenta una singola e contigua sequenza nucleotidica pubblicata, oppure una singola sequenza nucleotidica derivata da differenti pubblicazioni che riportano sequenze sovrapponibili. La sequenza di entry contiene i geni. Le entry sono raggruppate in 17 divisioni di organismo, basate sulla tassonomia. Ognuna di esse è composta di linee di testo il cui tipo di informazione è specificato da un codice, a due lettere, presente nelle due colonne iniziali. Ad esempio, ID è per il nome dell'entry alla prima linea di testo, AC per la lista degli accession number, OS per la specie dell'organismo da cui la sequenza proviene, RA per gli autori di riferimento.

I codici che iniziano con una R indicano un reference block che consente l'accesso alle pubblicazioni relative alla sequenza. Il riferimento ad altri database è garantito dalle linee con codice DR. A volte, è necessario cambiare l'ID di un'entry attraverso successive versioni al fine di mantenere identificazioni simili per sequenze correlate. Questo fa in modo che il codice ID non sia in grado di identificare, senza ambiguità, una particolare sequenza e, per tale ragione, la sequenza è caratterizzata da un accession – number primario che permette di ottenere la stessa sequenza, in differenti versioni, e da uno o più accession – number secondari, se la sequenza deriva dallo splitting di una singola entry o dal merging di più entry.

La sequenza nucleotidica è riportata nel blocco di linee di testo con due spazi bianchi nelle due colonne iniziali. Ogni linea è formattata in righe di 60 basi suddivise in gruppi di 10, separati da uno spazio. La

Feature Table è il nucleo dell'informazione di un'entry (linee di testo con codice FT). Infatti il blocco FT riporta i segnali della sequenza che sono necessari per comprendere la struttura e la funzione di un organismo, quali CDS (sequenza codificante del gene contenuto), mRNA (RNA messaggero) e relativa traduzione in proteina.

7.11 BANCHE DATI SWISS-PROT E PDB

SWISS-PROT è una collezione di sequenze proteiche e si riferenzia ad altre 30 banche dati di sequenze genomiche. Ogni entry rappresenta una singola sequenza proteica pubblicata, oppure una singola sequenza derivata da differenti pubblicazioni che riportano sequenze sovrapponibili. Per propositi di standardizzazione, il formato di SWISS-PROT è simile a quello di EMBL (linee di testo con un codice a due lettere indicante il tipo di informazione riportata). Un'entry è identificata, al pari di EMBL, tramite le linee ID e AC, ed è composta di due sezioni principali, ossia i dati (sequenza proteica, riferimenti bibliografici e dati tassonomici) e le annotazioni (funzione proteica, similarità con altre proteine e malattie associate). La sequenza proteica è riportata nel blocco di linee di testo con due spazi bianchi nelle due colonne iniziali. Ogni linea è formattata in righe di 60 basi suddivise in gruppi di 10, separati da uno spazio.

PDB è un archivio di strutture tridimensionali di proteine. Ogni entry è composta di linee di testo di 80 colonne strettamente formattate e denominate tramite il record name contenuto nelle prime 6. Una o più linee con lo stesso nome compongono un record type. Un record type fornisce lo stesso tipo di informazione. Ogni record è suddiviso in campi. Il record di nome HEADER riporta nell'ordine la classificazione della molecola, la data di deposizione ed un identificatore univoco all'interno di PDB. I record possono essere raggruppati in sezioni. La più importante, per lo scopo di questa pubblicazione, è la Coordinate Section contenente le coordinate atomiche tridimensionali di un'entry PDB.

7.12 INTEGRAZIONE DELLE BANCHE DATI GENOMICHE

Dal momento che ogni banca dati contiene aspetti specifici di geni e di proteine, una loro integrazione diventa necessaria, per coprire l'intero processo dal gene, come DNA nucleico, alla proteina strutturata. Da un'entry EMBL, è possibile estrarre il dato sull'mRNA (RNA messaggero) e sulla sequenza codificante (CDS), del gene contenuto, seguendo l'operatore di costruzione, definito nel blocco FT, che individua la lista di tratti, sulla sequenza nucleotidica di entry (esoni), da unire e il loro modo di unione. Inoltre è possibile estrarre il dato sul codon start, ossia la posizione, sulla sequenza del CDS, della prima base del codone iniziale (tripletta di basi traducibile in amminoacido secondo il codice genetico) dalla quale partire per la traduzione del CDS in proteina.

Il primo passo è un matching tra la sequenza del CDS con la sequenza dell'mRNA per ottenere una matching – region per la coppia CDS–mRNA. Il secondo passo è l'allineamento tra la sequenza proteica, così come è derivata dal blocco FT e la traduzione in proteina del CDS, a partire dal codon start fornito da EMBL. Se il matching non è perfetto, il codon start è spostato di una base lungo la sequenza del CDS ed un nuovo tentativo è compiuto con la nuova traduzione che ne deriva (figura 7.11).

La principale informazione che si può ricavare, da quanto sopra, è la statistica sulla generazione di amminoacidi dai codoni, ovvero quali sono le frequenze dei codoni che generano un particolare amminoacido, oltre ad ottenere un valore aggiornato del codon start, una sequenza tradotta aggiornata nel

caso si sia aggiunto il codone “aug” (corrispondente all’amminoacido Metionina, inizio di ogni proteina) alla sequenza proteica fornita da EMBL, la sequenza del codone finale, se questo esiste, infine una dettagliata descrizione di ogni codone e dell’amminoacido corrispondente attraverso la posizione sulla sequenza tradotta, la sequenza del codone e la posizione del codone da marker predefiniti.

L’effettiva fase di integrazione delle tre banche dati consiste nel collegamento di EMBL a SWISS-PROT e PDB attraverso programmi di omologia tra le sequenze proteiche dei CDS, estratti da EMBL, quelle di SWISS-PROT e di PDB. Dopodiché si ottiene quali sono le sequenze PDB e SWISS-PROT che, con una certa probabilità, corrispondono ai geni EMBL e, di conseguenza, si ricavano le fondamentali strutture tridimensionali delle proteine codificate dai geni pubblicati in EMBL.

La richiesta di accessibilità delle banche dati genomiche, in qualsiasi ambiente operativo, e di leggibilità delle stesse, da parte dell’utente umano, ha condotto a organizzare l’informazione raccolta come semplice flat file. Ogni utente può sviluppare programmi ad hoc per analizzare il file ed adattarlo ai suoi particolari bisogni. Pertanto le banche dati genomiche possono essere usate globalmente, al fine di sviluppare sofisticate ricerche che diano una più completa descrizione del gene e del suo funzionamento.

La moderna tecnologia permette di studiare il comportamento di un elevato numero di geni nell’ambito di una o più popolazioni cellulari. Programmi, sviluppati allo scopo, utilizzano banche dati dedicate per l’elaborazione e l’analisi dei dati. A tale scopo, l’integrazione di banche dati di diversa natura si rende necessaria, tenuto anche conto che, nel campo della genetica e della biologia molecolare, i dati di espressione genica costituiscono una conoscenza fondamentale per la comprensione del comportamento dei geni, in un organismo vivente, e della causa primaria delle malattie.

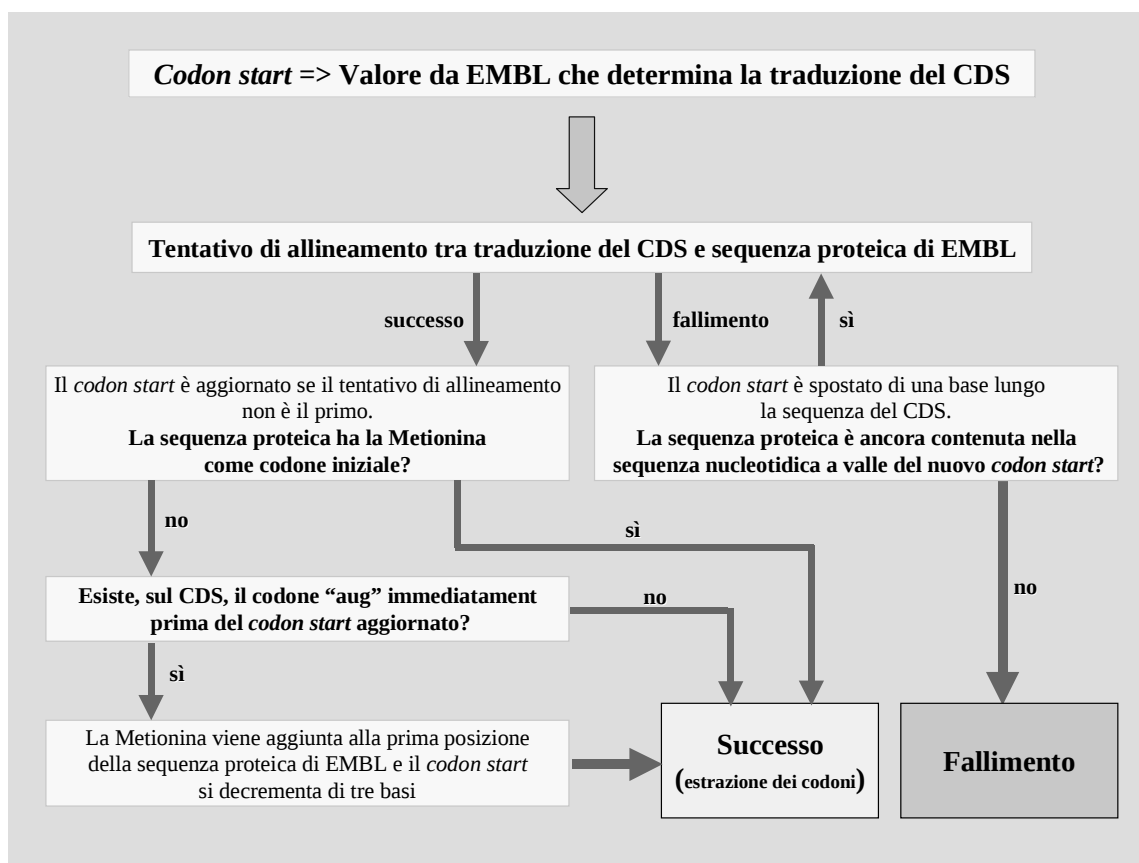


Fig. 7.11 – Allineamento tra sequenza nucleotidica e amminoacidica di un CDS in EMBL

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO¹⁸

GPS e fotogrammetria

Pinto L. (1992): Cycle Slips and Problems in Aerial GPS. In: G. Manzoni (Ed), Proc. of 3rd Geodetic Meeting Italy-Poland, GPS - Global Positioning System in Civil Engineering, University of Trieste, Trieste, p. 296-314.

Forlani G., Pinto L. (1994): Experiences of Combined Block Adjustment with GPS Data. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 30, part. 3/1, p. 219-226.

¹⁸ Il presente lavoro è debitore nei confronti di una lunga serie di articoli, dell'autore e di alcuni suoi amici e colleghi, di cui si dà elenco e ragione, nel prosieguo:

- ❑ Malinverni E.S., Mussio L. (2001): Una sperimentazione cad per la gestione e l'analisi di elementi territoriali. Atti della Conferenza *La qualità nell'Informazione Geografica* - 5° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Rimini, p.1009-1014.
- ❑ Rizzi R., Milanese L., Mussio L. (2001a): Un tool per la lettura delle immagini di espressione da microarray. Atti della Conferenza *La qualità nell'Informazione Geografica* - 5° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Rimini, p.1285-1290.
- ❑ Rizzi R., Milanese L., Mussio L. (2001b): Pre-processamento di dati di espressione da microarray. Atti della Conferenza *La qualità nell'Informazione Geografica* - 5° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Rimini, p.1291-1296.
- ❑ Bellone T., Bucciarelli B., Lattanzi M., Mussio L., Vecchiato A. (2002): GAIA: astronomia globale al microarcosecondo per lo studio della via lattea. Atti della Conferenza *Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale* - 6° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 1. Perugia, p. 379-384.
- ❑ Colombo A., Gianinetto M., Mussio L. (2002): Analisi multivariata di training e testing set per la corretta classificazione di immagini. Atti della Conferenza *Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale* - 6° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 1. Perugia, p. 861-866.
- ❑ Crippa B., Malinverni E.S., Mussio L. (2002): Forme di modellazione digitale. In: M. Manganaro (Ed) *QUADRATO*, n. 1. SICANIA, Messina, p. 9 – 20.
- ❑ Mussio L., Bassi P., Mignosa P., Novati D. (2002a): La funzione di probabilità composta di due variabili estreme: un caso di studio. Atti della Conferenza *Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale* - 6° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Perugia, p. 1619-1624.
- ❑ Mussio L., Bassi P., Mignosa P., Novati D. (2002b): La correlazione fra fenomeni estremi: un caso di studio. Atti della Conferenza *Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale* - 6° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Perugia, p. 1625-1630.
- ❑ Rizzi R., Milanese L., Mussio L. (2002): L'integrazione di banche dati genomiche proteiche. Atti della Conferenza *Geomatica per l'ambiente, il territorio e il patrimonio culturale* - 6° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Perugia, p. 1803-1808.
- ❑ Giacobbe L., Mussio L. (2003): Il rilevamento nell'Ingegneria civile ed ruolo dell'intesa Stato – Regioni- Enti Locali. *Boll. della SIFET*, n. 3, 2003.
- ❑ Mussio L., Vaghi E. (2003): Interpolazione di punti con curve atrati di natura differente: applicazinealla ricostruzione dei tracciati viari. Atti della Conferenza *L'Informazione Territoriale e la dimensione tempo* - 7° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Verona, p. 1495-1500.
- ❑ Venturini L., Mussio L. (2003): Rilievo profilometrico di dettaglio della testata 36R dell'aeroporto di Milano-Linate. Atti della Conferenza *L'Informazione Territoriale e la dimensione tempo* - 7° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Verona, p. 1841-1846.
- ❑ Fava G., Mussio L., Saeki M. (2004): Applicazioni geofisiche dell'analisi autoregressiva di serie temporali. Atti della Conferenza *Standardizzazione, Interoperabilità e Nuove Tecnologie* – 8° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Roma, p. 1041-1046.
- ❑ Fava G., Mussio L., Paolucci R. (2004): Applicazione di tecniche spettrali per la valutazione della sicurezza strutturale. Atti della Conferenza *Standardizzazione, Interoperabilità e Nuove Tecnologie* – 8° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Roma, p. 1047-1052.
- ❑ Minaudo I., Mussio L. (2004): Indagini per la raccolta di dati geografici e cartografici per un SIT dedicato alla conservazione e valorizzazione del paesaggio delle saline di Trapani e Marsala. Atti della Conferenza *Standardizzazione, Interoperabilità e Nuove Tecnologie* – 8° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Roma, p. 1469-1474.
- ❑ Venturini L., Mussio L. (2004): Verifica in sito di una rete affidabile progettata per il rilievo di pavimentazioni aeroportuali. Atti della Conferenza *Standardizzazione, Interoperabilità e Nuove Tecnologie* – 8° Conferenza Nazionale dell'ASITA, vol. 2. Roma, p. 1917-1922.
- ❑ Barrile V., Mussio L. (2005): Georeferenziazione ed analisi dei dati. *Rivista dell'agenzia del Territorio*, anno V, n. 3, 2005.
- ❑ Agutoli M., Bianchini P., Crispino M., De Marco S., Mussio L. (2006): Determinazione del Pavement Classification Number (PCN) mediante interpolazione adattativa. Atti della 10° Conferenza Nazionale dell'ASITA, Bolzano, n. 063 p. 8.
- ❑ Mussio L. (2006): Possibilità offerte dai metodi statistici applicati alle informazioni geografiche. In: P.L. Paolillo (Ed) *Questioni ambientali nella gestione del territorio: strumenti e casi di studio nel territorio cremonese*. Politecnico di Milano / Regione Lombardia, Cremona, S1_10 p. 8.
- ❑ Fiori F., Crispino M., Marforio E., Mussio L. (2007): Analisi di varianza a tre vie per la classificazione di prove in situ su materiali da costruzione stradale. Atti della 11° Conferenza Nazionale dell'ASITA, Torino, n. p. .

Brovelli M.A., Crippa B., Migliaccio F. (1996): Join adjustment of image coordinates and slant distances. In: Unguendoli (Ed), Reports on Surveying and Geodesy, Nautilus, Bologna, p. 192-203.

Forlani G, Pinto L., Scaioni M. (2000): Concept and testing of an automatic system for aerial triangulation. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 33, part. B2, p. 486-493.

Forlani G., Pinto L. (2001): Integrated INS/DGPS systems: calibration and combined block adjustment. In: OEEPE Official Publication, n. 43, p. 85-96.

Barzaghi R., Borghi A., Crippa B., Crosetto M., Pinto L., Tornatore V. (2002): Deformation monitoring using GPS and SAR. In: Ricerche di Geodesia, Topografia e Fotogrammetria, DIIAR, Politecnico di Milano, Milano, n. 13, p. 35-42.

Forlani G., Pinto L. (2002): A single step calibration procedure for IMU/GPS in aerial photogrammetry. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 34/3, part. B, p. 210-213.

Casella V., Franzini M., Forlani G., Galetto R., Manzino A., Radicioni F., Sona G., Villa B., (2004): Initial results of the Italian project on direct georeferencing in aerial. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 35, part. B3, p. 881-886.

Forlani F., Pinto L., Passoni D. (2004): Calibration procedures for integrated IMU/GPS systems in aerial photogrammetry. In: E. Baltsavias (Ed), Commemorative volume for the 60th birthday of prof. Dr. Armin Gruen. IGP - ETH, Swiss federal Institute of Technology. Zurich, p. 89-95.

Forlani G., Pinto L., Passoni D. (2004): Experimental Tests on the Benefits of a More Rigorous Model in IMU/GPS System Calibration. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 35, part. B1, p. 518-523.

Forlani G., Roncella R. (2004): Semi-automatic geo-referencing images in mobile mapping. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 35, part. B5, p. 803-808.

SPOT ¹⁹

De Haan A., Togliatti G. (1990): Triangulation with SPOT Data at the Politecnico di Milano. In: Festschrift Gottfried Konecny zum 60. Geburtstag. Inst. fuer Photogrammetrie und Ingenieurvermessung – Universitaet Hannover, p. 131-140.

De Haan A. (1991a): Geometry Aspects of SPOT Imagery. Boll di Geodesia e Scienze Affini, vol. 50, n. 1.

De Haan A. (1991b): A Mathematical Model for Bundle Adjustment with SPOT Data. Boll. di Geodesia e Scienze Affini, vol. 50, n. 4.

De Haan A. (1991c): Contribution of the Politecnico di Milano to the OEEPE Test on Triangulation with SPOT Data. In: I.J. Dowman (Ed), Test of Triangulation of SPOT Data, OEEPE, n. 26, p. 93-109.

Crippa B., De Haan A., Mussio L. (1992): The Creation of a DEM from SPOT Data. In: Proc. of the Satellite Symp. no. 2 Image Processing, GIS and Space-assisted Mapping, European Int. Space Year Conference 1992, Munich, p. 433-438.

De Haan A. (1992): An Analysis of Precision of the DEM Obtained from SPOT Data. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 29, part. B4, p. 440-447.

SAR Interferometrico

Crosetto M., Mròz M. (1997): Use of DEM Derived from Radar Images for Geocoding of Radar and Optical Imagery Applied to Land Use Classification. Reports on Geodesy, n. 5 (28), Warsaw University of Technology, Warsaw (Poland), p. 287-296.

¹⁹ Lo SPOT, come il SAR interferometrico ed il LIDAR costituiscono temi, originali ed innovativi, nell'ambito dell'elaborazione d'immagini e pertanto presentati a parte, rispetto ad altri argomenti (più classici, benché tuttora modernissimi) della fotogrammetria. Resta comunque l'unicità di un tema specifico, relativo all'acquisizione, elaborazione ed archiviazione di informazioni, metriche e tematiche, per mezzo di immagini qualsiasi, all'interno della loro attuale galassia.

- Crippa B., Crosetto M. (1998): Optical and Radar Data Fusion for DEM Generation. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, part. 4, p. 128-134.
- Crippa B., Crosetto M., Mussio L. (1998): The Use of Interferometric SAR for Surface Reconstruction. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, part. 1, p. 172-177.
- Crosetto M. (1998): Fusion of Optical and Radar Data for Terrain Surface Reconstruction. In: *Proc. of the Conference on SAR Image Analysis, Modelling, and Techniques III*. Barcelona. EUROPTO Series, p. 186-197.
- Crosetto M., Mróz M. (1998): Optical-Radar Data Fusion for Land Use Classification. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, part. 7, p. 698-705.
- Crosetto M., Pérez Aragues F. (1999): Radargrammetry and SAR Interferometry for DEM Generation: Validation and Data Fusion. *SAR Workshop, Toulouse (France), ESA, SP-450*, p. 367-372.
- Crosetto M., Crippa B. (1999): SAR Interferometry Calibration. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, part. 6W7, p. 193-201.
- Crosetto M., Crippa B. (2000): Quality Assessment of Interferometric SAR DEMs. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33, part. B1, p. 46-53.
- Crippa B., Crosetto M., Ruiz J. A. M. (2001): Uncertainty Propagation in Model Driven by Remote Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 76, part. 3, p. 373-385.
- Crippa B., Crosetto M., Barzaghi R., Agudo M., (2002): Modelling and analysis tools for interferometric SAR observations. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 34, part. 2, p. 67-73.
- Crosetto M., Crippa B., Barzaghi R., Blazquez M. (2002): Differential SAR interferometry for deformation control. In: *Proc. of V Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy 10 – 14 June, Matera*, p. 333-338.
- Mussio L. (2002): Georeferencing and integration of digital images from space with remote sensed data from active sensors and geopotential observations. In: *Ricerche di Geodesia, Topografia e Fotogrammetria, DIIAR. Politecnico di Milano, Milano*, n. 13, p. 129-136.

Fotogrammetria Digitale

- Crippa B., Forlani G., De Haan A. (1993): Automatic Deformation Measurement from Digital Images. In: *Optical 3-D Measurement Techniques II*, A. Gruen, H. Kahmen (Ed's), Wichman Verlag, Karlsruhe (Germany): p. 557-563.
- Forlani G., Sansò F., Tarantola S. (1994): Digital Photogrammetry: Experiments with the Continuous Approach. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 30, part. 1, p. 229-236.
- Forlani G., Sansò F. (1995): Continuous Digital Photogrammetry. In: *Digital Sensors and Systems*, B. Benciolini, D. Sguerso (Ed's), University of Trento, Trento, p. 331-345.
- Bellone T., Crippa B., Mussio L. (1996a): A Recommended Procedure for Image Quality Assessment. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 30, part. 1 bis, p. 220-224.
- Bellone T., Crippa B., Mussio L. (1996b): Restoration and Validation of Image Data. In: *Data Acquisition and Analysis for Multimedia GIS, CISM - Udine, Courses and Lectures - n. 365*, L. Mussio, G. Forlani, F. Crosilla (Ed's), Springer, Wien New York, p. 161-185.
- Bellone T., Mussio L., Nardinocchi C. (1996a): Data Archiving by Clusters and Graphs. In: *Data Acquisition and Analysis for Multimedia GIS, CISM - Udine, Courses and Lectures - n. 365*, L. Mussio, G. Forlani, F. Crosilla (Ed's), Springer, Wien New York, p. 99-106.
- Bellone T., Mussio L., Nardinocchi C. (1996b): Strategies and Procedures for Relational Matching. In: *Reports on Surveying and Geodesy*, M. Unguendoli (Ed), Nautilus, Bologna, p. 122-135.

- Forlani G., Guzzetti F., Pinto L. (1996): Surface Reconstruction of CFER Panels. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 31 part. 5, p. 209-214.
- Forlani G., Malinverni E. S. (1996): DEM and Orthophoto Generation in Close Range. In: L. Mussio, G. Forlani, F. Crosilla (Ed's), *Data Acquisition and Analysis for Multimedia GIS*, CISM - Udine, Courses and Lectures - n. 365, Springer, Wien New York, p. 207-222.
- Forlani G., Malinverni E.S., Nardinocchi C. (1996): Road Recognition Using Perceptual Grouping. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 31 part. 3, p. 202-206.
- Forlani G., Malinverni E.S., Pinto L. (1996): A Digital Approach to the Photogrammetric Survey by Réseau Cameras. In: M. Unguendoli (Ed), *Reports on Surveying and Geodesy*, Nautilus, Bologna, p. 355-366.
- Forlani G., Pinto L., Trebeschi A. (1997): Measuring Ground Control Points by L.S. Matching. In: A. Binaghi, A. Brivio, A. Rampini (Ed's), *Soft Computing in Remote Sensing Data Analysis*, Series in Remote Sensing, vol. 1, World Scientific, Singapore, p. 223-233.
- Malinverni E.S. (1997): Surface Reconstruction and Orthoimage Production by Multi-image Matching. *Reports on Geodesy*, n. 5 (28), Warsaw University of Technology, Warsaw (Poland), p. 147-156.
- Forlani G., Nardinocchi C., Rizzi R. (1998): 3D-Matching of Linear Features. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, part. 6W4, p. 169-174.
- Forlani G., Pinto L., Scaioni M. (1999): A Procedure for Automatic Interior Orientation. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, part. 3-2W5, p. 131-135.
- Forlani G, Pinto L., Scaioni M. (2000): Concept and Testing of an Automatic System for Aerial Triangulation. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33, part. B2, p. 486-493.
- Forlani G., Scaioni M., (2002): A solution for image orientation of close range blocks. *Int.: Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 34, part. 5, p. 453-458.
- Forlani G., Roncella R.(2003): Image-to-image perspective rectification. *Int.: Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 34, part. 5/W12, p. 289-293.
- Pozzoli A., Mussio L. (2003a): Quick Solutions Particularly in Close – range Photogrammetry. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 33, part. 5W12, p. 273-278.
- Pozzoli A., Mussio L. (2003b): Non-linear Problems of Analytical Photogrammetry. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 34, part. 6W11, p. 210-215.
- Pozzoli A., Mussio L., Scaioni M. (2004a): A Solution for the General Case of Three-image Orientation. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 35, part. B3, p. 992-997.
- Pozzoli A., Mussio L., Scaioni M. (2004b): A Project for the Survey of a Hydraulic Stream Confluence Model Based on a General Procedure for Three-image Orientation. In: E. Baltsavias (Ed) *Commemorative volume for the 60th birthday of Prof. Dr. Armin Gruen*. IGP - ETH, Swiss federal Institute of Technology. Zurich, p. 201-208.

LIDAR

- Forlani G., Nardinocchi C. (2001): Detection and segmentation of buildings roofs in LIDAR images. In: A. Vettore (Ed) *3D Digital Imaging and Modeling Applications of: Heritage, Industry, Medicine & Land*. Padua.
- Forlani G., Nardinocchi C. (2001): Building detection and roof extraction in laser scanning data. In: A. Gruen, E. Baltsavias, L. Van Gool (Ed's) *Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images*, Balkema, Lisse (The Netherlands), p. 319-330.
- Forlani G., Nardinocchi C., Scaioni M. (2001): Building extraction from LIDAR data. In: *IEEE/ISPRS Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, p. 79-84.
- Forlani G., Scaioni M. (2003): Independent model triangulation of terrestrial laser scanner data. *Int.: Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 34, part. 5/W12, p. 308-313.

Forlani G., Nardinocchi C., Scaioni M., Zingaretti P., (2003): Building reconstruction and visualization from LIDAR data. Int.: Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 34, part. 5/W12, p.151-156.

Forlani G., Nardinocchi C., Zingaretti P. (2003): Classification and Filtering of laser data. Int.: Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 34, part. 3/W13, p. 79-86.

DEM e GIS

Crippa B., Maas H.G., Mussio L. (1992): Spatial Analysis of Turbulent Flow Fields by Deterministic and Stochastic Approaches. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 29, part. B5, p. 380-390.

Crippa B., Forlani G., Mussio L (1993): Digital Elevation Model of the Torre del Sale (Piombino) Thermal Power Plant area. In: EGIS 93, vol. 1, p. 246-254.

Crippa B., Mussio L., Sharif O. (1994): The Torre del Sale (Piombino) DEM and its Contribution to an Environmental Monitoring Oriented GIS. In: G. Guariso e B. Page (Ed's), Computer Support for Environmental Impact Assessment, North Holland, Amsterdam (Netherlands), p. 13-24.

Crippa B., Malinverni E.S., Mussio L. (1995): Dynamic Modelling of Scene Deformation for Crustal Movement Monitoring. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 30, part. 5W1, p. 138-143.

Crippa B., Malinverni E.S., Tucci G. (1998): Complex Surface Representation. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 6W4, p. 125-133.

Broglia P., Malinverni E.S., Mussio L. (1999): Validation of an Ancient Perspective in Lecco (Italy). Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 6W7, p. 120-124.

Broglia P., Malinverni E.S., Mussio L. (2000a): Comparison between a Camera Lucida Panorama and a Photogrammetric Survey. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 6W8/1, p. 16-19.

Broglia P., Malinverni E.S., Mussio L. (2000b): A Discussion about the Comparison between a Camera Lucida Panorama and a Photogrammetric Survey. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 6W8/2, p. 237-238.

Forlani G., Pinto L. (2000): Monitoring marble extraction in open cast quarries. Int Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 33, part. B4/1, p. 283-289.

Malinverni E.S., Tonelli E.P. (2000): Thematic Maps by Photogrammetric Techniques on Satellite Images. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 33, part. B4/2, p. 610-615.

Crippa B., Crosetto M., Barzaghi R. (2002): Quantitative subsidence monitoring using SAR interferometry. In: Proc. of IGARRS 2002, Toronto.

Crippa B., Crosetto M., Tscherning, Castillio M. (2002): Subsidence monitoring using SAR interferometry: Reduction of atmospheric effects using stochastic filtering. Geophysical Research Letters, vol. 29, n. 9.

Agudo M., Biescas E., Crippa B., Crosetto M. (2003): DEM generation and deformation control using satellite SAR interferometry. In: Proc. of SPIE 10th International Symposium on Remote Sensing, Barcelona.

Biescas E., Crippa B., Crosetto M., Fernández I., Torrobella I. (2003): Deformation control using SAR interferometry: quantitative aspects. In: Proc. of Fringe 2003, Frascati.

Agudo M., Biescas E., Crippa B., Crosetto M., (2004): Land subsidence monitoring with ERS and Envisat SAR interferometric data. In: Proc. of 24th Symposium for the EARSeL, Dubrovnik.

Conforti Andreoni D., Pinto L. (2004): The creation of the digital models for the protection of cultural heritage: the Baptistery of Cremona. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 35, part. B5, p. 489-493.

Ferrero A.M., Forlani G., Voyat I.H., (2004): Rock slope stability analysis based on photogrammetric surveys. In: Proc. of IX Int. Symposium on Landslides, Rio de Janeiro.

Forlani G., Roncella R., Scaioni M., (2004): Application of digital photogrammetry in geotechnics. Int Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 35, part. B5, p. 93-98.

Pozzoli A., Mussio L. (2004): Modelling Techniques for Temporal GIS. In: E. Fendel, M. Rumor (Ed's) Proc. of UDMS'04 – 24th Urban Data Management Symposium, Chioggia, 7.II.2.

Mussio L., Poli D., Pozzoli A. (2005): Symmetries and Topology for the Definition of Conceptual Models. In: A. Vettore (Ed) 3D Digital Imaging and Modeling Applications of: Heritage, Industry, Medicine & Land. AGRIPOLIS, Padua, S1_8 p. 8.

Pozzoli A., Mussio L. (2006): New Tools for Spatial – Temporal Database. In: E. Fendel, M. Rumor (Ed's) Proc. of UDMS'06 – 25th Urban Data Management Symposium. Aalborg, 9.I.3.

Monitoiraggio di deformazioni

Cunietti M., Fangi G., Mussio L., Radicioni F. (1984): Block Adjustment and Digital Model of Photogrammetric Data in a Control Problem for the Ancona '82 Landslide. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXV, parte A3a/b, p. 792-802.

Cunietti M., Mussio L. (1984): High Precision Photogrammetry. In: M. Unguendoli (Ed), High Precision Geodetic Measurements, CUSL, Bologna, p. 329-360.

Colombo L., Fangi G., Mussio L., Radicioni F. (1986): Further Development on Digital Models in a Control Problem for the Ancona '82 Landslide. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXVI, parte 3.1, p. 134-147.

Migliacci A., Mirabella Roberti G., Monti C., Mussio L. (1986): Monitoring of Historical Wall Painting. Proc. of the IABSE Symp. Safety and Quality Assurance of Civil Engineering Structures, Tokyo, p. 283-291.

Mussio L., Radicioni F. (1986): High Precision Photogrammetric Measurements to Control the Shape of a Section of the Musone river. In: M. Unguendoli (Ed): Modern Trends in Deformations Measurements, CUSL, Bologna, p. 143-163.

Colombo L., Fangi G., Mussio L., Radicioni F. (1987): Kinematic Processing and Spatial Analysis of Leveling Control Data of the Ancona '82 Landslide. In: H. Pelzer e W. Niemeier (Ed's), Determination of Heights and Height Changes, Duemmler Verlag, Bonn, p. 703-719.

Crespi M., Crippa B., Mussio L. (1990): Integrated Approach to Kinematic Adjustment and Spatial Analysis of Leveling Control Data of the Ancona 82 Landslide. In: P. Vyskocil, C. Reigber e P.A. Cross (Ed's), Global and Regional Geodynamics, Springer-Verlag, New York, p. 311-318.

Trattamento delle Osservazioni²⁰

Barzaghi R., Benciolini B., Betti B., Forlani G., Mussio L., Sansò F. (1990): A Numerical Experiment of Integrated Geodesy. Bulletin Géodésique, vol. 64, n. 3.

Bucciarelli B., Forlani G., Mussio L. (1992): Robust Estimation by Using Linear Sequential Algebra. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 29, part. B2, p. 328-333.

Bellone T., Crippa B., Mussio L. (1994): Mathematical Treatment of Raster Data and Grid Parameters. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 30, part. 1, p. 224-228.

Crippa B., Mussio L., Zacco G. (1994): Data Understanding by Form Descriptors on the Way of Compression. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 30, part. 1, p. 209-216.

Mussio L., Crippa B., Sharif O. (1994): Distribution-free Inference for Standard Tests. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 30, part. 1, p. 217-223.

²⁰ Anche in questo caso, il Trattamento delle Osservazioni è distinto e separato da un argomento come Dalla Linguistica alla Geomatica che invece dovrebbe essere strattamente collegato, trattando la misura delle qualità con l'elaborazione delle tradizionali osservazioni quantitative. Tuttavia anche per garantire una omogeneità dell'informazione bibliografica fornita, si è preferito limitare il primo argomento solo all'analisi dei dati ed alla statistica computazionale (presentando a parte quanto concerne invece il secondo argomento).

Bellone T., Crespi M., Mussio L. (1995): Preprocessing and Beyond by Kalman Filtering Techniques. In: B. Benciolini e D. Sguerso (Ed's), Digital Sensors and Systems, University of Trento, Trento, p. 23-33.

Crippa B., Mussio L. (1995): Data Compression and Evaluation by Cluster Analysis. In: B. Benciolini e D. Sguerso (Ed's), Digital Sensors and Systems, University of Trento, Trento, p. 347-359.

Bellone T., Crippa B., Mussio L. (1996a): Robust Procedures for Data Pre-Processing, Testing and Archiving. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 31, part. B1, p. 144-149.

Bellone T., Crippa B., Mussio L. (1996b): Sequential Algorithms and Iterative Methods with Special Emphasis to Spatially Referenced Data Analysis. In: A. Binaghi, A. Brivio, A. Rampini (Ed's), Soft Computing in Remote Sensing Data Analysis, Series in Remote Sensing, vol. 1, World Scientific, Singapore, p. 245-252.

Brovelli M.A., Migliaccio F., Mussio L., Sharif O. (1996): Robust Techniques for Data. In: L. Mussio, G. Forlani, F. Crosilla (Ed's), Data Acquisition and Analysis for Multimedia GIS, CISM - Udine, Courses and Lectures - n. 365, Springer, Wien, p. 59-76.

Colombo A., Mussio L. (1997): The Statistical Behaviour of Correlated Data. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 6W1, p. 112-115.

Crippa B. (1997): Correlations in Large Sets of Data. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 1, p. 127-130.

Mussio L., Tucci G. (1997): 3D Rigid Transformation. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 6W1, p. 165-169.

Mussio L., Nocera R., Poli D. (1998): Numeric Solution Strategies in Data Processing and Spatial Data Analysis. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 3/1, p. 138-145.

Mussio L., Nocera R., Poli D. (1999a): Discrete Mathematics for Spatial Data Classification and Understanding. In: S.F. El Hakim, A. Gruen (Ed's), SPIE, vol. 3641, p. 217-226.

Mussio L., Nocera R., Poli D. (1999b): Spatial-temporal Modeling. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 4W12, p. 155-162.

Dalla Linguistica alla Geomatica

Bellone T., Mussio L., Nardinocchi C. (1997): On Data Processing in Photogrammetry and Cartography. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 6W1, p. 26-30.

Bellone T., Mussio L., Nardinocchi C. (1998): Some Aspects on Data Processing in Remote Sensing and GIS. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 6W4, p. 56-59.

Bellone T., Mussio L., Nardinocchi C. (1999): Data Processing versus Geomatics. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part 6W7, p. 67-71.

Bellone T., Mussio L., Nardinocchi C. (2000): A Contribution from Linguistics to Geomatics. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, part. 6W8/2, p. 190-198.

Bellone T., Giacobbe L., Mussio L. (2000a): Classification by a Proximity Matrix. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 33, part. B6, p. 29-36.

Bellone T., Giacobbe L., Mussio L. (2000b): Processing of Correlated Information. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 33, part. B6, p. 215-222.

Bellone T., Mussio L. (2001a): Semantic Ambiguity Questions for Pattern Recognition. In: A. Carosio, H. Kutterer (Ed's) Robust Statistics and Fuzzy Techniques in Geodesy and GIS, IGP - Bericht Nr. 295. ETH, Zurich, p. 221-226.

Bellone T., Mussio L. (2001b): Examples of Semantic Ambiguity in Pattern Recognition. In: A. Vettore (Ed) 3D Digital Imaging and Modeling Applications of Heritage, Industry, Medicine & Land. AGRIPOLIS, Padua, S5_8 p. 8.