

Un modello geologico tridimensionale della Faglia Altotiberina da dati di superficie e di sottosuolo

Mauro De Donatis (*), Sara Susini (*), Francesco Mirabella (**), Andrea Lupattelli (**), Massimiliano R. Barchi (**), Roberto Romeo (*)

(*) DISTEVA- Dipartimento di Scienze della Terra della Vita e dell'Ambiente – Università di Urbino, Campus Scientifico “E. Mattei” 61029 Urbino – Tel. e Fax.: 3280975012 – E-mail : mauro.dedonatis@uniurb.it

(**) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Perugia,

E' stato studiato un settore di catena dal Bacino del Tevere, tra Sansepolcro e Perugia, e la zona esterna marchigiana nel quale è stata effettuata la

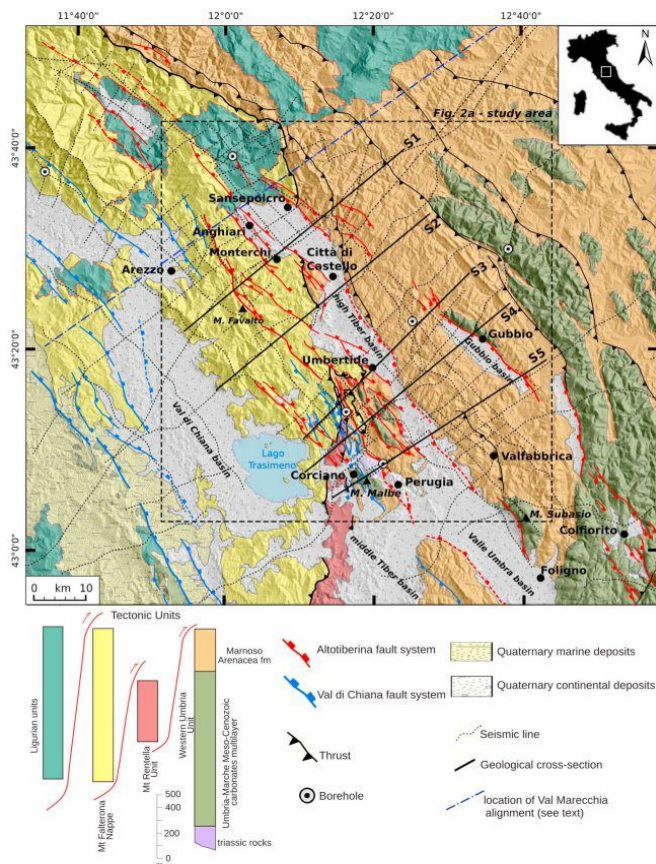


Figura 1. Schema geologico dell'area con le unita' tettoniche e principali sistemi di faglie. Le linee a tratto scuro sono le tracce delle sezioni geologiche bilanciate, quelle a tratto fine, sono i tracciati di sezioni sismiche (da Mirabella et al., 2011).

la modellazione tridimensionale del sistema di faglie afferente alla faglia Altotiberina (ATF), una faglia normale a basso angolo di importanza regionale immergente a ENE (Figura 1).

La modellazione tridimensionale ha integrato dati di sottosuolo (sismica a riflessione e pozzi) con la geologia di superficie (nuova cartografia CARG e rilievi originali). Nell'area di studio infatti sono disponibili numerose linee sismiche di buona qualità, che permettono di tracciare con buona continuità ed affidabilità i principali riflettori-guida, consentendo una ricostruzione 3D dei principali orizzonti stratigrafici e delle faglie che le dislocano.

La modellazione 3D (De Donatis, 2001; De Donatis et al., 2002; De Donatis et al, 2009) è stata eseguita utilizzando alcuni strumenti software: un software mobile GIS open source con tablet PC e GPS (NMEA) per i rilievi sul terreno (Figura 2) e un software di modellazione multi dimensionale (De Donatis et al., 2012).

Sono state così ricostruite le geometrie delle superfici degli orizzonti stratigrafici principali e delle faglie che tagliano in compressione e in estensione le unità stratigrafiche.

Il modello 3D ha quindi messo in evidenza la particolare geometria a gradini dell'ATF e i rapporti tra questa morfologia e la posizione di altre faglie associate.

Nella zona tra la Val Tiberina e la catena appenninica è stato riconosciuto un sistema di faglie trasversali transpressive: le geometrie di alcune di queste faglie, non identificate in precedenza, è stata ricostruita in dettaglio.

Lo sviluppo prossimo della ricerca prevede anche la retro-deformazione sequenziale delle strutture, nel tentativo di ricostruire quantitativamente i vari passi del processo deformativo e le loro variazioni nel tempo (modello 4D).

Poiché alcuni splay del sistema ATF sono attivi e sismo-genetici, come mostrato anche da recenti eventi sismici, la nostra ricerca potrà trovare applicazioni anche per una migliore comprensione della sismicità dell'area e per supportare studi non convenzionali della pericolosità sismica.



Figura 2. Strumenti di rilevamento: a) tablet PC con mobile-GIS; b) ricevitore GPS; c) fotocamera digitale.

I dati

Il set di dati di superficie è composto fondamentalmente dalla cartografia di base in versione digitale (dati vettoriali) e dalla nuova cartografia geologica digitale (dati raster). Questi dati hanno

permesso di costruire un primo modello 2,5D, ovvero una superficie riconducibile al modello del terreno (DEM: digital elevation model) con la geologia di superficie drappaggiata sopra (fig. 3a).

Il DEM è stato creato a partire dai dati ASTER Global Digital Elevation Model V2 (risoluzione 30m, GDEM; Arefi & Reinartz, 2011; Carlucci 2011) che sono disponibili nel sito della Nasa, all'indirizzo: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. L'area è stata divisa in quattro sub-regioni e per ognuna di queste sono stati scaricati pacchetti di dati altimetrici in formato .tiff. L'area coperta dai dati altimetrici è stata ulteriormente ridimensionata alle esigenze del progetto. Quindi il sistema di coordinate dei dati è stato trasformato da WGS84 a Gauss Boaga fuso Est, in modo da uniformare i sistemi di georeferenziazione dei dati appena acquisiti con quelli di sottosuolo a nostra disposizione (sezioni sismiche e pozzi).

L'area di studio è coperta dalle tre nuove carte geologiche a scala 1:50.000 prodotte all'interno del progetto di cartografia geologica nazionale CARG (Foglio n 289: "Città di Castello"; Foglio n 299: "Umbertide" e Foglio n 310: "Passignano sul Trasimeno", 2011a, 2011b, 2011c). I fogli geologici in formato .pdf sono stati georeferenziati secondo il sistema di coordinate Gauss Boaga fuso Est utilizzando un software GIS open-source (QuantumGIS, <http://www.qgis.org>), quindi convertiti in formato .tiff e infine vettorializzati. Gli elementi geologici digitalizzati sono: i limiti stratigrafici, i limiti tettonici e gli assi di piega. E' stato successivamente creato un database delle successioni stratigrafiche da utilizzare nella costruzione del modello tridimensionale. Il sottosuolo della regione umbro-marchigiana è stato esplorato intensamente dall'industria petrolifera italiana negli anni 1960-80, attraverso l'acquisizione di pozzi geognostici e linee sismiche. Nella regione dell'alto bacino tiberino, in particolare, sono stati effettuati 6 pozzi geognostici e circa 40 profili sismici a riflessione, acquisiti da Agip s.p.a. (oggi Eni s.p.a.). Tutti questi dati sono attualmente disponibili a fini scientifici tramite il progetto VIDEPI (<http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/videpi/>).

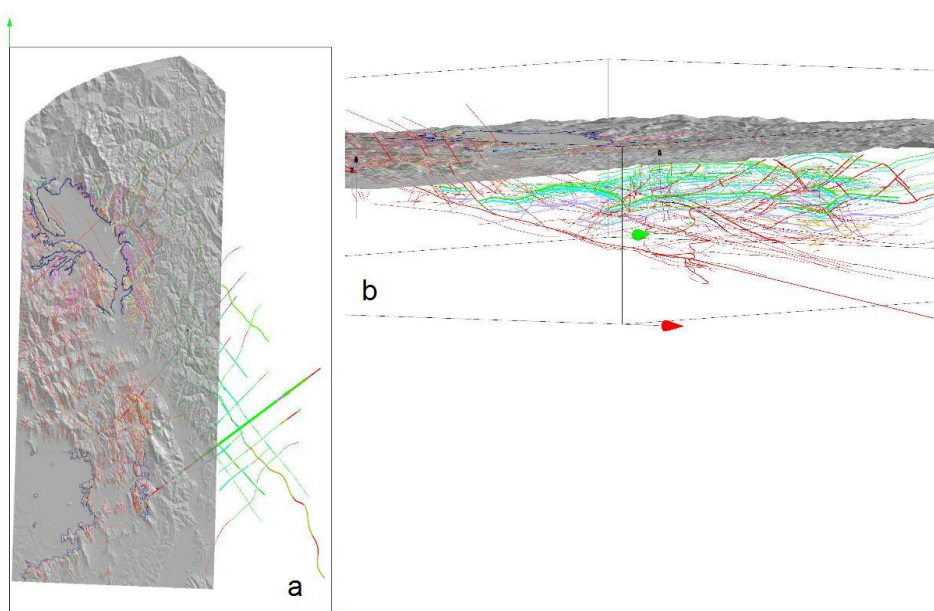


Figura 3. Dati digitali da cui si è partiti per la costruzione del modello 3D: DEM, sezioni geologiche, pozzi e limiti geologici digitalizzati dalla nuova cartografia. a) visualizzazione in mappa; b) visualizzazione inclinata. In nero il box di riferimento nel sistema di coord UTM, la freccia verde indica il Nord, quella rossa l'Est.

I dati di sottosuolo sono stati integrati con quelli di superficie ed inseriti in un unico database (Fig.3b) all'interno del software Move Suite 2012.1 (Midland Valley Exploration Ltd.)

In particolare l'ATF è stata ben visualizzata all'interno dalla linea CROP 03 NVR (profilo sismico profondo a riflessione che taglia l'Italia centrale), che ne ha messo in luce l'esistenza e rivelato le caratteristiche geometriche salienti (Barchi et al., 1998; Boncio et al., 1998; Piali et al., 1998; Boncio et al., 2000; Collettini & Barchi, 2002; Chiaraluze et al., 2007).

Dai profili sismici sono state ricavate una serie di sezioni geologiche (Mirabella et al., 2011), trasversali alla ATF, interpretate fino a una profondità di 10 -12 km (3,5-4,0 sTWT, Barchi et al., 1999; Pauselli et al., 2002; Mirabella et al., 2008).

I profili di sismica a riflessione mostrano cinque principali unità stratigrafiche, dal basso verso l'alto: i) Basamento acustico, rappresentato da rocce clastico-meta-sedimentarie di età tardo paleozoica - medio triassica (Mirabella et al., 2008); ii) Evaporiti tardo - triassiche (fm. delle Anidriti del Burano; Martinis and Pieri, 1964); iii) Multilayer carbonatico giurassico-oligocenico, con all'interno, verso la parte alta della sequenza, la Formazione delle Marne a Fucoidi del Cretacico inferiore; iv) Torbiditi ombre (fm. Marnoso Arenacea e fm. Montagnaccia, Miocene medio-inferiore) e v) Falda del Falterona (torbiditi toscane, Oligocene - Miocene inferiore).

Ricostruzione dai dati di sottosuolo

Il modello geologico 3D del sottosuolo è stato costruito utilizzando Move Suite 2012.1 (Midland Valley Exploration Ltd.). Move Suite consta in un pacchetto di software dedicati alla modellazione geologica strutturale tramite l'integrazione di dati di superficie e di sottosuolo.

Nell'elaborazione delle varie superfici del modello, in particolare, hanno avuto posizione chiave 5 sezioni geologiche bilanciate, orientate ortogonalmente alla struttura dell'ATF (Mirabella et al., 2011) e i dati di pozzo (pozzi: Perugia_2, San Donato_1 e Civitello_1) che hanno permesso di calibrare, correggere e validare tutti gli altri elementi stratigrafici e tettonici.

Per la loro presenza ubiquitaria nell'area, per la costruzione del modello sono state utilizzate le superfici geologiche corrispondenti, dal basso verso l'alto, ai top del Basamento acustico, delle Evaporiti, delle Marne a Fucoidi e dei Carbonati eocenici.

Ogni singola superficie geologica è stata generata singolarmente e utilizzata come riferimento e vincolo per la costruzione di altre superfici, e per la convalida delle superfici precedentemente costruite. Superfici rappresentanti elementi geologici limite, quali faglie e basamento acustico, sono state create precedentemente a quelle degli orizzonti stratigrafici. È infatti sempre preferibile confinare gli orizzonti attraverso superfici di delimitazione create in precedenza (Fernandez Bellon, 2004).

Discussione del modello

Il modello creato (Figura 4) visualizza diversi sistemi di faglie: (i) un sistema di faglie più interno,

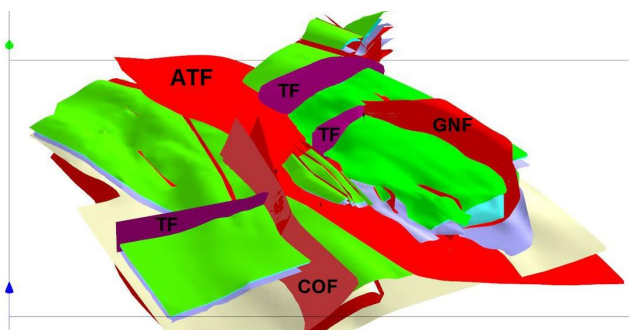


Figura 4. Modello geologico 3D della faglia normale a basso angolo Altotiberina (ATF). Le superfici in rosso e viola scuro rappresentano le faglie normali e inverse che coinvolgono i terreni all'hanging wall e footwall dell'ATF. Le faglie principali sono evidenziate dalle sigle: COF (Corciano-Preggio Fault), GNF (Gubbio Normal Fault) e TF (Transvers Faults). La superficie verde rappresenta il top dei Carbonati, quella azzurra il top delle Marne a Fucoidi, il lilla quella delle Evaporiti e in giallo chiaro il top del Basamento acustico. In nero il box di riferimento nel sistema di coord UTM, la freccia verde indica il Nord, quella blu l'asse delle Z.

costituito da faglie ad alto angolo immergenti verso SO e affioranti sui versanti occidentali dei Monti di Perugia, interpretate come strutture antitetiche appartenenti al Sistema Estensionale della Val di Chiana; **(ii)** un sistema di faglie distensive più esterno, rappresentato dall'ATF e dai suoi *splays* sintetici ed antitetiche; **(iii)** in posizione più esterna la faglia normale di Gubbio (Barchi, 2002; Mirabella et al., 2004) a cui si associa un thrust più profondo; un sistema di thrusts e back thrust che coinvolgono il settore più settentrionale **(iv)** all'hanging wall dell'ATF e uno **(v)** al footwall; infine **(vi)**, un sistema di faglie trasversali alle strutture appenniniche.

In questo lavoro vogliamo evidenziare in particolare due elementi originali, che emergono dalla costruzione del modello tridimensionale.

1- La geometria a gradoni dell'ATF (Figura 5), è costituita da un'alternanza di tratti sub-orizzontali e di tratti a pendenza nettamente maggiore. Le rotture di pendenza sono sempre piuttosto nette, tranne che nel settore settentrionale del modello, dove si osserva un aumento di pendenza più progressivo e su più grande scala. Tali geometrie sembrano controllare le strutture tettoniche sovrastanti. Queste infatti si raccordano spesso col detachment sottostante in corrispondenza dei salti di pendenza.

2- La presenza anche in questa parte dell'Appennino umbro-marchigiano di importanti strutture tettoniche ad andamento anti-appenninico, non riconosciute in superficie. Queste faglie, che nella visualizzazione evidenziano una componente del rigetto di tipo inverso, in realtà dovrebbero avere importanti componenti cinematiche trascorrenti, oggetto di ulteriori indagini in corso.

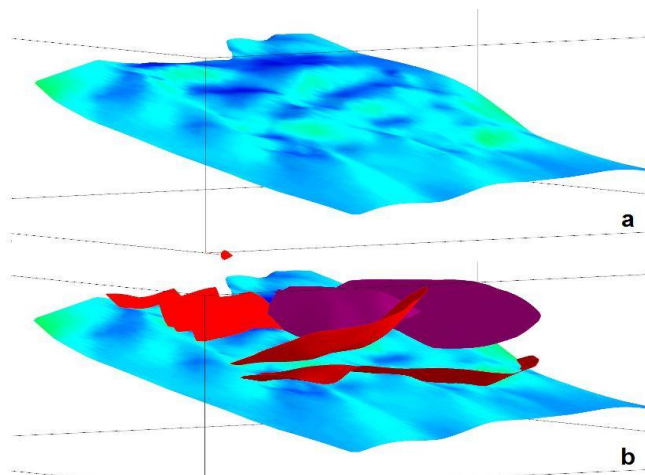


Figura 5. Visualizzazione della ATF in funzione della pendenza. a) andamento a gradoni della superficie della faglia, in verde le zone a maggior pendenza e in blu quelle sub orizzontali; b) ATF e le faglie al suo hanging wall, localizzate sempre in punti di rottura della pendenza della faglia principale. In nero il box di riferimento nel sistema di coord UTM, la freccia rossa indica l'Est.

Retrodeformazione sequenziale

Per validare le strutture geologiche esiste un metodo geometrico di bilanciamento consistente, nel caso delle sezioni geologiche, in una retrodeformazione che conservi linee e/o aree e che permetta di riportare senza sovrapposizioni o gap, gli orizzonti stratigrafici allo stato di predeformazione.

Tale bilanciamento strutturale in due dimensioni ha delle assunzioni ipotetiche come il fatto che la deformazione avvenga lungo il piano della sezione senza perdite o aumenti di materiale al di fuori di essa. Il problema sta nel fatto che in natura tale assunzione non è verosimile e difficilmente si realizza: il movimento infatti avviene anche al di fuori del piano di sezione. Se quindi si vuole

provare a testare la validità delle strutture con la retrodeformazione e il bilanciamento, si deve ricorrere a tecniche tridimensionali. In linea teorica questo metodo e' stato più volte proposto in letteratura, ma nella maggior parte dei casi si tratta solo di un set di sezioni geologiche bidimensionali, che vengono scessivamente retrodeformate assumendo una defomrazione cilindrica (es. Maesano et al., 2013), con shear verticali.

Nel nostro caso, è stata operata una semplificazione delle strutture minori e si è tenuto conto quindi delle faglie ed eventuali pieghe associate di maggiore importanza. In particolare la retrodeformazione operata ha preso in esame le maggiori strutture da distensione post-thrust del Pliocene superiore, quali (in ordine inverso temporale) la faglia di Gubbio, la faglia di Corciano e naturalmente la Faglia Alto Tiberina.

Il modello semplificato 3D così ottenuto e' stato quindi sottoposto a validazione, ovvero le singole unità tettoniche sono state mosse secondo angoli shear adeguati alle singoli situazioni.

Timing della deformazione e parametri di retrodeformazione

I primi due eventi che sono stati retrodeformati sono gli ultimi eventi estensionali che hanno coinvolto la faglia normale di Gubbio e la faglia di Corciano. Questi due movimenti hanno coinvolto rispettivamente i terreni al tetto e al letto dell'ATF, quindi sono stati retrodeformati singolarmente e separatamente, utilizzando i dati della letteratura. Per la faglia di Gubbio: Shear Azimuth: 0°, Shear Plunge: 90° e direzione di trasporto: 40° (De Paola et al., 2006), mentre per il movimento lungo la faglia di Corciano: Shear Azimuth: 67°, Shear Plunge: 60°, direzione di trasporto: 247° (Mirabella et al., 2011).

Essendo la faglia normale di Gubbio antitetica all'ATF, la retrodeformazione è stata condotta secondo il modello proposto da Rowan and Kligfield (1989).

Sia per la Faglia di Gubbio che per quella di di Corciano, il rigetto retrodeformato e' pari alla meta' del rigetto totale poiche' dalla letteratura si evince che queste faglie hanno agito in piu' momenti. Quindi nella nostra ricostruzione temporale abbiamo agito solo su quello piu' recente (Mirabella et al., 2004; De Paola et al., 2006; Mirabella et al., 2011).

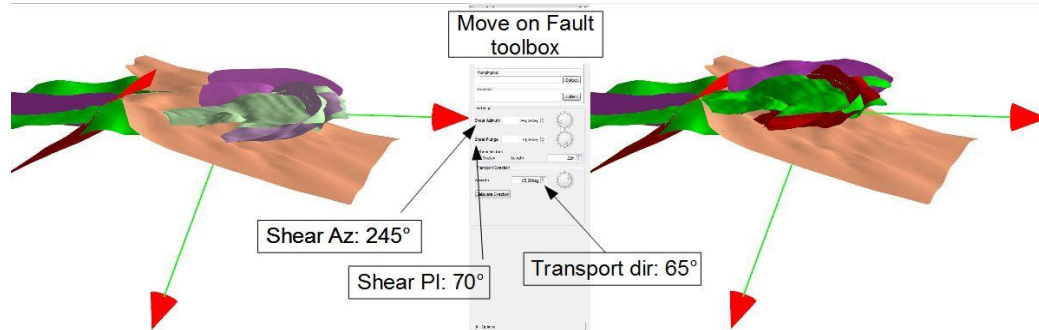


Figura 6. Procedura di retrodeformazione dell'ultimo evento estensionale lungo l'ATF (sup arancio). I terreni all'hanging wall sono stati mossi secondo i valori angolari di Shear e trasporto ricavati dalla letteratura (visualizzati dalle frecce verdi/rosse), impostati nello strumento fornito dal software (Move on Fault).

In ultima fase e' stato retrodeformato l'evento estensionale che ha visto come attore principale l'ATF (Figura 6). I valori angolari utilizzati sono Shear Azimuth: 245°, Shear Plunge: 70° e direzione di trasporto: 65° (Mirabella et al., 2011).

Durante questa fase di retrodeformazione e' stato eliminato il rigetto tra i Carbonati e il Basamento acustico al tetto e al letto della faglia, considerando la faglia normale di Gubbio e le faglie trasversali come elementi passivi.

Conclusioni

Il modello geologico tridimensionale della geologia di superficie e di sottosuolo di questo ampio settore dell'Appennino Tosco-Umbro-Marchigiano permette di evidenziare le geometrie legate alla strutturazione di questo settore di catena.

In particolare le faglie legate alla fase successiva al raccorciamento, quelle cioè che permettono l'estensione come le faglie più superficiali di Gubbio e Corciano e soprattutto quella profonda ed estesa denominata Faglia Altotiberina, sono state oggetto di modellazione geometrica e della successiva retrodeformazione, che ha permesso una validazione geometrica e cinematica delle stesse. La retrodeformazione tridimensionale di queste strutture fragili e di quelle plicative associate della successione sedimentaria costituisce una validazione attendibile delle geometrie ricostruite in profondità.

La migliore definizione delle geometrie delle strutture permette di seguito di definire anche i modelli meccanici e sismologici di queste aree sismicamente attive (Vadacca et al., 2013).

Ringraziamenti

Questo lavoro è parte del progetto PRIN 2009 “Modello geologico 4D di un sistema estensionale guidato da una faglia diretta a basso angolo da dati di superficie e di sottosuolo: la faglia Altotiberina, Appennino settentrionale”.

Si ringrazia la Midlad Valley Exploration l.t.d. Di Glasgow per la concessione dell'uso della suite Move nell'ambito dell'accordo *Academic Software Initiative*.

Riferimenti bibliografici

- Arefi, H. and Reinartz, P. (2011), *Accuracy Enhancement of ASTER Global Digital Elevation Models Using ICES at Data*. Remote Sens., 3, 1323-1343.
- Barchi, M. R. (2002), *Lithological and structural controls on the seismogenesis of the Umbria region: observations from seismic reflection profiles*, Boll. Soc. Geol. It., Volume speciale n. 1, 855 - 864.
- Barchi, M. R., Minelli, G. and Piali, G. (1998), *The CROP 03 Profile: a synthesis of results on deep structures of the Northern Apennines*, Mem. Soc. Geol. It., 52, 383-400.
- Barchi, M.R., Paolacci, S., Pauselli, C. and Piali, G. (1999), *Geometria delle deformazioni estensionali recenti nel bacino dell'Alta ValTiberina fra S. Giustino Umbro e Perugia: evidenze geofisiche e considerazioni geologiche*. Boll. Soc. Geol. It., 118, 617-625.
- Boncio, P., Ponziani, F., Brozzetti, F., Barchi, M., Lavecchia, G. and Piali, G. (1998), *Seismicity and extensional tectonics in the northern Umbria-Marche Apennines*, Mem. Soc. Geol. It., 52, 539-556.
- Boncio, P., Brozzetti, F. and Lavecchia, G. (2000), *Architecture and seismotectonics of a regional low-angle normal fault zone in central Italy*, Tectonics, 19 (6), 1038-1055.
- Carlucci, R. (2011), *Migliorato e rivisto il DEM della Terra della missione ASTER*. GeoMEDIA Newsletter, 65 : <http://www.rivistageomedia.it/2011/10/18/3625/Notizie/migliorato-e-rivisto-il-dem-della-terra-della-missione-aster.html>.
- Chiaraluce, L., Chiarabba, C., Collettini, C., Piccinini, D. and Cocco, M. (2007), *Architecture and mechanism of an active low-angle normal fault: Alto Tiberina Fault, northern Apennines, Italy*, J. Geoph. Res., 112.
- Collettini, C. and Barchi, M. (2002), *A low angle normal fault in the Umbria region (Central Italy): a mechanical model for the related microseismicity*, Tectonophysics, 359, 97-115.
- De Donatis M. (2001), *Three-dimensional visualisation of the structures of an external sector of the northern Apennines, Italy*. AAPG Bulletin, 85, 419-431.
- De Donatis M., F. Borraccini F., Susini S. (2009), *Sheet 280 – Fossombrone 3D: a study project for the new geological map of Italy at the scale of 1:50,000 in three dimensions*. Computers & Geosciences, 35, 19-32

- De Donatis M., Jones S., Pantaloni M., Bonora M., Borraccini F., Gallerini G., D'Ambrogi C. (2002), *A National Project on Three-Dimensional Geology of Italy: Sheet 280 - Fossombrone in 3D*. Episodes, 25/1, 29-32.
- De Donatis M., Susini S., Foi M. (2012), *Geology from real field to 3D modeling and Google Earth virtual environments: Methods and goals from the Apennines (Furlo Gorge, Italy)*. GSA Special Papers, 492, 221-233.
- De Paola, N., F. Mirabella, M. Barchi, and F. Burchielli (2006), *Early orogenic normal faults and their reactivation during thrust belt evolution: The Gubbio Fault case study, Umbria- Marche Apennines (Italy)*, J. Struct. Geol., 28, 1948–1957.
- Fernandez Bellon, O., (2004), *Reconstruction of geological structures in 3D. An example from the Southern Pyrenees*. Ph.D. Dissertation, Universitat de Barcelona, Barcelona, 377.
- Geological Cartography Project (2011), *Città di Castello*, in *Carta Geologica d'Italia*, sheet 289, scale 1:50,000, Ist. Super. per la Prot. e la Ric. Ambientale, Roma.
- Geological Cartography Project (2011), *Passignano*, in *Carta Geologica d'Italia*, sheet 310, scale 1:50,000, Ist. Super. per la Prot. e la Ric. Ambientale, Roma.
- Geological Cartography Project (2011), *Umbertide*, in *Carta Geologica d'Italia*, sheet 299, scale 1:50,000, Ist. Super. per la Prot. e la Ric. Ambientale, Roma.
- Maesano F.E., Toscani G., Burrato P., Mirabella F., D'Ambrogi C., Basili R. (2013), *Deriving thrust fault slip rates from geological modeling: Examples from the Marche coastal and offshore contraction belt, Northern Apennines, Italy*. Marine and Petroleum Geology, 42, 122-134.
- Mirabella, F., Ciaccio, M.G., Barchi, M.R., and Merlini, S., (2004), *The Gubbio fault (Central Italy): geometry, displacement distribution and tectonic evolution*. Journal of Structural Geology 26, 2233-2249.
- Mirabella, F., Ciaccio, M.G., Barchi, M.R., and Merlini, S., (2004), *The Gubbio fault (Central Italy): geometry, displacement distribution and tectonic evolution*. Journal of Structural Geology 26, 2233-2249.
- Mirabella, F., Barchi, M. and Lupattelli, A. (2008), *Seismic reflection data in the Umbria- Marche region: Limits and capabilities to unravel the subsurface structure in a seismically active area*, Ann. Geophys., 51(2/3), 383–396.
- Mirabella, F., Brozzetti, F., Lupattelli, A. and Barchi M. R. (2011), *Tectonic evolution of a low- angle extensional fault system from restored cross- sections in the Northern Apennines (Italy)*. Tectonics, 30.
- Pauselli, C., Marchesi, R. and Barchi, M. R. (2002), *Seismic image of the compressional and extensional structures in the Gubbio area (Umbrian- Pre Apennines)*, Boll. Soc. Geol. Ital., 121, 263–272.
- Pialli, G., Barchi, M.R. and Minelli, G. (Eds.) (1998), *Results of the CROP- 03 Deep Seismic Reflection Profile*, Mem. Soc. Geol. Ital., 52, 654.
- Rowan, M., and R. Kligfield (1989), *Cross section restoration and balancing as aid to seismic interpretation in extensional terrains*, AAPG Bull., 73, 955–966.
- QGIS project, <http://www.qgis.org>
- Vadacca L., Casarotti E., Chiaraluce L., Cocco M., Mirabella F. (2013), *3D dynamic rupture on the Alto Tiberina low-angle normal fault: geometrical effects*. Abstract del convegno FIST