

ISSN 2038-0801

Engineering
Hydro
Environmental

Geology

Giornale di Geologia Applicata

Rivista dell'AIGA, Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale

Volume 14 - Anno 2011



MEDIA
print
editore

Engineering
Hydro
Environmental

Geology

Rivista dell'AIGA, Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale

Volume 14 Anno 2011

Direttore

Cesare Roda, Università di Udine

Comitato Editoriale

Il Consiglio Direttivo dell'AIGA

Cesare Roda, Presidente (Udine)
Pietro Celico (Napoli)
Corrado Cencetti (Perugia)
Gianfranco Ciancetti (Pavia)
Pietro De Paola (Roma)
Mario Del Prete (Potenza)
Leonardo Disperati (Siena)
Walter Dragoni (Perugia)
Francesco Dramis (Roma Tre)
Francesco Guadagno (Benevento)

Grazia Martelli (Udine)
Maurizio Polemio (Bari)
Alberto Prestininzi (Roma Sapienza)
Gabriele Scarascia Mugnozza (Roma Sapienza)
Nicola Sciarra (Chieti)
Patrizio Signanini (Chieti)
Vincenzo Simeone (Bari)
Michele Spizzico (Bari Politecnico)
Paolo Tacconi (Perugia)
Mario Valletta (Viterbo)

Segretaria di redazione

Grazia Martelli, Università di Udine

Obiettivi di Engineering – Hydro – Environmental – Geology (EHE Geology)

EHE Geology, già Giornale di Geologia Applicata, ha lo scopo di pubblicare ricerche originali, descrizione di casi, rassegne sullo stato dell'arte nel campo della Geologia applicata, intesa nel senso più ampio del termine. Sono inclusi in questa espressione gli studi geologici che hanno rilevanza per l'Ingegneria civile, per la gestione del territorio, per lo sfruttamento delle risorse e per lo sviluppo della sicurezza ambientale. Sono considerati per la pubblicazione anche studi metodologici e rassegne sullo stato dell'arte su specifici problemi. L'obiettivo è quello di contribuire allo sviluppo della Geologia come professione.

© 2009 AIGA. Tutti i diritti sono riservati all'AIGA. Sono autorizzate fotocopie per uso individuale; è autorizzata la riproduzione di parti del volume per uso didattico o scientifico, purché sia citata la fonte. Per ogni altro uso è necessaria l'autorizzazione dell'AIGA.

EHE Geology è un periodico dell'AIGA, Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale, registrato presso il Tribunale di Udine in data 27.03.2006 al numero 10/2006.

Indirizzo della redazione: Prof. Grazia Martelli, Dipartimento di Georisorse e Territorio, Via Cottonificio, 114, 33100 Udine. e-mail: giornale@geoitalia.org.

I singoli Autori sono responsabili delle opinioni espresse negli articoli. L'AIGA e gli Autori non si assumono nessuna responsabilità per eventuali danni a persone o cose derivanti dalla utilizzazione di idee, osservazioni o metodi riportati negli articoli del Giornale di Geologia Applicata.

In copertina: Cava pedemontana per inerti calcarei delle Murge.

Engineering
Hydro
Environmental

Geology

Giornale di Geologia Applicata

Volume 14 – Anno 2011

- 3** **Analysing some sandy mine tailings transported by a creek (rambla) towards Mediterranean sea near Cartagena, SE Spain**
ANTONIO ASENSIO CALDERÓN GARCÍA, MARIA GIAMMATTEO, DONATELLO MAGALDI, JOSÉ IGNACIO MANTECA MARTÍNEZ
- 11** **S.I.P.S.: Sistema parametrico semplificato per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento alla scala di area vasta**
PIERO BARAZZUOLI, FAUSTO CAPACCI, JENNY MIGLIORINI, ROBERTO RIGATI
- 25** **Studio per la definizione del Bilancio Idrico del Bacino Transfrontaliero del Fiume Roja**
PIERO BARAZZUOLI, FAUSTO CAPACCI, JENNY MIGLIORINI, ROBERTO RIGATI
- 37** **Valutazione della suscettibilità da frana mediante un'analisi statistica in ambiente GIS: applicazione al bacino del T. Incinerato (Calabria Meridionale)**
MASSIMO CONFORTI, SALVATORE CRITELLI, FRANCESCO MUTO, MICHELE CARBONE
- 49** **Effetto della stabilizzazione con calce sul comportamento meccanico di un terreno argilloso**
MICHELE ORAZI, UGO SERGIO ORAZI
- 55** **La Carta Giacimentologica del Piano Regionale delle Attività Estrattive della Puglia**
CLAUDIO CHERUBINI, ALESSANDRO REINA, DONATO SOLLITTO, FRANCESCA VISICCHIO
- 61** **Test di risposta termica per la geotermia superficiale: un approccio geostatistico**
ROBERTO BRUNO, SARA FOCACCIA, FRANCESCO TINTI
- 71** **Le aree carsiche della Liguria: un esempio di metodologia per la valorizzazione e la tutela della geodiversità**
FRANCESCO FACCINI, LUIGI PERASSO, FLAVIO POGGI, ALESSANDRO VERNASSA
- 83** **Utilizzo del sistema Google Earth™ per la definizione di un modello di suscettibilità da frana: un test in Sicilia centrale**
DARIO COSTANZO, CHRISTIAN CONOSCENTI, EDOARDO ROTIGLIANO
- 95** **Indici**

Analysing some sandy mine tailings transported by a creek (rambla) towards Mediterranean sea near Cartagena, SE Spain

Antonio Asensio Calderón García¹, Maria Giammatteo², Donatello Magaldi^{3*}, José Ignacio Manteca Martínez⁴

¹Agricultural Science and Technology Department, Technical University of Cartagena (Spain).

²Centre of Electronic Microscopy, University of L'Aquila (Italy).

³Department of Soil Science and Plant Nutrition, University of Firenze (Italy).

⁴Department of Mining Engineering, Geology and Cartography, Technical University of Cartagena (Spain).

*Corresponding author: e-mail: <donatello.magaldi@unifi.it>

ABSTRACT: Although mining activity ceased in 1991, huge piles of mining wastes can be found in Cartagena-La Union Mountains, SE Spain. Erosion and transport of waste materials throughout the no permanent creeks called “rambla” in this region are associated to strong storms that occur during fall season under Mediterranean climate. The objective was to determine the effect of water transport on mining wastes along the watercourse in order to evaluate the mineral species changes that the different original sulphides have undergone, regarding qualitative, quantitative, and environmental aspects. In order to study weathering of minerals and the heavy metals release to water and soil were used techniques such as SEM-EDX analysis, and XRF. The transport along the studied riverbed seems not to have a big influence on the weathering status, but only on the different frequencies of sulphides and heavy sulphates in relation to their specific gravity. Besides, the oxidation level of the sulphide grains seems not to be very high because of the important presence of clayey materials in these mining wastes what could be packing up the sulphide crystals so partly protecting them against the aggressive factors. Mineralogical as well as chemical analyses show that a strong enrichment of heavy metal sulphides is forming nearby the riverbed mouth. This constitutes a noteworthy environmental hazard due to occurrence of several toxic elements such as Pb, Zn, and As.

Key terms: Mineralogy, Environmental implications, Mine tailings, Weathering, Transport, Rambla

1. Introduction

Cartagena-La Union Mountains, SE Spain, is a Mediterranean area with more than 2500 years of mining tradition. Although mining activity ceased in 1991, huge piles from ancient times, when less developed technologies were used, and especially more recent ones from large scale exploitations, are rich in content of various minerals, mainly sulphides, enriched with metals such as lead (Pb), iron (Fe) and zinc (Zn). Currently 175 Mm³ of waste deposits occupy an area of 9 km² (García, 2004), that can be separated into two main types, named flotation (FL) and gravity (GR) wastes. These mining areas have severe erosion problems caused by wind and water runoff (van Geen et al., 1999; Querol et al., 2000; Chopin et al., 2003) in which mineralogy, particle size, landscape topography, and climate play an important role.

Erosion and transport of waste materials throughout the intermittent watercourses, called “rambla” in this region, is quite more intensive during fall season due to strong storms that occurs during this season under Mediterranean climate. Among the watersheds of Cartagena mountain range, the Gorguel basin is the smallest basin

but the most environmentally affected by mine wastes, mainly tailing dumps. The wastes of this area were dumped mainly among 1950 and 1990, although some of them have more than one century.

Mine wastes containing metal sulphides will oxidize when they are exposed to environmental conditions, like water and atmospheric oxygen. The weathering rates of sulphides in tailings depend on the mineralogical composition of the ore residues, the prevailing rainfall and temperature conditions at the site, and the particle size distribution. All these processes may increase soil and water acidity, and release metals to the environment (Plumlee, 1999). In this sense, some investigations focused on metal mobility in mining wastes have been recently carried out in the Cartagena mining area (García et al., 2008; Marín-Guirao et al., 2007). However, none of these works have been focused on the influence of mining wastes transport through no permanent watercourses and weathering on sandy mineral weathering, composition, metal releasing in water and their environmental impact. Weathering processes produce an oxidation of iron sulphides, like pyrite (FeS₂), chalcopyrite (CuFeS₂) and arsenopyrite (FeAsS), which originate ferrihydrite, goethite

and hematite, and sulphates. Furthermore when evaporation exceeds precipitation (Jambor, 1994; Plumlee, 1999; Hammarstrom et al., 2005), the sulphate minerals can precipitate like gypsum or other minerals. Regarding this, metals associated with the iron sulphide minerals, but also with other sulphide minerals such as galena (PbS) and sphalerite (ZnS), both are adsorbed on the iron oxide neo-formed material or might precipitate as siderite (FeCO_3), malachite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$), cerussite (PbCO_3) and smithsonite (ZnCO_3).

The Gorguel catchment's basin in the Cartagena-La Union mining district represent a good opportunity to study the fate of sandy sized mine minerals (mainly sulphides) under semiarid climate conditions, since these tailings have been exposed to the atmosphere for different span of time. Then this study has been focused on the characterization of sandy materials that are transported in a watercourse after an intense rain for more than a century.

2. Materials and methods

2.1-Historical, mining and geo-environmental setting of the Gorguel watershed

The Sierra de Cartagena is a coastal mountain range belonging to the south-eastern part of the alpine Betic chain characterized by a *nappe* of superimposed tectostratigraphic complexes (Oen et al., 1975). The basal unit belongs to the Nevado-Filábride Complex, which has undergone a meso-epizonal metamorphism.

At the former Cartagena-La Union mining district, vegetation cover has naturally grown over the waste deposits. Despite the area covered by tailings, a large number of spatial variations of vegetation coverage have been denoted by different authors (García et al., 2003; Ferrer et al., 2002). Grass and bush communities containing xerophytes species form the natural vegetation. Nevertheless, some important tailings surfaces remain uncovered, acting like an erosion focus of mining waste, which are enriched on heavy metals being a dangerous source for the environment and humans. The relief of the studied basin is abrupt and the altitude varies from 0 to 391 m above sea level. The climate is semiarid with fall and spring rains and a mean annual precipitation level of below 300 mm. The mean annual temperature is 18 °C. The topography and climate characteristics result in a hydrology regime characterized by short streams, with sporadic torrential rains and fast drainage that promotes both high erosion and sediment transport rate mainly during fall and spring season. The Gorguel watercourse is a short (less than three km) and temporary creek that only shows water after torrential rains. This pattern is typical of a semi arid Mediterranean climate. Scarcely selected sands and gravels form the sediments of the Gorguel creek.

Chemical-physical analyses carried out by Bastida et al. (2002), Pavetti et al. (2006), and Robles-Arenas et al.

(2006) on some waters coming from the Gorguel watercourse and nearest water basins showed that water pH ranged from 3.3 to 4.8, whereas values of sediment pH increased from headwater (4.2) to mouth of the creek (6.7-7.4) due to Mediterranean seawater influence.

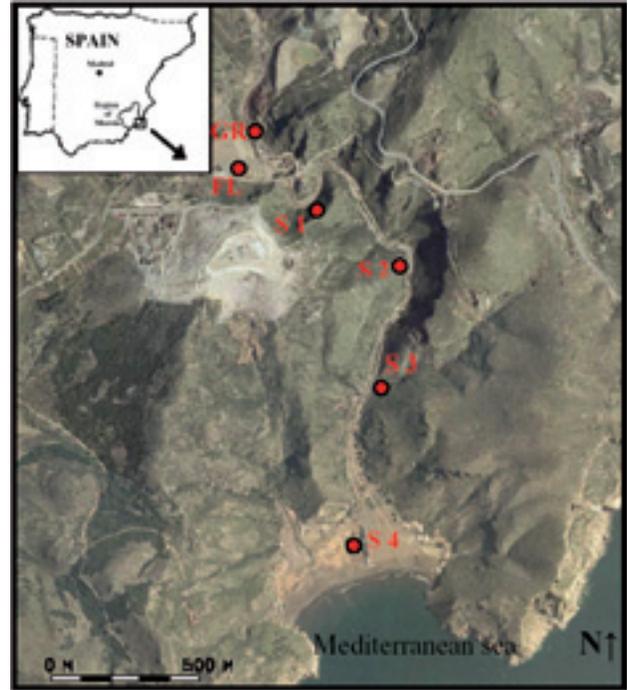


Figure 1 Study area and sampling point's distribution along the Gorguel watercourse.

Figura 1 Localizzazione dell'area studiata e punti di campionamento lungo il corso del Gorguel..

The Gorguel basin is placed in the Cartagena-La Union Mountains. In its turn, the Cartagena-La Union Mining District is located in the Murcia Region (SE Spain), and it covers approximately 50 km² (Fig. 1). Most of the mine waste is derived from differential flotation concentrators, during the second half of 20th century. Older mine waste are derived from gravimetric concentrators, and are of very different composition, both by texture and by mineral content. Two kinds of mine waste deposits can be considered the main types, depending on the amount of waste that they store; these are flotation waste and gravimetric waste dams. Flotation waste is the residual product of mineral processing by flotation techniques that are stored in tailing dams. These materials are sandy to silty sized, with predominance of silt size, with a $d_{80} < 0.4$ mm (García, 2004). The more common minerals in this mining waste are sulphides and their oxidizing phase, sulphates, but also carbonate, oxides and hydroxides and magnetite. The mine waste, mainly the tailing dumps, have important heavy metal assemblages, such as sulphides (Fe S_2 , Zn S , Pb S , Fe S_2 , $\text{Cu}_2 \text{S}$) sulphates (Pb SO_4 , Ba SO_4), carbonates (Pb CO_3 , Zn CO_3 , Fe CO_3 , (Fe , Zn , Mn) CO_3), oxides and hydroxides (FeOOH , $\text{Fe}_2 \text{O}_3$,

MnO₂) and magnetite (Fe₃ O₄) (Oen et al., 1975; Kager, 1980; Lunar et al., 1982; Manteca & Ovejero, 1992; Bas-tida et al., 2002; Pavetti et al., 2006).

2.2. Sampling and Analytical methods

In the present study, four sandy samples of alluvial sedi-ments were randomly collected from the middle of ex-posed vertical sections (1–2 m) downstream from the right and left sides of the Gorguel riverbed. S1 refers to sediment sample collected near the headwater in the first part of the watercourse. S2, S3 and S4 were collected downstream at 250 m, 600 m and 1000 m, respectively, far from S1. S4 sample is located near the watercourse mouth in the Mediterranean Sea, called Gorguel Bay (Fig. 1). S1, S2 and S3 samples were made by incoherent material whereas the fourth one, S4, was a finely lami-nated semi-coherent sand alternating with clayey and silty levels. Further representative samples were collected from the gravimetry-washing dump (GR = gravimetry) and from the flotation-washing dump (FL = flotation) both located in higher parts of the basin. For each sample only the 62-250 µm textural class shared in heavy (s.g. >2.89) and light (s.g. < 2.89) fraction was considered. Since light minerals were scarce and strongly weathered, heavy minerals (both transparent and opaque fractions) were only taken into consideration for optical and scan-ning electronic microscopy (SEM coupled with EDX analysis) characterization. Furthermore an elemental qualitative and quantitative analysis was carried out on the **whole** samples by X-ray fluorescence, using SPEC-TROXEPOS instrument with an error = 1 +/- 0, 2 %.

3. Results and discussion

3.1. Solid-phase mineralogical characterization

Optical and SEM-EDX characterization of the heavy fraction allowed one to recognize minerals coming from surrounding lithology of the watershed associated with typical minerals of seams and skarns. Calcite, barite and some not distinguishable Fe, Zn, Mn carbonates (transpa-rent minerals) are less frequent. The hopper-shaped faces of some Fe, Zn, Mn carbonate crystals (Figs. 2A and 2B) and their sharp edges strongly suggest an authigenic ori-gin within sediment as, probably of some barite crystals whose neo-formation was observed in soils (Dixon & Je-ed ,1983). The mineralogical composition of the samples was mostly qualitative because of diffuse covering of iron oxy-hydroxides and clay sized minerals. The ore mine-rals, mainly sulphides, frequently occur as weathered grains. Table 1 indicates the proportion of the heavy frac-tion of the samples, and the proportion between opaque and transparent minerals. It can be noted the fact that the heavy minerals proportion of gravimetric waste (GR) dif-fers strongly from the proportion of flotation tailings (FL) and samples collected from the riverbed sides (S1- S4).

Qualitative mineralogical composition of the samples is synthesized in Table 2. The transparent minerals found

are coherent with the geological context. It indicates that the host rocks of the mineralization are predominantly metamorphic rocks, with some metabasites, belonging to the Nevado-Filábride complex. The abundance of metal-lic sulphides indicates that the extraction made by the mining Company was not too much efficient.

Tabl 1 Heavy minerals percentage (% weight) in the sandy size fraction of each studied sample.

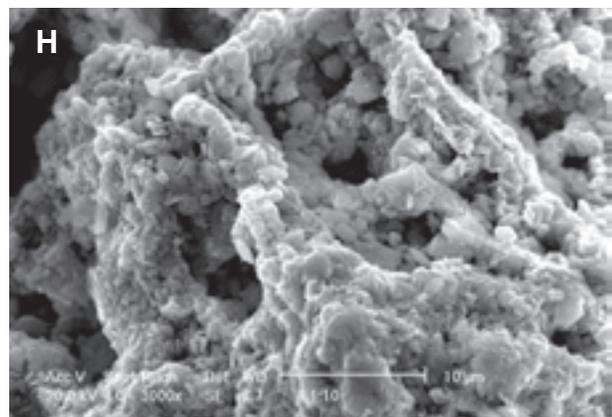
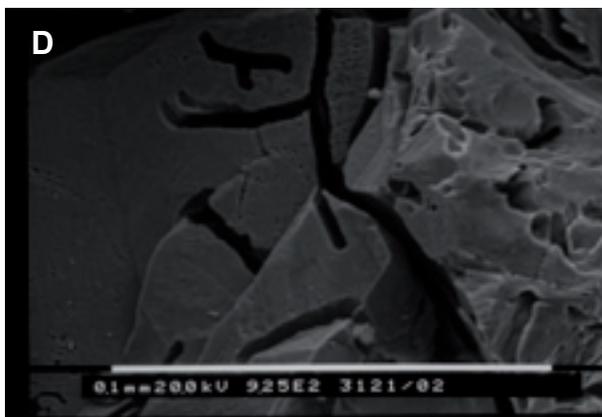
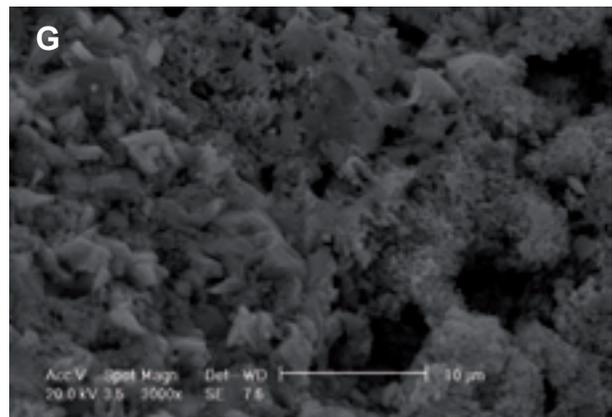
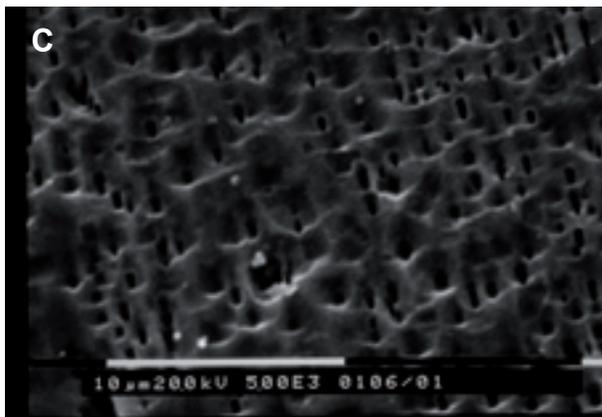
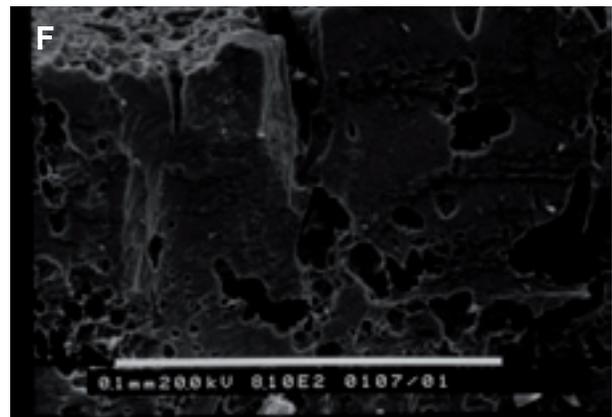
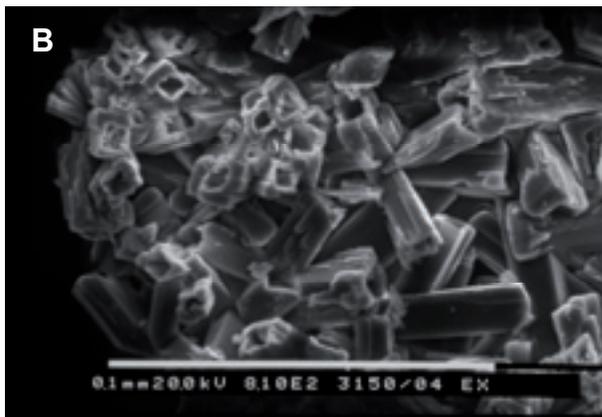
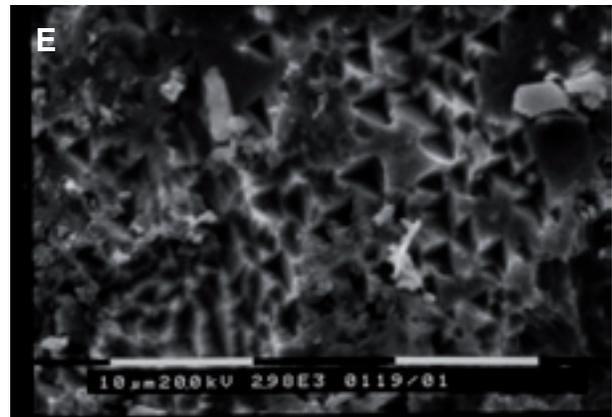
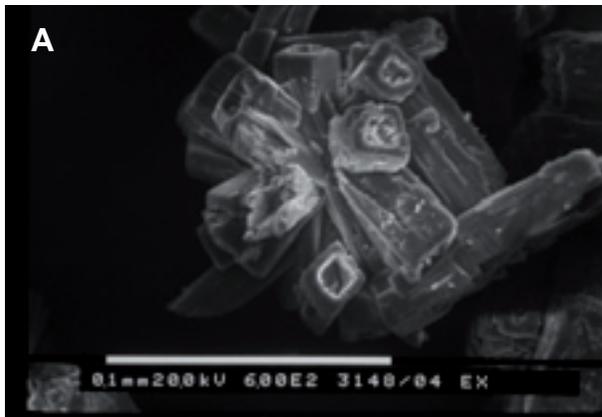
Tabella 1 Percentuale in peso dei minerali pesanti nella frazio-ne sabbiosa di ogni campione studiato.

Samples	Heavy fraction %	Opaque %	Transparent %
GR	75	75	25
FL	33	86	14
S1	19	73	27
S2	40	89	11
S3	31	61	39
S4	3	76	24

Table 2 Qualitative mineralogical composition of the heavy fraction of each sample estimated on the basis of the SEM-EDX data and XRF bulk compositions. The X amount indicates the relative abundance of each mineral phase.

Tabella 2 Composizione mineralogica quantitativa dei cam-pioni stimata in base ai dati SEM-EDX e alla composizione to-tale XRF. La lettera X indica l'abbondanza relativa di ogni fase minerale.

Transparent heavy minerals	G R	F L	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄
Andalusite			X			
Amphiboles			X			
Apatite		X				X
Barite		X		X	X	X
Calcite		X	X			X
Clino-Pyroxenes			X	X	X	
Clorite						X
Chloritoid			X			
Epidote		X				
Rutile		X	X			
Sphene					X	
Sillimanite			X		X	X
Tremolite				X		
Turmaline		X		X	X	
Zeolites				X		
Zircon	X					
Opaque heavy minerals						
Sphalerite		X	X	X	X	X
Galena		X	X	X	X	X
Goethite		X	X	X		
Hematite		X	X	X		
Magnetite	XXX	XX	X	X	X	X
Marcasite		X	XX	X	X	X
Pyrite		X	XX	X	X	X
Sulphides covered by Fe-oxides and sulphates	XX	X	X			X



3.2 Surface features of the metallic sulphides and alteration process

Fine sand sized grains of metallic sulphides (pyrite and marcasite distinguished by crystalline habitus) and magnetite show typical weathered features as is shown in the SEM images (Fig. 2). Both ordered and disordered weathering patterns are present on the surfaces of sulphide grains. The first is constituted by a regular arrangement of alveolar, triangle shaped and vermiform cavities; the second by irregularly distributed crevasses and pits. Triangles shaped forms are typical of pyrite crystals (Fig. 2C) whereas other both regular and irregular features relate to marcasite (Figs. 2D and 2F) and sphalerite crystals (Fig. 2E). Very small crystals of gypsum often cover weathered surfaces (Figs. 2G and 2H). Dissolution of sulphides by sulphuric acid circulation in mine deposit yields weathered grains and gypsum.

3.3. Elemental composition and environmental aspects

Oxidation of sulphide-bearing minerals exposed to weathering conditions, resulting in water of acidic pH (acid mine drainage = AMD) and containing a high amount of dissolved metals, is associated with the trace elements releasing to the environment (Pentreath, 1994; Salomons, 1995). For the studied samples, the weathering state of minerals, as shown by microscopic features, is likely to strongly favour the metal release from crystals to water. Table 3 lists the frequency for the whole sample of the most abundant elements, which are mainly related to sulphides and sulphates (Fe, S, Cu, Zn, As, Sb, Ba, and Pb).

Nevertheless, the oxidation level of the sulphide grains according to the SEM images seems not to be very high because some of these particles appear clean and with few weathering features. This fact could be revealing of the oxidation and weathering processes speed. Regarding this, and taking into account that this mining

waste was dumped at least 50 years ago, it can be concluded that these oxidation and weathering rates are low. This phenomenon could be explained by the important presence of clayey materials in this mining waste that could be enclosing the sulphide crystals, as was seen in several scanning images, and so protecting them against the environmental factors that promote weathering processes. Therefore, the alteration of sulphide grains could take more than several decades to occur.

After knowledge of the qualitative mineralogical composition of the samples, the results of elemental analysis were considered as an acceptable assessment of the sulphide and sulphate contents of the Gorguel watercourse sediments, being very scarce different minerals. Table 3 shows the increase in frequency of the elements relative to the averaged elemental composition of flotation waste (FL), which was assumed to be the initial composition of the riverbed sediments.

In spite of scarce sampling frequency, the relative occurrence of elements linked to sulphur (Pb vs Ba; Zn vs As), is likely to show an inverse relationships between elements linked to minerals with strong differences on specific gravity (s.g.): sphalerite (ZnS, s.g.= 4.05) and arsenopyrite (FeAsS, s.g.= 6.07), galena (PbS, s.g.= 7.40) and barite (BaSO₄, s.g.= 4.48). Results seem to suggest a gravimetric sorting along the riverbed due to variation in water regime. Furthermore, a different release of elements from mineral crystal dissolution due to variable micro-environmental conditions probably occurred. Arsenic from the samples could be associated with pyrite or arsenopyrite that is undistinguishable from pyrite by the used methods. The low S and Fe contents of sample S4 (located near the riverbed mouth) indicate that the most of pyrite and marcasite were deposited along the channel, before reaching the lower parts of the watercourse and flowing into the Mediterranean sea.

Figure 2: 2A- Sample S4. A radiating bundle of mixed Fe, Mn, and Zn carbonates with prismatic habitus. SED-EDX analysis only revealed the presence of these elements together Ca without distinction among individual crystals due to strong aggregation. Hopper-shaped faces of crystals and their sharp edges suggest an authigenic origin of the carbonates. 2B- Sample S4. Disordered aggregation of mixed Fe, Mn, and Zn authigenic carbonates (see 2A). 2C - Sample S1. Regularly pitted surface of a pyrite grain. 2D- Sample S2. Marcasite grain showing worms like weathering cavities (vermiform cavities). 2E- Sample S1. Triangle shaped pits observed on sphalerite surface. 2F- Sample S3. Marcasite grain with alveolar weathering forms. 2G- Gravimetric remains (GR). Iron sulphide (probably pyrite) covered by gypsum grains. On the higher left part honeycomb aggregates are visible. Gypsum was identified by crystalline habitus. 2H- Flotation remains (FL). Metallic sulphides covered by flotation material (floats) together with gypsum micro grains identified by crystal shape whereas sulphides were identified by EDX.

Figura 2-2A- Campione S4. Aggregato raggiato di cristalli misti di carbonati di Fe, Mn e Zn con habitus prismatico, rivelati dalla analisi SEM-EDX senza possibilità di distinzione tra i vari cristalli a causa della forte aggregazione. Le facce a tramoggia di alcuni cristalli e i loro spigoli vivi suggeriscono una neogenesi in posto. 2B- Campione S4. Aggregazione disordinata di carbonati misti di Fe, Mn e Zn autigeni (vedi 2A). 2C - Campione S1. Superficie con alterazione "ordinata" di un cristallo di pirite. 2D- Campione S2. Cristallo di marcasite con superficie alterata secondo cavità vermiformi. Campione S1. Forme di attacco chimico triangolari osservate su un cristallo di sfalerite. 2F- Campione S3. Forme di alterazione alveolare su un cristallo di marcasite. 2G- Materiale di accumulo gravimetrico (GR). Solfuri di ferro (pirite?) coperti da cristalli di gesso secondario. Una struttura a nido d'ape è visibile nella parte in alto a sinistra. Il gesso è stato identificato in base alla sua forma cristallina. 2H- Residui dovuti al processo di flottazione (FL). Solfuri metallici coperti dai materiali usati per la flottazione mescolati con micro granuli di gesso. L'identificazione si è basata sulla forma rispettivamente con l'analisi EDX e sulla forma cristallina.

Table 3 Samples elemental composition and enrichment, expressed in %. GR regards gravimetric waste, and FL regards flotation waste sample which represents the average initial composition of the riverbed sediments; gain= % (S4 - FL)/FL; n.s. means not significant.

Tavola 3 Composizione chimica dei campioni e arricchimento espresso in percentuale. GR si riferisce ai campioni degli scarti di decantazione e FL ai campioni degli scarti di flottazione i quali rappresentano la composizione media iniziale dei depositi fluviali; gain = % (S4 - FL)/FL; n.s. significa non significativo.

Element	GR	FL	S1	S2	S3	S4	Gain %
Sulphur	6.17	1.63	3.61	8.79	5.20	2.16	33
Iron	24.36	13.05	24.86	22.64	22.64	16.22	24
Manganese	0.19	0.61	0.43	0.33	0.66	0.89	46
Copper	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	n.s.
Zinc	0.33	0.29	0.91	0.26	0.79	0.58	100
Arsenic	0.53	0.02	0.05	0.18	0.08	0.19	850
Antimony	0.04	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	n.s.
Barium	0.03	0.02	0.05	0.07	0.04	0.04	100
Lead	1.34	0.12	1.39	0.27	0.62	0.34	183
Total %	33.00	15.75	31.34	32.56	30.06	20.44	-
S/Fe	0.25	0.12	0.15	0.39	0.23	0.13	-

4. Conclusions

The transport along the studied riverbed seems not to have a big influence on the weathering status, but only on the different frequencies of sulphides and heavy sulphates in relation to their specific gravity. The watercourse is likely to produce selective action that is prone to differentiate the mineralogical composition of sediments. The comparison of the values of S, Fe, Mn, Ba, Pb, Zn and As of the samples indicates that the torrential transport is producing an additional concentration of sulphides at the mouth of river in relation to the composition of the waste source (flotation tailings).

Moreover, the different relative abundance of each mineral phase along the riverbed samples confirms the pH increasing towards the river mouth. As a consequence, it has been observed from a qualitative point of view the following sequence of minerals appearance from the riverbed head (S1) to the mouth (S4):

Sulphides → *Sulphides and Ba sulphates* → *Sulphides and Ba sulphates, Fe, Mn, Zn and Ca carbonates*

So, it could be assumed that acid waters prevent the authigenic carbonates in the sandy fraction of S1, S2 and S3 sample to form because the AMD although pH is in-

References

Auernheimer C, Chinchon S (1997) Calcareous skeletons of urchins as indicators of heavy metals pollution. Portman Bay, Spain. Environ Geol 29 (1/2): 78-83.
 Bastida JH, Garcia Fernandez G, Conesa Alcaraz H, Faz Cano A (2002) Polluted soils by

mining and industrial activity in the “Campo de Cartagena” County (Murcia). Scientific Excursion 3. In: Álvarez et al (eds) International Symposium on Sustainable use and Management of soils in Arid and Semiarid Regions, Cartagena, Murcia, section 9; pp. 22-26.

Chopin EIB, Black S, Hodson ME, Coleman ML, Alloway BJ (2003) A preliminary investigation into mining and smelting impacts on trace element concentrations in the soils and vegetation around Tharsis, SW Spain. Mineral Mag 67: 279-288.

creasing to neutrality near the watercourse mouth. In any case, the weathering state of minerals, as showed by microscopic features, is likely to strongly favour the metals releasing from crystals to water. Mineralogical as well as chemical analyses show that a strong enrichment of heavy metal sulphides is forming nearby the Gorguel riverbed mouth, so creating a potential “chemical bomb”. This constitutes an important environmental hazard due to occurrence of several toxic elements (e.g., Pb, Zn, and As).

According to other author’s observations (Robles-Arenas et al., 2006; Pavetti et al., 2006) in relation to environmental chemical-physical conditions, heavy metals must be continuously transported towards the Mediterranean Sea. Then, an increasing pollution of seawater can be expected. Several authors (Auernheimer & Chinchon, 1997; Garcia, 2004) have compared metal contents between sea areas highly affected by the mine waste inside the studied area (Gorguel and Portman bay) and an unaffected area by mining activities (La Vila beach, hundred kilometres to North). In Gorguel and Portman bays, higher concentrations of metals were found in the seawater as compared to areas without mining influence. Moreover, the research on metals bioaccumulation in some Mediterranean invertebrate species (black and red urchins) showed also that metal contents (Mn, Fe, Zn and Pb) of urchins of the Portman Bay were higher (more than ten times) than the ones at La Vila beach (Auernheimer & Chinchon, 1997; Garcia, 2004). This fact makes clear that there is important environmental implication of the processes associated to the weathering and transport of mining waste along temporary watercourses.

5. Acknowledgments

The staff of the Laboratory of Chemical Engineering of the University of L’Aquila chaired by Prof. Mario Pelino and particularly Mrs. Fabiola Ferrante is kindly thanked for the invaluable help in accomplishing the elemental analysis by X ray fluorescence. This study has been performed in the framework of a project of the Spanish National Research Program (ref. CGL2007-66861-C04-04/HID), entitled “Mobility and redistribution of metals along unsaturated zone and their effects on groundwater quality changes”. Prof. Donatello Magaldi spent for the research some weeks of his sabbatical academic year. Finally, thanks to Janice and John Purves for their English grammar supervision.

- Dixon J.B., Weed S.B., (Eds.) 1983. Minerals in Soils Environment. Soil Science Society of America.
- Ferrer D, García G, Cabezas M, Torres P, Faz Á, Conesa HM (2002) Dinámica de comunidades vegetales de interés para la fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados del SE Ibérico. In: Universidad de Salamanca (ed) Avances en Calidad Ambiental, Salamanca, Vol. I, pp. 265-271.
- García, G. (2004) Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España). Ph.D. thesis, Technical University of Cartagena, Spain.
- García, G, Peñas, JM, Manteca, J.I. 2008. Zn mobility and geochemistry in surface sulfide mining soils from SE Spain. Environ Res 106: 333-339.
- García G, Faz A, Conesa HM (2003) Selection of autochthonous plant species from SE Spain for soil Pb phytoremediation purposes. Water Air Soil Poll Focus 3: 243-250.
- Hammarstrom JM, Seal RR, Meier AL, Kornfeld JM (2005) Secondary sulphate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surface environments. Chem Geol 215 (1/4): 407-431.
- Jambor JL (1994) Mineralogy of sulphide-rich tailings and their oxidation products. In: Jambor JL, Blowes DW (eds), Short Course Handbook on Environmental Geochemistry of Sulphide Mine-Waste. Mineralogical Association of Canada, Canada.
- Kager PCA (1980) Mineralogical investigations on sulphides Fe-Mn-Zn-Mg-Ca carbonates, greenalite and associated minerals in the Pb-Zn deposits in the Sierra de Cartagena, province of Murcia, S.E. Spain. Ph.D. thesis, University Amsterdam.
- Lunar R, Manteca JI, Rodríguez P, Amoros JL (1982). Estudio mineralógico y geoquímico del gossan de los depósitos de Fe, Pb, Zn de La Unión (Sierra de Cartagena). Bol.Geol.y Min. T.XCIII-III: 244-253.
- Manteca JI, Ovejero G (1992) Los yacimientos Zn, Pb, Ag-Fe del distrito minero de La Unión-Cartagena, Bética Oriental. In: C.S.I.C (ed) Col. Textos Universitarios, Madrid, Vol 15, pp. 1085-110.
- Marín-Guirao L, Lloret J, Marín A, García G, García Fernández AJ (2007) Pulse-discharges of mining waste into a coastal lagoon: Water chemistry and toxicity. Chem Ecol 23 (3): 217-231.
- Maskall J, Whitehead K, Gee C, Thornton I (1996) Long-term migration of metals at historical smelting sites. Appl Geochem 11: 43-51.
- Oen IS, Fernandez JC, Manteca JI (1975) The Lead-Zinc and associated ores of La Unión, Sierra de Cartagena, Spain. Econ Geol 70: 1259-1278.
- Pavetti FG, Conesa-Alcaraz HM, Faz Cano A, Arnaldos R, García G (2006) Contaminación por metales pesados en la rambla del Gorguel (SE. Península Ibérica). Terra Latinoamericana 24 (2): 171-178.
- Pentreath RJ (1994) The discharge of waters from active and abandoned mines. In: Hester RE, Harrison RM (eds), Mining and Its Environmental Impact. Royal Society of Chemistry, London.
- Plumlee GS (1999) The environmental geology of mineral deposits. In: Plumlee GS, Logsdon MJ (eds), The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits: Part A. Processes, Techniques, and Health Issues, Rev Econ Geol 6A: 71-116.
- Querol X, Alastuey A, López-Soler A, Plana F (2000) Levels and chemistry of atmospheric particulates induced by a spill of heavy metal mining waste in the Doñana area, Southwest Spain. Atmos Environ 34: 239-253.
- Robles-Arenas VM, García C, Rodríguez R, Manteca JI, Candela L (2006) Afecciones al medio hídrico por minería en zonas semiáridas: El ejemplo de la Sierra de Cartagena-La Unión. In: Instituto Geológico y Minero de España (ed). Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente, Madrid.
- Salomons W (1995) Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention. J Geochem Explor 52: 5-23.
- van Geen A, Takesue R, Chase Z (1999) Acid mine tailings in southern Spain. Sci Total Environ 242: 221-229.

Alcune caratteristiche delle sabbie delle discariche minerarie trasportate da un torrente intermittente verso il Mediterraneo, nei pressi di Cartagena, SE della Spagna

Antonio Asensio Calderón García, Maria Giammatteo, Donatello Magaldi,
José Ignacio Manteca Martínez

Termini chiave: Mineralogia. Impatto ambientale, Discariche minerarie, Alterazione, Traporto torrentizio, Rambla

Riassunto

L'attività mineraria nell'area di Cartagena – La Union Mountains è durata più di 2500 anni ed è terminata nel 1991. L'estrazione ha interessato particolarmente i giacimenti di solfuri metallici di vario tipo fra cui prevalgono Pb, Fe e Zn. Si sono così formati ingenti accumuli di scorie e rifiuti di estrazione, che interessano un'area molto vasta e sono tuttora esposti a processi di erosione meteorica e di trasporto da parte di torrenti intermittenti data la forte aridità della zona, chiamati localmente "ramblas", attivi generalmente durante l'autunno in conseguenza dei forti temporali, tipici dell'ambiente Mediterraneo. L'obiettivo era quello di determinare la composizione in minerali pesanti, in particolare in solfuri, delle sabbie trasportate dal corso d'acque, di valutarne inoltre lo stato di alterazione (Rambla Gorguel) e l'eventuale liberazione di metalli tossici nelle acque del Mediterraneo antistante la foce. A questo scopo sono state usate tecniche di riconoscimento e d'analisi, quali il microscopio ottico, quello elettronico a scansione e infine la fluorescenza X. I risultati mostrano che il trasporto non influenza sensibilmente lo stato di alterazione dei minerali ma soltanto la diversa

frequenza dei solfuri e dei solfati in relazione sia al peso specifico che all'incremento del pH lungo il corso d'acqua, pH che da valori molto bassi dovuti alla forte acidità creatasi nell'accumulo minerario (AMD) arriva a valori leggermente superiori a 7 alla foce del torrente. Si osserva infatti da un punto di vista qualitativo, la seguente sequenza di comparsa dei minerali: solfuri → solfuri e solfati → solfuri, solfati e carbonati, quest'ultimi in parte di neogenesi. Il livello di alterazione in una parte dei solfuri sembra non essere eccessivamente alto, poiché alcuni minerali sono coperti da pellicole argillose già presenti nell'accumulo minerario, che li ha preservati in parte dai processi di ossidazione, che in genere sembrano piuttosto lenti, rallentando così anche la liberazione dei metalli pesanti nelle acque. Le analisi chimiche e mineralogiche mostrano infine che alla foce della rambla si stanno accumulando solfuri di metalli pesanti, che costituiscono così una potenziale "bomba chimica", capace di liberare nei pressi della foce elementi tossici quali Pb, Zn e As, così com'è già avvenuto in alcune baie vicine (Portman Bay).

S.I.P.S.: Sistema parametrico semplificato per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento alla scala di area vasta

Piero Barazzuoli, Fausto Capacci, Jenny Migliorini, Roberto Rigati

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena. Centro Interdipartimentale di Ricerca sull'Acqua (C.R.A.)
lbarazzuoli@unisi.it; capacci10@unisi.it; migliorini5@unisi.it; rigati@unisi.it
Autore corrispondente: Migliorini Jenny Via Laterina, 8 cap. 53100 Siena. Fax: 0577-233938.

New simplified parametric system to map the intrinsic vulnerability to pollution of the aquifers

ABSTRACT: In order to map the intrinsic vulnerability to pollution of the aquifers in the province of Siena, a new parametric system has been elaborated distinguished by the acronym S.I.P.S. given by the initials of the four parameters considered in the evaluation of the intrinsic vulnerability of the first aquifer: Depth to water, Infiltration, Permeability, Slope. This new application is inspired by the well known SINTACS of which it represents a new simplified interpretation. The S.I.P.S. model is based on the same principal as others: each parameter chosen, divided into intervals of values, is given an increasing number of points according to its importance in the overall final evaluation; the points obtained for each parameter can be summed together or crossed in a matrix, or even multiplied by a string of weights that describe the hydrogeological situation and/or situation of impact, distinctly emphasizing the action and importance of the various parameters.

Key terms: Vulnerability, Planning, Territory, Aquifer

Termini chiave: Vulnerabilità, Pianificazione, Territorio, Acquifero

Riassunto

Per la rappresentazione cartografica della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento della Provincia di Siena è stato messo a punto un nuovo sistema parametrico semplificato.

Il sistema è contraddistinto con l'acronimo S.I.P.S. dalle iniziali dei quattro parametri presi in considerazione per valutare la vulnerabilità intrinseca del primo acquifero: Soggiacenza, Infiltrazione, Permeabilità, acclività della Superficie topografica.

Questa nuova applicazione prende spunto dal già ben noto e collaudato SINTACS e ne rappresenta una nuova lettura e semplificazione.

Il modello S.I.P.S. si basa sullo stesso principio di altri modelli già ampiamente diffusi e applicati:

- Vengono selezionati i parametri mediante i quali si intende valutare la vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, tenendo ben presente l'effettiva tipologia, frequenza e validità delle informazioni di base necessarie esistenti ed ottenibili nel territorio di interesse;

- A ciascun parametro selezionato, suddiviso per intervalli di valori e/o tipologie dichiarate, viene attribuito un punteggio crescente in funzione dell'importanza che esso assume nella valutazione complessiva finale;

- I punteggi ottenuti per ciascun parametro possono essere sommati tra loro o incrociati in una matrice o ancora, moltiplicati per stringhe di pesi che descrivano la situazione idrogeologica e/o d'impatto, enfatizzando in

misura diversa l'azione e l'importanza dei vari parametri.

Questo metodo nasce al fine di individuare il migliore compromesso fra il metodo CNR-GNDCI (zonazione per aree omogenee), adatto per valutazione sinottiche, e la metodologia strettamente parametrica SINTACS, ottimale per valutazioni di un certo dettaglio. Tale esigenza può emergere quando la valutazione della vulnerabilità viene effettuata con finalità strategiche e pianificatorie, per grandi aree, con una non uniformità della distribuzione di dati idrogeologici come può verificarsi su di un territorio provinciale.

Introduzione

La necessità di formulare una nuova metodologia per la rappresentazione cartografica della Vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento è nata durante la revisione del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale della Provincia di Siena (L.R. n°1 – 2005).

L'obiettivo proposto era quello di restituire una carta contenente una zonazione delle aree maggiormente esposte al rischio di contaminazione per le acque sotterranee, utilizzabile a medio – lungo termine, in grado di soddisfare esigenze sia strategiche che pianificatorie per la programmazione della difesa e dell'utilizzo dell'acqua alla scala di area vasta (Civita et alii, 1995).

Per questo scopo sono state prese in considerazione due metodologie già note in letteratura: quella della Zonazione per aree omogenee metodo base CNR-GNDCI

(Civita, 1987, 1990, 1994) e quella del metodo parametrico SINTACS (Civita & De Maio, 1997, 2006).

La scelta operativa circa l'adozione di una delle anzidette metodologie dipende, ovviamente, dalla tipologia dei dati a disposizione e dalla scala di realizzazione.

Nella fattispecie, trovandoci di fronte al problema di redigere una nuova carta della vulnerabilità di area vasta e considerando che:

1- Il sistema di zonazione per aree omogenee (CNR-GNDCl), pur presentando un ampio campo di applicazioni e essendo utilizzabile quando le informazioni sono scarse e disperse sul territorio e per denominatori di scala medio-grandi, non offre le necessarie garanzie di accuratezza per redigere una nuova carta che sia di riferimento pianificatorio e vincolistico;

2- Il sistema strettamente parametrico (SINTACS) può essere utilizzato per elevate densità e buona precisione di dati a disposizione, cosa non possibile per ciascun acquifero del territorio provinciale.

Ciò premesso e considerata la non uniformità della distribuzione di dati idrogeologici riguardanti gli acquiferi ricadenti nel territorio provinciale, si è deciso di elaborare una nuova metodologia semiparametrica (S.I.P.S.) ed a tal fine si è sperimentato e poi individuato come idoneo questo nuovo criterio che utilizza indici di tipo morfologico, litologico, strutturale ed idrogeologico, determinabili in modo quantitativo, qualitativo e/o relativo sull'intero territorio. Le informazioni necessarie alla sua applicazione riguardano, oltre alle modalità di circolazione idrica all'interno dei litotipi e la loro permeabilità, il tipo di copertura superficiale, la soggiacenza della falda, la capacità di infiltrazione e l'acclività della superficie topografica; il tutto su base formazionale, avendo quindi come punto di partenza una Carta Geologica di buon dettaglio.

Il metodo S.I.P.S.

È necessario premettere che la trattazione relativa alla valutazione della vulnerabilità intrinseca di un acquifero dovrebbe essere effettuata caso per caso tenendo conto delle caratteristiche fisiche e chimiche di ogni singolo inquinante presente, del tipo di fonte, dei quantitativi, dei modi e dei tempi di sversamento.

Sarebbe scientificamente ineccepibile e realizzabile per aree limitate, delle quali si vuole valutare il potenziale di inquinamento di un centro di pericolo, ma un tale intento non ha alcuna praticità quando la valutazione della vulnerabilità viene effettuata con finalità pianificatorie, per grandi aree, come un territorio provinciale. Per questa ragione è stato messo a punto un sistema di elaborazione generalizzato dei dati di base disponibili all'interno del territorio della Provincia di Siena.

L'obiettivo prefissato è stato quello di redigere una metodologia applicabile su area vasta, come il metodo CNR-GNDCl, in grado però di omogeneizzare e rendere meno soggettivi i dati disponibili sul territorio, come la

metodologia parametrica SINTACS.

Il S.I.P.S. si ispira proprio a quest'ultima metodologia e a questa si accosta per la scelta sia dei parametri che dei punteggi per le varie grandezze che entrano in gioco.

Infatti in un territorio di "area vasta" difficilmente si possiedono le conoscenze dettagliate che usualmente si hanno per il singolo acquifero; altresì ci sono alcuni parametri che comunque sono facilmente ricavabili e che quindi possono utilizzarsi in maniera oggettiva conferendogli un proprio peso nella valutazione della vulnerabilità intrinseca.

Questa è appunto la "filosofia" di questo metodo che è contraddistinto con l'acronimo S.I.P.S. dalle iniziali dei quattro parametri presi in considerazione per valutare la vulnerabilità intrinseca del primo acquifero: Soggiacenza, Infiltrazione, Permeabilità e acclività della Superficie topografica (Tabella 1).

Così come prevede il metodo SINTACS (Civita & De Maio, 1997), metodo al quale il S.I.P.S. si ispira, a ciascun parametro, suddiviso per intervalli di valore e/o tipologie dichiarate, viene attribuito un punteggio, in funzione dell'importanza che esso assume nella valutazione complessiva finale della vulnerabilità.

Come si osserva dalla Tabella 1, sia le classi che i punteggi ad esse assegnati sono frutto di un'elaborazione del metodo SINTACS (Civita & De Maio, 1997) ad eccezione del parametro permeabilità, del quale, in seguito, parleremo più in dettaglio.

I punteggi così ottenuti per ciascun parametro vengono infine moltiplicati per stringhe di pesi correlati a situazioni ambientali e/o antropiche, che descrivono la situazione di impatto. In particolare, il sistema S.I.P.S. prevede, a differenza del metodo SINTACS (Civita & De Maio, 1997), solo due situazioni ambientali distinguibili su base formazionale-idrogeologica, a cui si attribuisce un diverso peso: situazione in cui la permeabilità della formazione affiorante è Molto Elevata (classe 1) e situazioni dove la permeabilità della formazione affiorante è diversa dalla classe 1, vale a dire ricadente nelle classi di permeabilità 2a, 2b, 3a, 3b e 4 (Tabelle 2 e 7). Le classi di permeabilità sopra citate si riferiscono a valutazioni di permeabilità relativa dei terreni affioranti, quindi sono valutazioni di permeabilità attribuite sostanzialmente su base formazionale. La scelta di due situazioni ambientali è stata guidata dal fatto che si volevano tutelare gli acquiferi strategici ricadenti nella classe di permeabilità 1 presenti sul territorio della Provincia di Siena; essendo un'analisi di area vasta, non sempre è possibile dettagliare l'uso antropico del territorio, mentre è conosciuta geograficamente la delimitazione degli acquiferi strategici (CISS Regione Toscana, DGRT n.225/2003) e ciò ha fatto sì che, nel caso in esame, questa fosse la migliore strada per individuare le situazioni ambientali.

Come sopra detto, la scelta di sole due situazioni ambientali nasce dalla necessità pianificatoria di salvaguardare gli acquiferi principali e strategici della Provincia di

Siena. Questi sono costituiti prevalentemente da rocce calcaree e da vulcaniti la cui fonte di ricarica è costituita prevalentemente dall'acqua meteorica e quindi le loro aree di alimentazione corrispondono alle loro zone di affioramento che ricadono nella classe I di permeabilità.

Operativamente, ed in modo analogo a quanto previsto per il metodo SINTACS (Civita & De Maio, 1997), il metodo S.I.P.S. prevede la sovrapposizione delle quattro carte di input, relative ai quattro parametri sopra elencati. Ogni dato di input è suddiviso in classi. A ciascun tematismo viene assegnato un peso e a ciascuna classe un punteggio. La carta risultante è data dalla somma algebrica dei quattro prodotti (punteggio x peso) che per ciascun tematismo sono stati attribuiti a quella particolare area, secondo le modalità del calcolo algebrico su dati raster, ovvero: Vulnerabilità = Somma (punteggio_i x peso_i).

Descrizione dei parametri S.I.P.S.

Soggiacenza

Si definisce Soggiacenza (S), nel caso di acquiferi a falda libera, la profondità della superficie piezometrica misurata rispetto al piano campagna. Tale parametro è importante in quanto, dal suo valore assoluto e dalle caratteristiche idrogeologiche dell'insaturo, dipende il Tempo di Transito (Time Of Travel, T.O.T.) di un qualsiasi inquinante fluido o idroportato prima di raggiungere la falda. Avendo con questo studio la finalità di proteggere il primo acquifero affiorante, ecco che a tal fine la soggiacenza considerata riguarda solo acquiferi a falda libera. Quindi dovendo preservare dall'inquinamento il primo acquifero presente al di sotto del piano campagna, si fa sempre riferimento ai litotipi affioranti, in quanto formazioni idrogeologiche, quindi gli acquiferi considerati o sono a falda libera (il terreno affiorante è più o meno permeabile) oppure non vi sono acquiferi perché, anche se presenti al di sotto del piano campagna, sono caratterizzati al tetto da un terreno impermeabile che funge da protezione in caso di sversamento di un possibile inquinante.

Riguardo tale parametro e con il fine di porsi nella condizione più cautelativa possibile, occorre considerare le misure minime di Soggiacenza relative ai massimi valori piezometrici registrati nell'acquifero d'interesse. Qualora gli acquiferi esaminati siano stati analizzati idrogeologicamente (ad esempio carte piezometriche), è possibile ricavare il parametro soggiacenza per semplice sottrazione (attraverso, ad esempio, l'utilizzo di software G.I.S.) tra il modello digitale del terreno (D.T.M., Digital Terrain Model) e la carta delle isopiezometriche.

È ovvio che il metodo, pur prevedendo la conoscenza della soggiacenza della falda, è stato altresì pensato per un uso "pianificatorio" della vulnerabilità e quindi per "area vasta". È così abbastanza probabile che su superfici di migliaia di Km² vi siano lacune conoscitive di questo parametro. In quel caso, e sempre secondo il principio di cautela, e solo in quel caso si fa ricorso alla cosiddetta

"soggiacenza teorica" i cui limiti sono stati scelti con i criteri sotto riportati.

La scelta degli intervalli di "soggiacenza teorica" è stata fatta tenendo presente soprattutto l'aspetto pianificatorio, anche se non solo quello, ispirato cioè al concetto di maggior "cautela". Infatti, per quanto concerne le rocce incoerenti classificate a permeabilità da buona a elevata (comprendente prevalentemente le alluvioni attuali, recenti e terrazzate), la "soggiacenza teorica", supposta inferiore a 10 m dal p.c., impone un innalzamento cautelativo dell'indice di vulnerabilità (gli si assegna infatti il punteggio massimo), risulta comunque anche realisticamente attinente alle profondità di falde in pianure alluvionali idraulicamente collegate al corso d'acqua che vi scorre.

Per quanto concerne invece le rocce coerenti classificate a permeabilità molto elevata e media, queste sono presenti in affioramento in ambiente morfologico collinare, pertanto si è ipotizzata una "soggiacenza teorica" maggiore di 10 m, ma per tener fede al principio di cautela, questa è stata limitata ad un massimo di 50 m (gli si assegna infatti un punteggio intermedio), anche se in alcune aree la soggiacenza è ipotizzabile a profondità maggiori.

In relazione, infine, alla rocce con permeabilità bassa o molto bassa, si è invece fatto un ragionamento pianificatorio di segno opposto ai precedenti in quanto queste rocce non ospitano acquiferi di rilievo. Come è noto nella pianificazione territoriale bisogna essere molto rigidi nel tutelare (disincentivazione) ciò che si reputa importante per la collettività, e nel contempo relativamente elastici (incentivazione) laddove non sembrano sussistere particolari problemi. Quanto esposto, è ovvio, vale solamente se non si hanno e non si avranno mai a disposizione misure della reale soggiacenza, perché tali valori, se noti, azzerano l'utilizzo di quella "teorica".

Il punteggio S.I.P.S. relativo al parametro S diminuirà perciò all'aumentare della Soggiacenza, come succedeva per il metodo SINTACS, cioè con l'aumentare dello spessore dell'insaturo, assumendo valori compresi tra 8 e 1, come illustrato in Tabella 1.

Per questo parametro si è scelto di ridurre le classi SINTACS a 3, individuando altrettanti range di profondità della superficie piezometrica del primo acquifero rispetto al piano campagna: <10m, >10<50m, >50m.

Infiltrazione efficace

Questo parametro (I) assume una notevole importanza nella valutazione della vulnerabilità poiché da esso dipende, in gran parte, il trascinarsi di un inquinante in falda, sebbene esso regoli anche la sua diluizione.

Il parametro è stato calcolato sulla base della pioggia efficace (Water Surplus, Ws) e delle condizioni idrogeologiche superficiali, espresse attraverso il Coefficiente di Infiltrazione Potenziale (C.I.P.) determinato in base alla litologia affiorante ed alla permeabilità relativa della stessa (Barazzuoli et alii, 1993).

Tabella 1: Parametri, Classi di valori e relativi punteggi del sistema semiparametrico S.I.P.S.

Table 1: Parameters, Classes of value and relative scores in the S.I.P.S. semi-parametric system

SIPS PARAMETRI E PUNTEGGI	
SOGGIACENZA	
CLASSE	PUNTEGGIO
S<=10	8
10<S<=50	4
S>50	1
INFILTRAZIONE	
CLASSE	PUNTEGGIO
I<=100	3
100<I<=250	7
250<I<=375	8
I>375	6
PERMEABILITA'	
CLASSE	PUNTEGGIO
1	40
2a	32
2b	24
3a	14
3b	8
4	4
ACCLIVITA'	
CLASSE	PUNTEGGIO
P<=5%	9
5%<P<=12%	7
12%<P<=25%	4
P>25%	1

La pioggia efficace viene valutata sulla base di serie storiche, almeno ventennali, dei dati pluviometrici e termometrici mensili misurati in tutte le stazioni esistenti nell'area di interesse.

Il calcolo totale dell'Infiltrazione efficace viene effettuato sulla base della permeabilità relativa delle rocce affioranti ed assegnando loro, in relazione a tale proprietà, uno specifico valore del coefficiente di infiltrazione.

Come previsto anche nel metodo SINTACS, a seconda del valore assoluto (in mm/anno) del parametro, si assegna il relativo punteggio (Tabella 1) che è crescente con l'aumentare dell'infiltrazione fino all'intervallo 250 – 375 mm/a (prevalenza dell'effetto "trasporto" dell'inquinante), per poi diminuire in modo da tener conto dei processi di dispersione e diluizione attraverso l'insaturo; in questo metodo si è scelto di individuare 4 classi di infiltrazione.

Una volta definito il C.I.P., viene calcolata l'Infiltrazione efficace secondo la seguente relazione:

$$I(mm/a) = W_s \times c.i.p.$$

Permeabilità

La valutazione dei vari gradi di vulnerabilità intrinseca e la relativa zonazione sul territorio in esame è molto legata

e fortemente condizionata dal grado di permeabilità relativo dei terreni affioranti.

Questa proprietà fa riferimento alla facilità di movimento di un fluido attraverso i vuoti interconnessi della matrice solida. Essa rappresenta quindi la capacità che una roccia ha di lasciarsi attraversare dall'acqua in condizioni normali di temperatura e pressione, sotto l'influenza della forza di gravità.

Tabella 2: Stringhe di pesi moltiplicatori adottate per gli impatti del metodo S.I.P.S.

Table 2: Strings of multiplier weights adopted for the impacts of the S.I.P.S. method

IMPATTI		
	PERMEABILITÀ = a classe 2a, 2b, 3a, 3b, 4	PERMEABILITÀ = a classe 1
S	5	2
I	4	4
P	15	15
S	2	5

Questo parametro rappresenta il fulcro del metodo ed in esso vanno a confluire anche gli altri 4 parametri già presenti nel SINTACS (non saturo, acquifero, conducibilità idraulica e copertura del suolo). Il punteggio della Permeabilità è stato attribuito facendo riferimento alle tabelle e ai grafici presenti per quei 4 parametri del metodo SINTACS, semplificando i range di valori proposti e riconducendoli a tipologie di terreni o suoli corrispondenti ad una specifica classe di permeabilità. In questa prima applicazione non si è ritenuto opportuno modificare i punteggi previsti dal metodo SINTACS; tali modifiche potrebbero invece essere effettuate dopo una sperimentazione di tale metodologia anche in altre aree. La scelta di mantenere (seppur cumulati) i pesi dei 4 parametri è dovuta al fatto che questi si ritengono comunque di interesse fondamentale per la valutazione della vulnerabilità. Si è inoltre ritenuto che essi dovessero assumere, nell'insieme, un peso preponderante rispetto agli altri (Soggiacenza, Infiltrazione e acclività della Superficie topografica); tali considerazioni sono sintetizzate appunto nel parametro Permeabilità.

A differenza del SINTACS che evidenzia le differenti caratteristiche all'interno di uno stesso acquifero, con il S.I.P.S., alla scala di area vasta, i 4 parametri sopra elencati possono essere ricondotti e associati alle caratteristiche fisiche e idrogeologiche delle formazioni affioranti e quindi coerentemente sintetizzate in un unico parametro (permeabilità).

Infatti, proprio perché in sede pianificatoria si è costretti a "classificare" tutto il territorio, il grado di permeabilità (relativo o assoluto, se disponibile) è la discriminante dei quattro punti suddetti.

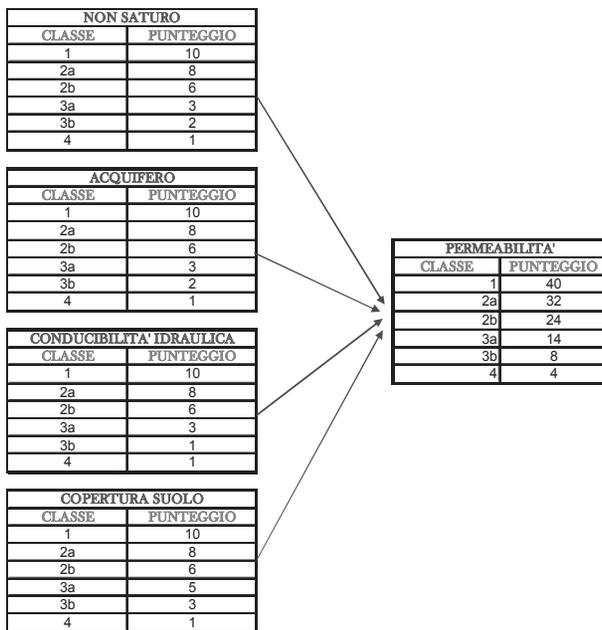
È il primo acquifero ad essere considerato ed è ovvio che la permeabilità intrinseca corrisponda a quella dell'acquifero; conseguentemente anche tutti i parametri

ad esso direttamente relativi (non saturo, acquifero, conducibilità idraulica, copertura del suolo) dipendono strettamente e fondamentalmente dalla permeabilità intrinseca della roccia serbatoio che è anche la formazione idrogeologica affiorante.

Una volta assegnata la classe di permeabilità è stato assegnato il relativo punteggio secondo lo schema riportato in Tabella 3.

Tabella 3: Diagramma per la valutazione del parametro Permeabilità e rispettivo punteggio S.I.P.S.

Table 3: Diagram for evaluation of the Permeability parameter and respective S.I.P.S. score



Dalla Tabella 3 si evince, come precedentemente accennato, il motivo per cui i punteggi di questo parametro siano più alti rispetto agli altri tre parametri. Conseguentemente, nella semplificazione metodologica da noi sperimentata ed applicata, la sola definizione del grado di permeabilità consente subito di individuare automaticamente il peso "complessivo" da applicare alle classi di questo parametro per la valutazione della relativa vulnerabilità intrinseca.

Nel caso della permeabilità, si può anche ripensare alla definizione sia delle classi che dei punteggi; si possono, infatti, riformulare, tenendo conto del dettaglio dei dati a disposizione e di conseguenza, si può sia incrementare il numero delle classi, nel caso in cui i dati a disposizione siano molti, sia diminuirne il numero nel caso si disponga di poche informazioni. Questi accorgimenti potranno consentire all'operatore di individuare con il miglior dettaglio possibile le variazioni qualitative (e se presenti quantitative) del parametro.

Acclività della Superficie topografica

Da tale parametro (S) dipende il ruscellamento che si

produce a parità di precipitazione e, di conseguenza, la velocità di spostamento dell'acqua (e, quindi, di un inquinante fluido o idroveicolato) sulla superficie prima di infiltrarsi.

Il principio che il metodo S.I.P.S., come il metodo SINTACS (Civita & De Maio, 1997), segue è quello di attribuire un punteggio elevato a pendenze molto blande, che corrispondono a parti di territorio in cui l'acqua ed un eventuale inquinante ristagnano, favorendone l'infiltrazione.

Le classi di pendenza scelte per la discretizzazione di tale parametro ai fini dell'applicazione del metodo SIPS sono quattro ed i relativi pesi sono riportati in Tabella 1.

Valutazione della Vulnerabilità intrinseca S.I.P.S.

Il metodo S.I.P.S., come ampiamente ripetuto, prende ispirazione dal sistema parametrico SINTACS e come tale è stato concepito per poter moltiplicare i punteggi ottenuti con delle stringhe di pesi preimpostate, che contemplano le possibili situazioni di impatto dell'area studiata. Tali pesi servono per esaltare l'importanza di alcuni dei 4 parametri rispetto agli altri, lasciando all'analista ampi spazi decisionali, purché sia rispettata la seguente relazione:

$$\sum_{i=1}^4 W_i = \text{costante} = 76$$

dove W_i è il peso relativo della stringa (scenario di impatto) scelta.

Le diverse stringhe di pesi distinte in base alle situazioni di impatto contemplate sono mostrate in Tabella 2.

Per ciascun elemento della maglia che discretizza l'acquifero o la porzione di territorio studiato, viene identificato lo scenario di impatto corrispondente e, di conseguenza, si calcolano i pesi relativi ai 4 parametri del metodo che la stringa scelta prevede.

L'indice di Vulnerabilità Intrinseca (ISIPS) si ottiene, per ogni scenario di impatto, attraverso la seguente relazione:

$$ISIPS = \sum_{i=1}^{i=4} P_i \times W_i$$

dove:

P_i rappresenta il punteggio di ciascuno dei 4 parametri considerati dal metodo;

W_i è il peso relativo della stringa (scenario di impatto) scelta.

Da tale relazione si ottengono dei valori numerici che rappresentano la vulnerabilità intrinseca del territorio in studio. Tali valori possono variare da un minimo di 76 ad un massimo di 707.

Per rendere superabile il problema di una suddivisione dell'intero intervallo di valori (da 76 a 707) in classi di vulnerabilità che sia facilmente rappresentabile in carta e di facile lettura, tutti i valori ottenuti con il metodo parametrico vengono trattati e discretizzati in modo tale da

ottenere 4 gradi di vulnerabilità. Gli intervalli di valori sono definiti dai cosiddetti punteggi grezzi, che rappresentano l'Indice S.I.P.S. (ISGR) tal quale.

Per semplicità di lettura, i punteggi grezzi vengono poi normalizzati, cioè vengono espressi in percentuale (Tabella 4), attraverso la seguente trasformazione:

$$ISNO = [(ISGR - ISMN)/(ISMAX - ISMN)] \times 100$$

dove:

ISNO è l'Indice normalizzato;

ISMAX e ISMN sono, rispettivamente, i valori massimo e minimo dell'Indice grezzo, ovvero 707 e 76.

Tabella 4: Intervalli e Gradi di Vulnerabilità intrinseca (punteggi normalizzati)

Table 4: Intervals and Degrees of intrinsic Vulnerability (normalized scores)

NORMALIZZAZIONE	
$[(IS-76)*100]/631$	
IS _{MIN}	76
IS _{MAX}	707
IS _{MIN-ISMAX}	631

GRADO DI VULNERABILITA'			
GRADO	PUNTEGGIO		CLASSE
Elevato	80 - 100		1
Medio alto	50 - 79		2
Medio basso	25 - 49		3
Basso	0 - 24		4

Applicazione della metodologia S.I.P.S. alla Provincia di Siena

La nuova metodologia è stata applicata al territorio della Provincia di Siena.

Per la realizzazione delle quattro carte di input si è proceduto con la valutazione e classificazione dei quattro parametri richiesti dal metodo.

Per quanto riguarda il primo parametro, la soggiacenza (Figura 1), si è spesso dovuto sopperire alla carenza del dato; infatti alcune aree risultavano prive in tal senso di informazioni. Si è quindi scelto di assegnare una "soggiacenza teorica" alla prima falda (seppur ben ponderata in relazione alle caratteristiche idrogeologiche delle formazioni presenti di cui avevamo informazioni), mettendo a punto delle preventive assunzioni teoriche e alcune fasi operative per la realizzazione pratica del relativo elaborato cartografico.

Tale procedura operativa prevede l'individuazione del grado di permeabilità delle formazioni affioranti e, successivamente l'assegnazione, a queste, di un range di pro-

fondità teorica della falda.

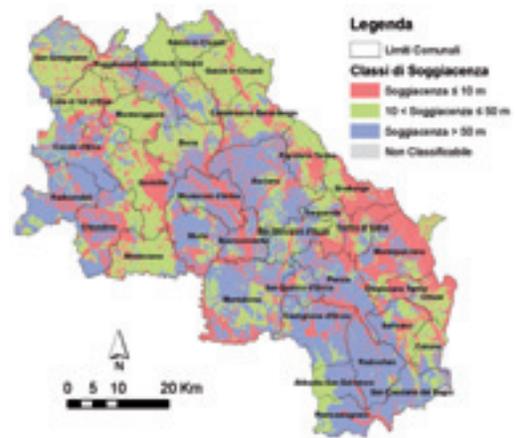


Figura 1: Carta della Soggiacenza classificata secondo il metodo S.I.P.S.

Figure 1: Map of depth to water table classified according to the S.I.P.S. method

Infatti, grazie alle conoscenze in nostro possesso del territorio senese, si è considerato che nel caso dei depositi alluvionali e detritici (di qualsiasi genere) e comunque permeabili, la falda non si trovi mai a profondità superiori ai 10 metri dal piano campagna, mentre nel caso di formazioni rocciose permeabili, quali calcari, vulcaniti, arenarie ecc., si è ritenuta probabile una profondità della falda compresa tra i 10 e i 50 metri.

Una soggiacenza maggiore di 50 metri è stata invece empiricamente prevista laddove le formazioni presenti risultavano classificate a permeabilità relativa bassa o nulla.

Per sintetizzare e rendere più agevoli le operazioni sono state individuate, sulla base delle conoscenze geologiche dei terreni presenti nel territorio della Provincia di Siena, le relazioni tra classe di permeabilità relativa e soggiacenza "teorica" della falda così come riportate in Tabella 5 ed in base ai criteri esposti in precedenza.

Tabella 5: Corrispondenza tra permeabilità e soggiacenza
Table 5: Relationship between permeability and depth to water table

Classe di Permeabilità	SOGGIACENZA	
	CLASSE	PUNTEGGIO
2a, 2b	$S \leq 10$	8
1,3a	$10 < S \leq 50$	4
3b,4	$S > 50$	1

A questo punto sono state analizzate le informazioni disponibili relativamente alla soggiacenza della falda, correggendo così, ove necessario, il valore della soggiacenza "teoricamente assegnata" con quello "reale", come

ad esempio per l'acquifero della Montagnola Senese (Capacci et alii, 2008).

Per quanto riguarda il parametro infiltrazione (Figura 2), per la valutazione della Pioggia efficace (determinata dalla differenza tra precipitazioni medie e valore dell'evapotraspirazione reale calcolato con il metodo di Thornthwaite & Mather, 1957) abbiamo considerato i valori medi relativi all'Anno Idrologico medio 1967-2006, mentre per la valutazione dei coefficienti di infiltrazione potenziale abbiamo assegnato un valore di coefficiente su base formazionale così come riportato in Tabella 6. Per le aree caratterizzate da depositi antropici non è stato previsto alcun valore di coefficiente di infiltrazione (n.c. - non classificabile).

Tabella 6: Correlazione tra Classe di Permeabilità della formazione affiorante e valore del Coefficiente di Infiltrazione Potenziale (CIP). Coefficienti di infiltrazione potenziale (Celico, 1988). Si tratta di percentuali di I_e rispetto a W_s , ricavate da osservazioni su bacini-campione e da esperienze effettuate in varie parti del mondo, basate sul grado di permeabilità dei litotipi affioranti all'interno dell'area considerata (calcari: 90-100%; depositi alluvionali: 80-100%; ecc.): all'interno dei singoli complessi idrogeologici, le variazioni del C.I.P. sono legate a vari fattori quali l'acclività dei versanti, la copertura vegetale, l'alterazione superficiale delle rocce, ecc.

Table 6: Correlation between the Permeability Class of the surface formation and the C.I.P. (Coefficiente di Infiltrazione Potenziale - potential infiltration coefficient). (Celico, 1988). These are the percentages of I_e compared to W_s , obtained from the observation of sample areas and experience carried out in various parts of the world, based on the degree of permeability of the surface soil type in the area examined (limestone: 90-100%; alluvial deposit: 80-100%; etc.): within the individual hydrogeological complex, the variations in C.I.P. are linked to various factors such as the slope gradient, the vegetation, the surface weathering of the rocks, etc.

C.I.P.	
CLASSE	PUNTEGGIO
1	0.9
2a	0.6
2b	0.4
3a	0.25
3b	0.15
4	0

Una volta definito il C.I.P., è stata calcolata l'Infiltrazione efficace ed assegnato il rispettivo punteggio.

Per quanto riguarda il parametro Permeabilità (Figura 3), è stato valutato in senso relativo facendo riferimento alla Carta Geologica in scala 1:10.000 assegnando la classe e il grado di permeabilità più consono alle unità litologiche secondo lo schema sottostante (Tabella 7) ed assegnando poi il relativo punteggio.

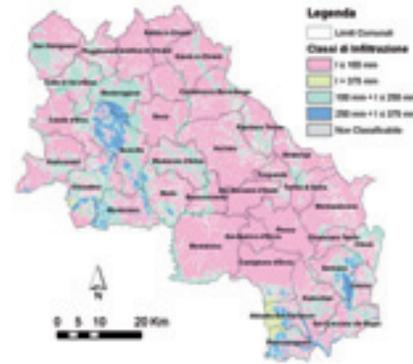


Figura 2: Carta dell'infiltrazione Efficace classificata secondo il metodo S.I.P.S.

Figure 2: Map of effective infiltration classified according to the S.I.P.S. method

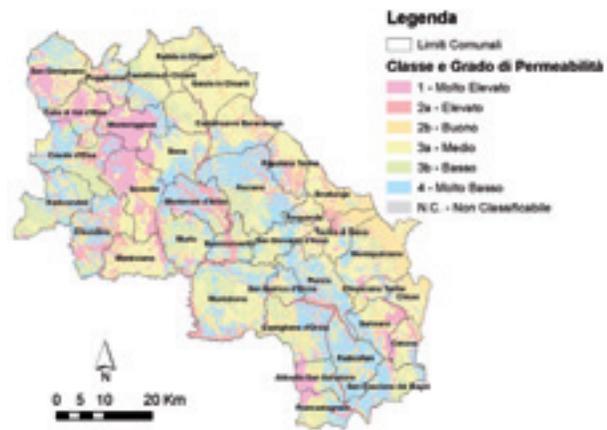


Figura 3: Carta della Permeabilità classificata secondo il metodo S.I.P.S.

Figure 3: Map of Permeability classified according to the S.I.P.S. method

Tabella 7: Classi e Gradi di Permeabilità
Table 7: Classes and Degrees of Permeability

Permeabilità Classe 1	→	grado molto elevato
Permeabilità Classe 2a	→	grado elevato
Permeabilità Classe 2b	→	grado buono
Permeabilità Classe 3a	→	grado medio
Permeabilità Classe 3b	→	grado basso
Permeabilità Classe 4	→	grado molto basso

Infine, la valutazione dell'acclività della superficie topografica (Figura 4), è stata ottenuta dal DTM (dimensione cella 10 metri) e tramite elaborazioni in ambiente GIS si è proceduto alla riclassificazione della carta della

pendenze.

Attraverso il prodotto “punteggio x peso” sono state ottenute le 4 carte la cui somma algebrica su dati raster ha consentito la realizzazione della Carta della Vulnerabilità Intrinseca della Provincia di Siena (Figura 5).

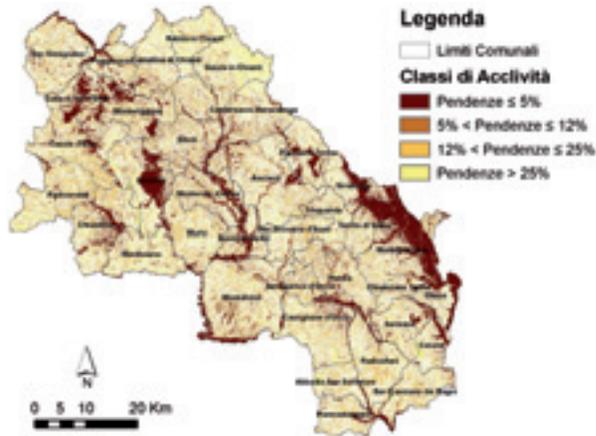


Figura 4: Carta dell'Acclività della Superficie Topografica classificata secondo il metodo S.I.P.S.
 Figure 4: Slope Map of the Topographic Surface classified according to the S.I.P.S. method

Confronto tra la metodologia CNR-GNDCI e la metodologia S.I.P.S., esempio della Provincia di Siena

All'interno di questo studio è stato inoltre eseguito il confronto dei risultati ottenuto attraverso l'applicazione del metodo semiparametrico S.I.P.S. e del metodo per zonazione per aree omogenee CNR-GNDCI per la valutazione della Vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento, metodo, quest'ultimo, reputato fin ora il più idoneo per le analisi di area vasta. Di seguito, Figura 6, si riporta la valutazione della Vulnerabilità Intrinseca secondo il metodo CNR-GNDCI (aggiornamento dei dati utilizzati per la redazione della carta della vulnerabilità degli acquiferi nel PTCP 2000, Barazzuoli et alii, 2002, 2005).

Il confronto tra le due metodologie non evidenzia sostanziali differenze nelle classi 1 e 2 di vulnerabilità, tuttavia è possibile notare uno spostamento del 10% dell'intero territorio provinciale dalla classe 3 alla classe 4 (Tabella 8); l'incremento di informazioni del metodo S.I.P.S. ha permesso quindi, nel territorio in questione, di caratterizzare con maggior precisione le aree a vulnerabilità medio e medio bassa.

Uso pianificatorio della Vulnerabilità S.I.P.S.

Lo scopo della carta della vulnerabilità degli acquiferi è quello di assistere i pianificatori, i responsabili della conduzione di attività produttive e gli amministratori (tecnici e politici) del territorio nella determinazione della suscet-

tibilità delle risorse idriche sotterranee di interesse all'inquinamento prodotto o producibile da fonti diverse (Civita, 1994).



Figura 5: Carta della Vulnerabilità Intrinseca della Provincia di Siena (metodo S.I.P.S.)
 Figure 5: Map of Intrinsic Vulnerability of the Province of Siena (S.I.P.S. method)

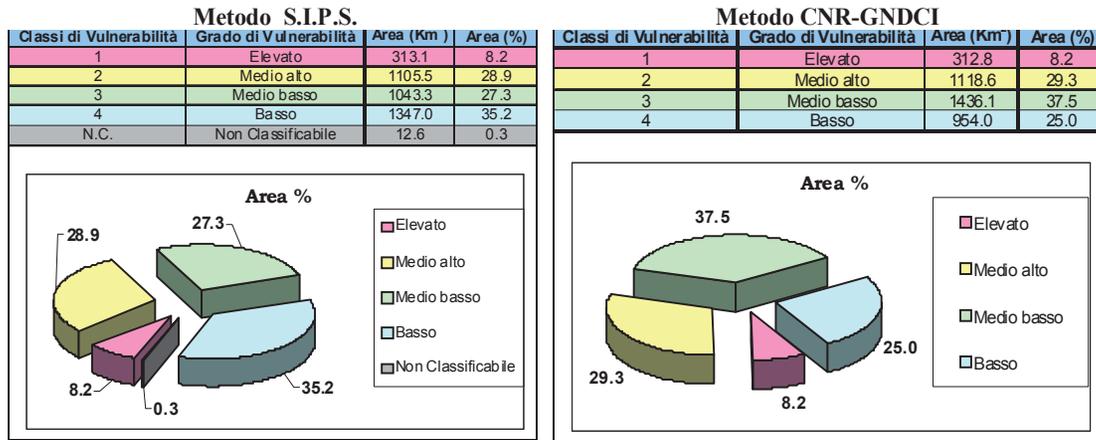


Figura 6: Carta della Vulnerabilità Intrinseca della Provincia di Siena (metodo GNDCI-CNR)
 Figure 6: Map of Intrinsic Vulnerability of the Province of Siena (CNR-GNDCI method)

In definitiva, l'utilizzo di una carta della vulnerabilità può permettere una sufficiente oculatezza nelle decisioni e nei giudizi preventivi circa l'ammissibilità di trasformazioni territoriali potenzialmente inquinanti o l'inserimento di nuove attività produttive; ciò significa che la cartografia, ben interpretata, può sostituire, almeno in chiave preliminare, i rilievi necessari al rilascio di licenze ed autorizzazioni da parte dei gestori del territorio.

Tabella 8: Suddivisione del territorio secondo le Classi di Vulnerabilità Intrinseca della Provincia di Siena (confronto metodo S.I.P.S. e CNR-GNDCI)

Table 8: Division of the territory of the Province of Siena according to the Class of Intrinsic Vulnerability (comparison between S.I.P.S. and CNR-GNDCI methods)



In un'ottica di utilizzo opposta, detta cartografia è, senza dubbio, alla base dell'identificazione, in un determinato intorno territoriale a livello comprensoriale o regionale, di zone che si prestano, in assoluto o comparativamente ad altre, per l'installazione di attività potenzialmente inquinanti (Civita, 1994).

Infine, nel campo della prevenzione del pericolo di inquinamento delle fonti idropotabili e della formazione di riserve strategiche in aree vincolate onde poter disporre, all'occorrenza, di risorse idriche integrative, sostitutive o di emergenza, l'uso delle carte della vulnerabilità è non soltanto necessario ma effettivamente indispensabile. L'identificazione e l'imposizione rapida ed oculata di vincoli è impossibile senza l'esistenza di un documento di piano che, appunto, mostri la consistenza e la tipologia delle attività esistenti a fronte della suscettibilità dell'acquifero ad essere contaminato.

Al fine di tutelare gli acquiferi presenti nel proprio territorio, all'interno del Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Siena (Barazzuoli et alii, 2010), è stato previsto il passaggio dai quattro gradi di vulnerabilità a tre classi di Sensibilità, come mostrato in Tabella 9, dove:

la classe di Sensibilità 1 corrisponde ad "Aree a vincolo elevato";

la classe di Sensibilità 2 corrisponde ad "Aree a vincolo medio";

la classe di Sensibilità 3 corrisponde ad "Aree non vincolate".

Norme per la salvaguardia degli acquiferi

Dato che l'obiettivo principale delle analisi di vulnerabilità di area vasta è quello pianificatorio, da questo lavoro di zonazione sono derivate, per il territorio della Provincia di Siena, non solo l'individuazione di aree a maggiore pericolosità di inquinamento, ma anche una normativa

che consenta preventivamente di diminuire il rischio di inquinamento accidentale. Quindi per completezza dell'informazione, riportiamo qui di seguito un estratto delle Norme legate alla Carta della Sensibilità proposte per il PTCP 2010 di Siena che appunto tendono a perseguire tale obiettivo.

Tabella 9: Relazione fra i Gradi di Vulnerabilità e le Classi di Sensibilità

Table 9: Relationship between Degree of Vulnerability and Sensitivity Class

Grado di Vulnerabilità	Classe di Sensibilità
Elevata	1
Medio - alto	2
Medio - basso ⇒ Basso	3

I vincoli previsti dal PTCP di Siena per l'uso del territorio, ricadente nelle aree sensibili di classe 1 e 2 sono riportate nelle relative Norme, il cui disposto ha la finalità di rendere minimo (o comunque accettabile) il rischio di inquinamento.

La distribuzione areale delle classi di Sensibilità a scala di Provincia, di Circondario e di Comune è riportata in Tabella 10 e in Figura 7.

10.1 Tutela degli acquiferi

Art. 10.1.1 Gli obiettivi di gestione degli acquiferi

1. In materia di acquiferi, il PTC persegue tre obiettivi complementari:

- tutelare gli acquiferi strategici, in ispecie quelli dell'Amiata e della zona Monte Maggio/Montagnola senese, che racchiudono risorse idropotabili fondamentali per la provincia di Siena, nonché quelli della dorsale Ra-

polano-M. Cetona, che costituiscono le aree di ricarica dei sistemi termali;

- tutelare in maniera diffusa i corpi idrici sotterranei, con discipline differenziate in funzione del loro grado di vulnerabilità;

- tutelare le aree di alimentazione delle opere di captazione per uso idropotabile e termale.

Tabella 10: Suddivisione del territorio in base al Grado di Sensibilità

Table 10: Division of the territory according to the Degree of Sensitivity

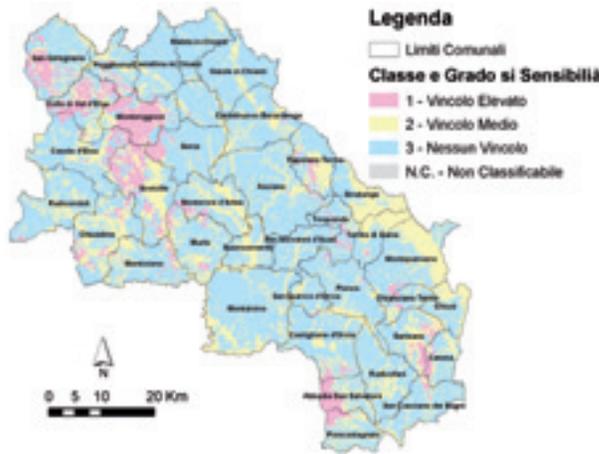
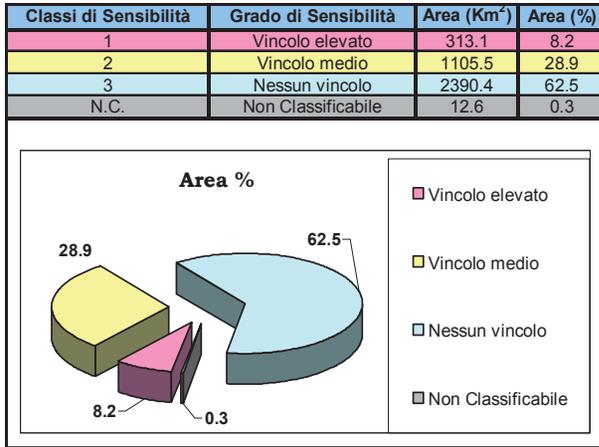


Figura 7: Carta della Sensibilità della Provincia di Siena
Figure 7: Map of Sensitivity in the Province of Siena

Con l'obiettivo di giungere ad una migliore e più aggiornata conoscenza idrogeologica del territorio tramite la realizzazione di un data-base dei pozzi e dei prelievi, l'Amministrazione Provinciale, nella sua azione di tutela e gestione della risorsa idrica sotterranea in materia di pozzi per acqua di qualsiasi tipologia, ivi compresa quella ad uso domestico, intende richiedere, anche in aggiunta a quanto richiesto dalle leggi e dai regolamenti vigen-

ti, tutta una serie di adempimenti e dati tecnico scientifici in relazione all'opera di captazione.

La regolamentazione e la progettazione di quanto sopra è demandata a modifiche da inserire nel regolamento per le autorizzazioni e concessioni dei prelievi di acque superficiali e sotterranee e delle opere idrauliche interferenti con il reticolo idrografico, modifiche da effettuarsi entro 1 anno dall'approvazione del presente PTCP.

Art. 10.1.2 Disciplina delle aree sensibili di classe 1

Nelle aree sensibili di classe 1, ove sono ricompresi gli acquiferi strategici della provincia, così come individuate nella Tav. ST IG 1 i comuni assicurano vengano esclusi qualsiasi uso od attività in grado di generare, in maniera effettivamente significativa, l'infiltrazione nelle falde di sostanze inquinanti oppure di diminuire in modo significativo - ad esempio a causa di scavi, perforazioni o movimenti di terra rilevanti - il tempo di percolazione delle acque dalla superficie all'acquifero sottostante, così come specificato nei commi successivi.

Tra gli usi e le attività da ritenersi incompatibili con la tutela delle aree sensibili di classe 1 sono annoverati:

1. la realizzazione di impianti di stoccaggio o trattamento rifiuti di qualsiasi tipo con esclusione di isole ecologiche aree di trasferimento, e aree attrezzate comunali per la raccolta differenziata di rifiuti solidi urbani nei casi di comprovata necessità da far constatare negli atti autorizzativi e degli impianti di recupero rifiuti speciali non pericolosi da demolizione e costruzione eventualmente esercitati all'interno delle aree di cava per la cui disciplina si rimanda al PAERP;
2. la realizzazione di centri di raccolta, demolizione, rottamazione di autoveicoli, di macchine utensili, di beni di consumo durevoli, anche domestici;
3. attività comportanti l'impiego, la produzione, lo stoccaggio di sostanze pericolose, sostanze radioattive, così come individuate dalla vigente normativa nazionale e comunitaria, ivi comprese quelle sostanze che, in base alle loro caratteristiche di tossicità, persistenza e bioaccumulabilità, possono essere ritenute tali;
4. la realizzazione di oleodotti;
5. l'utilizzo di concimi chimici e fitofarmaci.

Nei corpi idrici superficiali ricadenti nelle aree sensibili di classe 1 o comunque ad esse connessi, le caratteristiche qualitative delle acque devono rientrare, in tutte le condizioni di portata, in quelle stabilite per le acque superficiali destinate alla produzione di acqua potabile nella Tab. 1/A (classe A3) dell'Allegato 2 del D.Lgs. 152/06.

Tale disposizione non si applica nei casi in cui le caratteristiche qualitative delle acque eccedano i limiti per dimostrate cause naturali.

Nei corpi idrici di cui sopra i depuratori di reflui urbani ed industriali sono dotati, se di nuova realizzazione, di opere e di impianti accessori atti ad evitare il rischio di inquinamento connesso al fermo impianti.

Tali opere ed impianti accessori sono realizzati anche nei casi di ristrutturazione ed ampliamento dei depuratori esistenti, che sono comunque adeguati in tal senso entro 3 anni dall'approvazione del piano.

Le pratiche colturali sono orientate alla prevenzione del dilavamento di nutrienti e fitofarmaci, in applicazione del Codice di buona pratica agricola redatto dall'ARSLA.

Nell'esercizio delle attività agricole è comunque da evitarsi lo spandimento di fanghi provenienti da impianti di depurazione; il quantitativo di effluente zootecnico sparso sul terreno ogni anno, compreso quello depositato dagli animali stessi, non deve superare l'apporto di azoto per ettaro, così come previsto dall'Allegato 7, Parte A IV del D.Lgs. 152/06.

Per quanto concerne la regolamentazione delle attività estrattive e dei relativi impianti di lavorazione si rimanda a quanto enunciato Artt. 10.6.4 e 10.6.5 delle presenti norme.

Negli insediamenti urbani, e comprendendo in questi anche tutte le tipologie edilizie approvate sulla base dei Programmi di Miglioramento Agricolo-Ambientale, sia in fase di ristrutturazione e/o recupero, sia in fase di nuova edificazione e di cambiamento di destinazione d'uso in abitativo e/o produttivo ricadenti in aree sensibili di classe 1 sono presi provvedimenti tesi a limitare l'infiltrazione di sostanze inquinanti; le nuove fognature ed eventuali fosse biologiche sono alloggiare in manufatti a tenuta ed ispezionabili.

Ovunque possibile, è da privilegiare il teleriscaldamento od il riscaldamento a gas metano.

Come misura prudenziale non sono da prevedersi ulteriori carichi urbanistici interessanti le aree sensibili di classe 1; eventuali previsioni dovranno comunque, sulla scorta di appositi specifici studi (da redigersi secondo quanto previsto all'Art.1.1. comma 2), dimostrare la compatibilità con gli obiettivi di tutela, qualitativa, di cui alla presente disciplina.

In tali zone, oltre alla adozione di misure tese ad evitare l'infiltrazione di sostanze inquinanti, i comuni prevedono tipologie edilizie che non richiedano la realizzazione di pali trivellati o di scavi profondi che creino vie preferenziali di infiltrazione dal suolo alle falde sottostanti escludendo da tale vincolo la parte pedologica superficiale di copertura della roccia in posto e/o il riporto.

Comunque gli scavi non sono possibili dove la soggiacenza della falda è minore di 10 m dal piano campagna (fatto salvo quanto previsto al capoverso precedente), mentre per soggiacenza maggiore di 10 m dal piano campagna è possibile effettuare scavi tali che la profondità della falda dal piano di fondazione non risulti mai inferiore a 10 m e comunque in misura non superiore al 10% della reale soggiacenza locale, fino ad un massimo di 5 m, comprensivi dello spessore di suolo e/o riporto.

Per la regolamentazione in materia di attività estrattive insistenti in classe di sensibilità 1, si rimanda a quanto disposto negli Artt. 10.6.4 e 10.6.5 delle presenti

norme.

Nel restante territorio, tutte le attività, anche produttive, avendo come riferimento le condizioni topografiche naturali, che prevedono escavazioni sono da ritenersi:

- Incompatibili per soggiacenza della falda minore o uguale a 10 m dal piano campagna;
- Compatibili per soggiacenza della falda maggiore di 10 m, ma minore di 50 m dal piano campagna, qualora si prevedano interventi di escavazione che non superino il 5% della reale soggiacenza locale;
- Compatibili per soggiacenza della falda maggiore di 50 m, ma minore di 100 m dal piano campagna, qualora si prevedano interventi di escavazione che non superino il 10% della reale soggiacenza locale; compatibili per soggiacenza della falda maggiore di 100 m, qualora si prevedano interventi di escavazione che non superino il 20% della reale soggiacenza locale;
- Compatibili per soggiacenza della falda maggiore di 100 m, ma minore di 150 m dal piano campagna, qualora si prevedano interventi di escavazione che non superino il 20% della reale soggiacenza locale;
- Compatibili per soggiacenza della falda maggiore di 150 m, qualora si prevedano interventi di escavazione che non superino il 30% della reale soggiacenza locale.

Le AATO, le Autorità di Bacino, la Provincia e la Regione possono individuare forme di compensazione da erogare ai comuni al fine di attenuare i costi aggiuntivi delle trasformazioni, a carico di enti pubblici e di soggetti privati, resi necessari dal rispetto della disciplina di tutela degli acquiferi di classe 1.

Art. 10.1.3 Disciplina delle aree sensibili di classe 2

Nelle aree sensibili di classe 2, così come individuate nella Tav. ST IG 1, le attività antropiche sono orientate in modo da perseguire la limitazione delle infiltrazioni di sostanze inquinanti.

I depuratori di reflui urbani ed industriali sono dotati, se di nuova realizzazione, di opere e di impianti accessori atti ad evitare il rischio di inquinamento connesso al fermo impianti.

Tali opere ed impianti accessori sono realizzati anche nei casi di ristrutturazione ed ampliamento dei depuratori esistenti.

Opere ed impianti accessori atti ad evitare il rischio di inquinamento delle falde sono da prevedersi anche per la realizzazione di:

- impianti e strutture di depurazione di acque reflue, ivi comprese quelle di origine zootecnica;
- impianti di raccolta, stoccaggio o trattamento rifiuti di qualsiasi tipo;
- centri di raccolta, demolizione, rottamazione di autoveicoli, di macchine utensili, di beni di con-

sumo durevoli, anche domestici;

- attività comportanti l'impiego, la produzione, lo stoccaggio di sostanze nocive, sostanze radioattive, prodotti e sostanze chimiche pericolose, così come individuate dalla vigente normativa nazionale e comunitaria, ivi comprese quelle sostanze che, in base alle loro caratteristiche di tossicità, persistenza e bioaccumulabilità, possono essere ritenute tali;
- tubazioni di trasferimento di liquidi diversi dall'acqua.

In tali aree devono essere limitati allo stretto necessario i nuovi impegni di suolo a fini insediativi e infrastrutturali.

Nei corpi idrici superficiali ricadenti nelle aree sensibili di classe 2 o comunque ad esse connessi, le caratteristiche qualitative delle acque devono rientrare, in tutte le condizioni di portata, in quelle stabilite per le acque per salmonidi dalla Tab. 1/B dell'Allegato 2 del D.Lgs. 152/06, fatti salvi i casi citati nel comma terzo dell'Art. 10.1.2.

Negli insediamenti urbani, e comprendendo in questi anche tutte le tipologie edilizie approvate sulla base dei Programmi di Miglioramento Agricolo-Ambientale, sia in fase di ristrutturazione e/o recupero, sia in fase di nuova edificazione e di cambiamento di destinazione d'uso in abitativo e/o produttivo ricadenti in aree sensibili di classe 2 sono presi provvedimenti tesi a limitare l'infiltrazione di sostanze inquinanti; le nuove fognature e le eventuali fosse biologiche sono alloggiare in manufatti a tenuta ed ispezionabili.

Ovunque possibile, è da privilegiare il teleriscaldamento od il riscaldamento a gas metano.

La previsione di nuovi insediamenti urbanistici interessanti le aree sensibili di classe 2 dovranno sempre essere accompagnate da specifici studi (da redigersi secondo quanto previsto all'Art.10.11), atti a dimostrare la compatibilità con gli obiettivi di tutela, qualitativa, di cui alla presente disciplina.

In tali zone, oltre alla adozione di misure tese ad evitare l'infiltrazione di sostanze inquinanti, i comuni prevedono tipologie edilizie che non richiedano la realizzazione di pali trivellati o di scavi profondi che creino vie preferenziali di infiltrazione dal suolo alle falde sottostanti escludendo da tale vincolo la parte pedologica superficiale di copertura della roccia in posto e/o il riporto.

Comunque gli scavi non sono possibili dove la soggiacenza è minore di 10 m dal piano campagna (fatto salvo quanto previsto al capoverso precedente), mentre per soggiacenza maggiore di 10 m dal piano campagna è possibile effettuare scavi tali che la profondità della falda dal piano di fondazione non risulti mai inferiore a 10 m e comunque non superiore al 20% della reale soggiacenza locale, fino ad un massimo di 6 m, comprensivi dello spessore di suolo e/o riporto.

Per la regolamentazione in materia di attività estrat-

tive insistenti in classe di sensibilità 2, si rimanda a quanto disposto negli Artt. 10.6.4 e 10.6.5 delle presenti norme.

Nel restante territorio, tutte le attività, anche produttive, avendo come riferimento le condizioni topografiche naturali, che prevedono escavazioni sono da ritenersi:

- Incompatibili per soggiacenza della falda minore o uguale a 10 m dal piano campagna;
- Compatibili per soggiacenza della falda maggiore di 10 m, ma minore di 50 m dal piano campagna, qualora si prevedano interventi di escavazione che non superino il 25% dell'eccedente i 10 m di soggiacenza;
- Compatibili per soggiacenza della falda maggiore di 50 m, ma minore di 150 m dal piano campagna, qualora si prevedano interventi di escavazione che non superino il 20% della reale soggiacenza locale;
- Compatibili per soggiacenza della falda maggiore di 150 m, qualora si prevedano interventi di escavazione che non superino il 30% della reale soggiacenza locale.

Art. 10.1.4 Procedure di richiesta di deperimetrazione da utilizzarsi nei Piani Urbanistici

Le Carte della Vulnerabilità (Tavv. QC IG 9 e QC IG 10) e della Sensibilità (Tav. ST IG 1) sono modificabili solo dall'Amministrazione Provinciale in sede di revisione e/o aggiornamento del PTCP utilizzando la procedura SIPS illustrata nella Relazione Finale delle indagini Geologico-Applicate (seconda parte) e nell'Allegato Tecnico n°1 alla medesima. I Comuni (anche su richiesta da parte di privati) possono richiedere al competente Ufficio Provinciale la deperimetrazione di un'area in Sensibilità 1 o 2 sulla base di studi geologici, geotecnici e idrogeologici comprovanti la variazione dei parametri che hanno portato alla definizione di quella classe di Vulnerabilità, ed in particolare:

- diversa soggiacenza della falda;
- diversa litologia e quindi permeabilità.

Tale procedura non porterà ad una revisione immediata delle Carte della Vulnerabilità e della Sensibilità, ma potrà, a cura del competente Ufficio Provinciale, portare ad una concessione di diverso uso del territorio interessato dalle indagini, confacenti alla nuova classe di sensibilità che tale ufficio, sulla base dei nuovi dati conoscitivi, gli assegnerà.

Conclusioni

La necessità dell'adozione di una nuova metodologia per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi a scala di area vasta sottolinea quanto la problematica della corretta gestione delle risorse idriche inizi ben prima che l'acqua venga utilizzata.

Questo metodo rappresenta un esempio di procedimento semi-parametrico applicato ad un territorio esteso, come la Provincia di Siena.

Se da un lato esso presenta ancora la necessità di un affinamento dei punteggi (che potrà ottenersi solo dopo una sua sperimentazione) aggravata dal problema dell'insufficienza e della disomogeneità dei dati a disposizione dell'operatore che impedisce l'ottenimento di dati più dettagliati e precisi, dall'altro il criterio proposto rappresenta un discreto passo in avanti rispetto alla precisione raggiungibile con il metodo CNR-GNDICI (zonazione per aree omogenee), pur risultando di minor dettaglio rispetto alla metodologia strettamente parametrica SINTACS, da cui prende ispirazione, essendo fortemente semplificato allo scopo di renderlo applicabile alle valutazioni della vulnerabilità intrinseca di area vasta.

In particolare le differenze del S.I.P.S. col metodo parametrico suddetto consistono essenzialmente:

- nel raggruppare in un unico parametro tutti quelli che nel SINTACS fanno riferimento o dipendono strettamente dalla permeabilità relativa;
- nel minor numero di classi, e quindi di pesi, rela-

tivi alla discretizzazione di ciascun parametro, con l'esclusione della permeabilità;

- nella riduzione degli scenari di impatto a solo 2, uno per la classe di permeabilità molto elevata ed uno per le restanti classi.

Alla limitata disponibilità di dati, su vasta area, il metodo impone comunque una definizione "teorica" dei parametri. Quanto più le conoscenze sono diffuse tanto più il metodo diventa parametrico, ma è sempre e comunque applicato omogeneamente su tutto il territorio e non lascia spazio per eventuali "interpretazioni strumentali", come invece fa il metodo a zonazione per aree omogenee.

Il suo punto di forza è, infatti, quello di avere una maggiore oggettivazione delle valutazioni e una facile aggiornabilità, che consente di avere, soprattutto a lungo termine, un prodotto cartografico "vivo" integrabile con le nuove informazioni disponibili, questo soprattutto in un'ottica pianificatoria che prevede vincoli sul territorio.

Bibliografia

Barazzuoli P., Capacci F., Migliorini J. & Rigati R., 2010 - Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Siena. Indagini Geologiche - Applicate. Relazione finale e Allegati Tecnici.

Barazzuoli P. & Salleolini M. 1993 - L'acqua: risorsa, rischio e pianificazione. In: La storia naturale della Toscana meridionale. Monte dei Paschi di Siena, Ed. Pizzi, Milano.

Barazzuoli P., Filpa A., Mocenni B., Rigati R. & Salleolini M. 2002 - La tutela delle acque sotterranee nella pianificazione territoriale: un esempio dal PTCP di Siena. *Geologia Tecnica & Ambientale* 4, 13-26.

Barazzuoli P., Capacci F., Migliorini J., Mocenni B., Rigati R., Salleolini M. 2005 - La Vulnerabilità degli Acquiferi all'inquinamento nell'ambito dello Schema Metropolitan dell'Area Senese. *Giornale di Geologia Applicata* 2, 151-157.

Capacci F., Migliorini J., Barazzuoli P. 2008 - Studio idrogeologico dell'acquifero del Luco (Toscana, Italia). *Giornale di Geologia Applicata* 8 (1), 29-39.

Celico P. 1988 - *Prospezioni Idrogeologiche* Vol. I e II. Liguori Editore, Napoli.

Civita M. 1987 - La previsione e la prevenzione del rischio di inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le carte di vulnerabilità. *Atti del Convegno "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione"*, Mantova, Prov. MN, Ass. Amb. e Ecol., 9-17.

Civita M. 1990 - *Legenda unificata per le carte della vulnerabilità all'inquinamento dei corpi idrici sotterranei/Unified legend for the aquifer pollution vulnerability maps*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Sezione "Protezione delle Acque Sotterranee", Studi sulla vulnerabilità degli acquiferi 1 (Appendice), Pitagora Editrice, Bologna.

Civita M. 1994 - *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Sezione "Protezione delle Acque Sotterranee", 31, Pitagora Editrice, Bologna.

Civita M., Filippini G., Marchetti G., Paltrinieri N., Zavatti A. 1995 - *Uso delle carte di vulne-*

rità degli acquiferi all'inquinamento nella pianificazione e gestione del territorio. *Quaderni di Geologia Applicata* vol.1, suppl. 3, pp. 3.

Civita M. & De Maio M. 1997 - SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione della cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. *Metodologia ed automazione*. Quaderni di tecniche di protezione ambientale. Pitagora Editrice, Bologna, 191 pp.

Civita M. & De Maio M. 2006 - *Un manuale per l'analisi di sito e la vulnerabilità del rischio di inquinamento*.

Decreto Legislativo 3 Aprile 2006 n.152 - *Norme in materia ambientale*.

DGRT n.225/2003 - CISS (Corpi Idrici Significativi Sotterranei) Regione Toscana.

Thornthwaite C.W. & Mather J.R., 1957 - *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Centerton, N. J.

Studio per la definizione del Bilancio Idrico del Bacino Transfrontaliero del Fiume Roja

Piero Barazzuoli¹, Fausto Capacci², Jenny Migliorini³, Roberto Rigati⁴

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena

Centro Interdipartimentale di Ricerca sull'Acqua (C.R.A.)

¹barazzuoli@unisi.it; ²capacci10@unisi.it; ³migliorini5@unisi.it; ⁴rigati@unisi.it

Autore corrispondente: Capacci Fausto Via Laterina, 8 cap. 53100 Siena. Fax: 0577-233938.

The water budget of the Roja drainage basin

ABSTRACT: The investigated drainage basin of the River Roja lies in the Liguria Region of Italy and in the French Maritime Alps ; the study was completed within the context of the European Community Project Interreg IIIA Alcotra "Eurobassin - Piano di bacino transfrontaliero del Fiume Roja". The study aimed to estimate the total water resource in the basin and its surface and ground water distribution and referring to the average hydrological year 1969-1998. Water budget results indicate that the potential water resource at the mouth is equal to $372 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$; the sum of the total internal resource and the external input of groundwater yields the total renewable natural resource, which is equal to $504 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$. Findings suggest that the strategic importance of the basin is such that an integrated Italian-French monitoring system must be planned and implemented.

Key terms: Hydrogeology, Water balance, Runoff on a physiographic basis, Basin planning

Termini chiave: Idrogeologia, Bilancio idrico, Deflusso su basi fisiografiche, Piano di Bacino

Riassunto

L'area indagata è il bacino idrografico del Fiume Roja (670 km^2) situato nella Regione Liguria (Italy) e nel distretto francese delle Alpi Marittime; l'indagine è stata eseguita in adempimento del D.Lgs. 152/2006 ed è inserita nel Progetto della Comunità Europea Interreg IIIA Alcotra "Eurobassin - Piano di bacino transfrontaliero del Fiume Roja".

Scopo dello studio è la valutazione delle risorse idriche complessive del bacino e della loro ripartizione in superficiali e sotterranee con riferimento all'anno idrologico medio 1969-1998.

I risultati del bilancio idrico mostrano che la risorsa idrica potenzialmente utilizzabile alla foce è pari a 372×10^6 di m^3/anno ; la somma della risorsa totale interna con l'apporto sotterraneo esterno fornisce la risorsa rinnovabile totale naturale, che è risultata pari a $504 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$.

Lo studio ha anche evidenziato che l'importanza strategica del bacino giustifica la progettazione e la programmazione di un sistema integrato italo-francese di rilevamento finalizzato ad incrementare le conoscenze su usi e spostamenti dei quantitativi d'acqua, per commisurare i consumi alle effettive disponibilità della risorsa rinnovabile, ed a realizzare un'adeguata distribuzione delle stazioni pluvio-termometriche, oggi disomogenea ed insufficiente per valutazioni di maggior dettaglio.

1. Introduzione

Questo studio trova collocazione nell'ambito del Progetto della comunità europea Interreg IIIA Alcotra "Eurobassin - Piano di bacino transfrontaliero del fiume Roja". L'area oggetto di indagine è il territorio relativo al bacino idrografico Transfrontaliero del Fiume Roja, che si estende per circa 670 km^2 nella Regione Liguria e nel distretto delle Alpi Marittime dello stato francese. In particolare circa 70 km^2 ricadono in Italia nella Provincia di Imperia; i rimanenti 600 km^2 sono tutti in territorio francese (Figura 1).

Ai fini di raggiungere una migliore valutazione delle risorse idriche del bacino idrografico in oggetto, tramite l'utilizzo di calcoli di bilancio, primo passo per giungere ad una loro corretta gestione, è necessaria la stima del suo deflusso naturale al netto dei contributi di acqua sotterranea provenienti da bacini limitrofi. Per tale valutazione risultano pertanto di grande utilità le indagini connesse alla definizione ed alla messa a punto di metodologie in grado di calcolare il suddetto deflusso (Barazzuoli et alii, 1989; Barazzuoli e Salleolini, 1992).

In questa ottica è stata effettuata la valutazione delle risorse idriche complessive del territorio in esame e la loro ripartizione in superficiali e sotterranee applicando i criteri proposti da Barazzuoli e Salleolini, 1992 e Barazzuoli et alii, 1994, 1995: questi poggiano su calcoli di bilancio. Le grandezze indagate possono essere sinteticamente espresse con l'equazione: $P = E_r + D + I_e$; dove: P = afflussi; E_r = evapotraspirazione reale; D = deflussi alla

stazione idrometrografica che sottende il bacino; Ie = infiltrazione efficace.



Figura 1 – Ubicazione geografica dell'area di studio
Figure 1 – Map of the area under study

2. Parametri idroclimatici

Lo studio ha comportato la raccolta delle serie storiche dei valori annui di precipitazione e temperatura relative a stazioni di misura sparse sull'intero territorio considerato; i valori termo-pluviometrici utilizzati sono quelli delle stazioni termo-pluviometriche più adatte ai fini del presente studio, cioè quelle con minori lacune nel funzionamento degli strumenti di misura (soprattutto per quanto riguarda i dati di precipitazione che incidono maggiormente sui risultati delle varie elaborazioni).

Al fine di conferire ai valori delle risorse superficiali e sotterranee un maggior grado di estrapolabilità a breve-medio termine, in tutte le stazioni utilizzate è stato preso in considerazione lo stesso arco temporale di riferimento, vale a dire l'A.I. 1969-1998, consentendo così un preciso collegamento con quanto ricavato nella valutazione delle risorse idriche rinnovabili mediante i calcoli di bilancio idrico suddetti.

In un territorio di estensione relativamente limitata come il bacino del Fiume Roja, se si eccettuano condizioni locali di esposizione, sono sostanzialmente due i fattori che determinano una diversificazione del clima: la distanza dal mare, da cui il bacino è limitato a Sud, e l'andamento del rilievo (le Alpi Marittime) o, più semplicemente, l'altitudine.

Com'è ben noto, il mare, per la sua inerzia termica, mitiga il clima dei luoghi circostanti, mentre l'altitudine favorisce condizioni termiche più rigide e, almeno fino alle quote presenti nel bacino, tende ad incrementare le precipitazioni. Si tratta, quindi, di effetti sul clima per

molti aspetti contrastanti, effetti che, data la modesta estensione del territorio, possono interferire ed anche compensarsi tra loro.

2.1. Data-base climatico

In questo studio idrologico il primo passo è stato quello della raccolta dei dati; in particolare, per le analisi del bacino idrografico del fiume Roja sono stati informatizzati e organizzati all'interno di data-base i dati pluviometrici, termometrici e quelli relativi ai deflussi di alcune stazioni idrometrografiche. In totale sono state individuate e inserite nel nostro data-base 131 stazioni pluviometriche (Figura 2), delle quali 66 sono anche termometriche e 11 solo termometriche; queste sono gestite da istituti idrografici italiani e francesi e nel data-base sono state contrassegnate da un COD_UNI (codice) univoco ed identificativo.

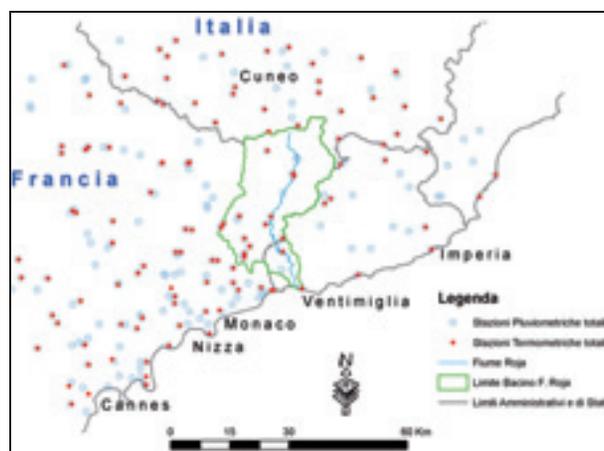


Figura 2 – Stazioni pluviometriche e termometriche totali
Figure 2 – Total rain gauge and thermometric stations

Le lacune di registrazione, incontrate per vari periodi di non funzionamento di alcuni strumenti, sono state colmate (qualora ritenute essenziali alle valutazioni) con il procedimento delle "medie analoghe di Hann" (Tonini, 1983), operando cioè sui dati che, per l'A.I. scelto (1969-1998), sono invece forniti con continuità dalle altre stazioni. Tali lacune hanno riguardato, complessivamente (per l'A.I. 1969-1998), 454 anni pari a circa il 33 % del totale delle stazioni pluviometriche e 285 anni, pari a circa il 30 % del totale per le stazioni termometriche.

2.2. Pluviometria

I dati pluviometrici sono stati organizzati in un data-base, al cui interno sono stati riportati i dati di pioggia mensili relativi a 120 stazioni (per un totale di 3270 anni, nell'Anno-Idrologico medio 1969-1998) delle quali 32 gestite del Servizio Idrografico di Genova dal 1951 al 2004 (pari ad un totale di 1056 anni), di 40 stazioni del Servizio Idrografico di Parma (dal 1951 al 2004 pari ad un totale di 740 anni), ed i dati di pioggia del Servizio Idrografico di Meteo France di 48 stazioni dal 1950 al

2004 (pari ad un totale di 1474 anni).

La distribuzione areale (soprattutto in relazione alla situazione altimetrica) delle stazioni è risultata sia all'interno del Bacino del Roja che nelle sue immediate vicinanze non rappresentativa delle quote superiori ai 1000 m; per ovviare a questo si è reso necessario ricorrere alla tecnica delle stazioni fittizie per individuare (in 6 punti posti in quota sullo spartiacque morfologico, vedi Figura 3) un regime pluviometrico spaziale più adeguato alla locale situazione morfologica. A tali stazioni fittizie si sono attribuiti i valori di pioggia calcolati mediante la ricostruzione di gradienti pluviometrici locali, attraverso una funzione matematica lineare di tipo logaritmico in grado di correlare l'andamento pluviometrico rispetto alla quota. Con tali integrazioni le elaborazioni effettuate hanno consentito di ricavare un valore medio annuo di pioggia a livello di bacino pari a 1104 mm attraverso la redazione della carta delle isoiete di Figura 3 costruita con le tecniche di *gridding* e *contouring*.

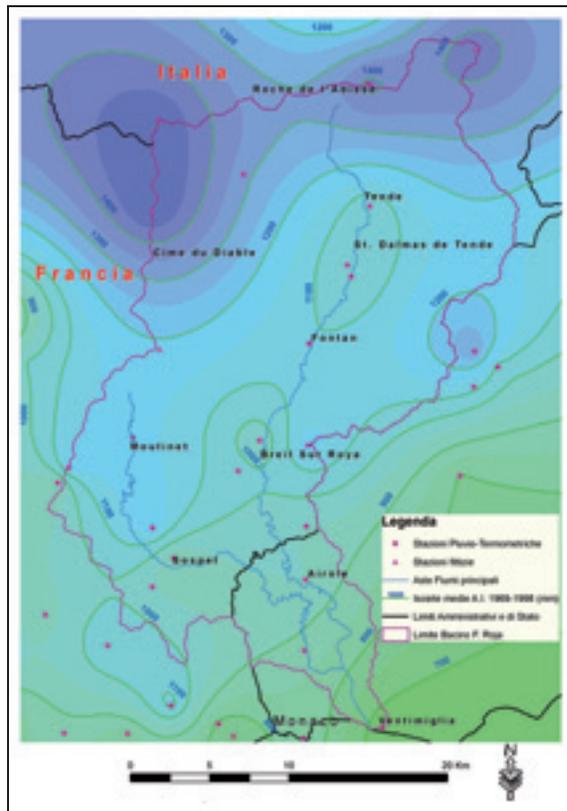


Figura 3 – Carta delle precipitazioni medie annue riferite all'anno idrologico medio (1969-1998)
 Figure 3 – Map of the average annual rainfall related to average hydrological year (1969-1998)

2.3. Termometria ed Evapotraspirazione reale

Anche i dati termometrici sono organizzati in un database, al cui interno sono stati riportati i dati di temperatura media relativi a 77 stazioni dal 1950 al 2004 per un totale di 1568 anni, delle quali 19 gestite dal Servizio I-

drografico di Genova dal 1951 al 2004 pari ad un totale di 556 anni, 29 stazioni gestite dal Servizio Idrografico di Parma dal 1951 al 2004 pari ad un totale di 192 anni e 29 stazioni gestite dal Servizio Idrografico di Meteo France dal 1950 al 2004 pari ad un totale di 817 anni.

Per la valutazione delle temperature medie mensili ed annue relative all'area in esame, ci si è basati sui dati registrati in 32 delle 77 stazioni per un numero totale di 668 anni osservati (Figura 4).

Al fine di omogeneizzare il network termometrico con quello pluviometrico, sono state valutate le temperature medie anche per quelle pluviometriche sprovviste di termometro. Per fare ciò, la ricostruzione dei valori di temperatura delle stazioni è stata effettuata attraverso un modello di correlazione lineare $T_{\text{temperature}} \text{ vs } H_{\text{quota}}$, vale a dire $T = a + (b \times H)$. La distribuzione areale delle temperature, ricavate secondo le tecniche di *gridding* e *contouring*, per il bacino del fiume Roja, è rappresentata in Fig. 4.

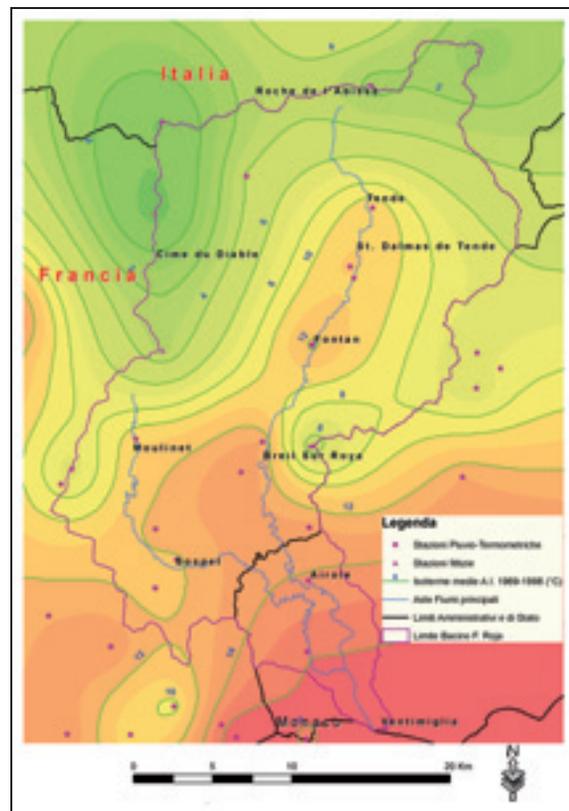


Figura 4 – Carta delle temperature medie annue riferite all'anno idrologico medio (1969-1998)
 Figure 4 – Map of the average annual temperatures related to the average hydrological year (1969-1998)

Con i dati termometrici così integrati si è così potuto procedere al calcolo dell'evapotraspirazione reale (E_r), intendendosi con tale termine la quantità d'acqua effettivamente restituita all'atmosfera sotto forma di vapore, sia per evaporazione diretta che per traspirazione delle piante, all'interno della zona considerata, e questo per ogni

singola stazione utilizzata sia per la pluviometria che per la termometria.

La valutazione dell'evapotraspirazione reale è stata eseguita in base alla metodologia proposta da Thornthwaite & Mather (1957).

Come è noto, tale metodo si basa sul calcolo dell'evapotraspirazione potenziale media mensile (E_{pm}), intendendo con questo termine la quantità d'acqua che evaporerrebbe nel caso in cui, superficialmente, ve ne fosse sempre una disponibilità sufficiente: detto calcolo è fondato sulla relazione sperimentale esistente tra E_{pm} e la corrispondente temperatura (T_m). L'equazione proposta, che fornisce E_{pm} in mm, è la seguente:

$$E_{pm} = K \times 16 \times (10 \times T_m / I)^\alpha$$

dove:

K = coefficiente mensile che tiene conto delle ore di insolazione media mensile ed è funzione della latitudine;

I = indice termico annuale, pari alla sommatoria degli indici mensili (i); $i = (T_m/5)^{1,514}$

α = funzione cubica dell'indice termico annuale data da:

$$\alpha = 0,49239 + (1,792 \times 10^{-5} \times I) - (771 \times 10^{-7} \times I^2) + (675 \times 10^{-9} \times I^3)$$

L'evapotraspirazione potenziale media annua (E_p) si ottiene come somma dei singoli valori mensili.

Successivamente, la determinazione dell'evapotraspirazione reale (E_r) avviene attraverso una procedura indiretta, per la quale ad essa si arriva in funzione di un meccanismo di calcolo subordinato sia alla quantità delle precipitazioni, sia alla capacità di ritenuta dell'acqua da parte del suolo (funzione del tipo di terreno e di vegetazione presente).

Operando in maniera analoga a quanto visto per le piogge, è stata ottenuta la carta dell'evapotraspirazione reale (Figura 5). L'esame di questa evidenzia che i valori massimi di E_r (> di 600 mm) si riscontrano nella parte centrale del bacino (Breil Sur Roja, Fontan). I suoi valori minimi si rilevano invece nelle zone di alta montagna con valori inferiori ai 400 mm. Il valore medio per l'intero bacino è risultato pari a 548 mm (circa il 49 % delle precipitazioni), pari a circa $367 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$.

3. Deflussi

Lungo l'asta del F. Roja e del F. Bevera, hanno funzionato in periodi diversi 5 stazioni idrometriche gestite sia dal Servizio Idrografico di Genova, che dal Servizio di Stato francese, i cui periodi di funzionamento hanno condizionato la scelta dell'A.I. di riferimento per la valutazione delle risorse idriche del bacino (1969-1998).

La valutazione di questo parametro di bilancio, relativamente al Bacino del fiume Roja e ai principali sottobacini (Figura 6), è stata eseguita in due modi diversi:

1) utilizzando i dati idrometrici registrati presso le sezioni fluviali di Torri, S. Dalmat e Breil (riferiti

all'Anno Idrologico medio 1969-1998):

2) adottando una metodologia indiretta che risale ad essi per mezzo della stima del coefficiente di deflusso medio annuo Cd ($Cd = D/P$), effettuata in funzione di alcune caratteristiche fisiografiche e climatiche puntuali dei bacini esaminati (Cd fisiografico, Barazzuoli et alii 1989, 1994, 2000).

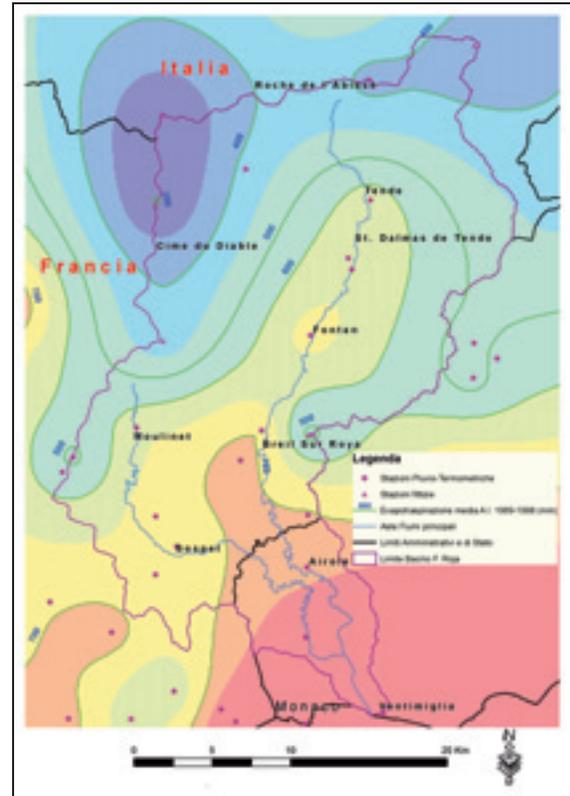


Figura 5 - Carta dell' Evapotraspirazione reale media annua riferita all'anno idrologico medio (1969-1998)

Figure 5 - Map of the average annual actual evapotranspiration related to the average hydrological year (1969-1998)

3.1. Deflussi strumentali (Ds) e regime dei principali corsi d'acqua

I deflussi strumentali utilizzati derivano dai dati di portata registrati nelle stazioni idrometrografiche utilizzate.

Dopo un'attenta analisi del regime delle portate massime, minime e medie di Breil, S. Dalmat e Torri, sui contributi unitari medi, sul confronto afflussi vs deflussi, è apparsa chiara una differenza nel regime tra il F. Bevera ed il F. Roja.

Queste differenze nel regime dei due corsi d'acqua possono essere imputabili:

1. a cause naturali; essenzialmente agli afflussi nevosi molto più copiosi nel Roja che nel suo affluente Bevera. Questi si traducono in termini di deflusso temporalmente sfasati rispetto alle precipitazioni che li hanno generati.

2. a cause antropiche essenzialmente attribuibili a sbarramenti artificiali e condotte ad uso idroelettrico dell'area dell'alto Roja (a monte di S. Dalmat e di Breil).

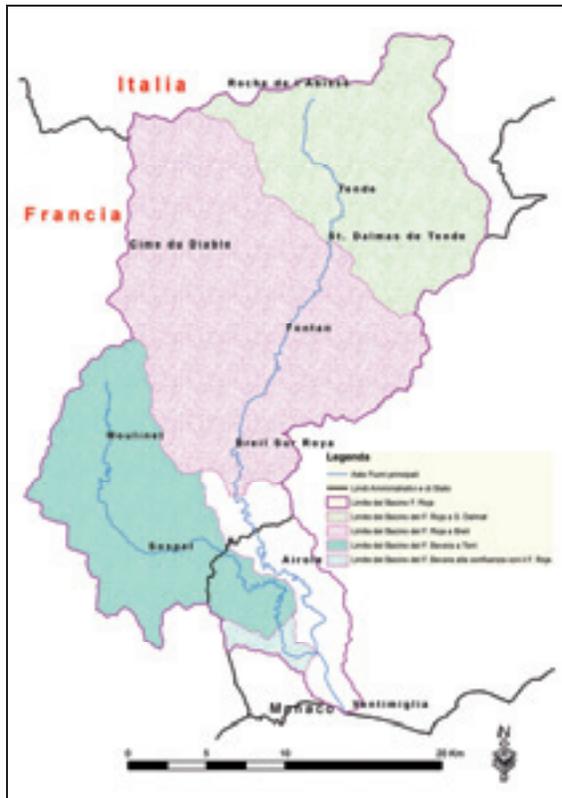


Figura 6 – Limiti del Bacino e dei sottobacini del Fiume Roja
Figure 6 – Limits of Roja river basin and sub-basins

L'uso idroelettrico, però, non da luogo a consumi d'acqua e le alterazioni si traducono solo in un lisciamento delle portate massime e minime (regimazione). Stante ciò le misure indicano un deflusso medio annuo che, sempre in relazione all'A.I. 1969-1998, è di $88 \times 10^6 \text{ m}^3$ per il Roja a S. Dalmat, $372 \times 10^6 \text{ m}^3$ per il Roja a Breil e $76 \times 10^6 \text{ m}^3$ per il Bevera a Torri.

3.1.1. Ricostruzione dei Deflussi strumentali del Roja alla Foce

Per giungere ad una più corretta valutazione delle risorse idriche riferibili all'intero bacino del Roja, si è proceduto ad una valutazione indiretta del deflusso strumentale del fiume in corrispondenza della Foce tramite la ricerca di una correlazione Deflusso vs Superficie, una sia per il Bacino del Bevera che per quello del Bacino del Roja (escluso il contributo del fiume Bevera). La miglior correlazione ricavata, tenendo conto dei contributi annui al deflusso dei vari sottobacini attraversati (S. Dalmat, Breil e Torri) e monitorati, è risultata, per ambedue i fiumi, quella di tipo lineare.

3.2. Deflusso fisiografico (Df)

La valutazione dei deflussi competenti ad un bacino idro-

grafico può essere effettuata attraverso una metodologia che, prescindendo da limitazioni territoriali e strumentali, offre la possibilità di risalire ad essi per mezzo della stima del coefficiente di deflusso effettuata in funzione ad alcune caratteristiche fisiografiche e climatiche (Barazzuoli et alii, 1986, 1987a, 1987b, 1989, 1994, 1995) dell'area esaminata. Il metodo consiste nel calcolare il coefficiente di deflusso medio annuo Cdf ($Cdf = Df/P$) di un bacino come somma di tre componenti (C_a, C_v, C_p) relative all'influenza esercitata sul deflusso rispettivamente dall'acclività, dalla copertura vegetale e dalla permeabilità.

Per ognuna delle tre componenti, il contributo al Cdf è ricavato da carte tematiche (Figure 7, 8 e 9), dove i valori del parametro considerato sono ripartiti in classi, a ciascuna delle quali è attribuito un particolare coefficiente in funzione delle caratteristiche climatiche generali della zona espresse dall'indice di aridità medio annuo (Ia).

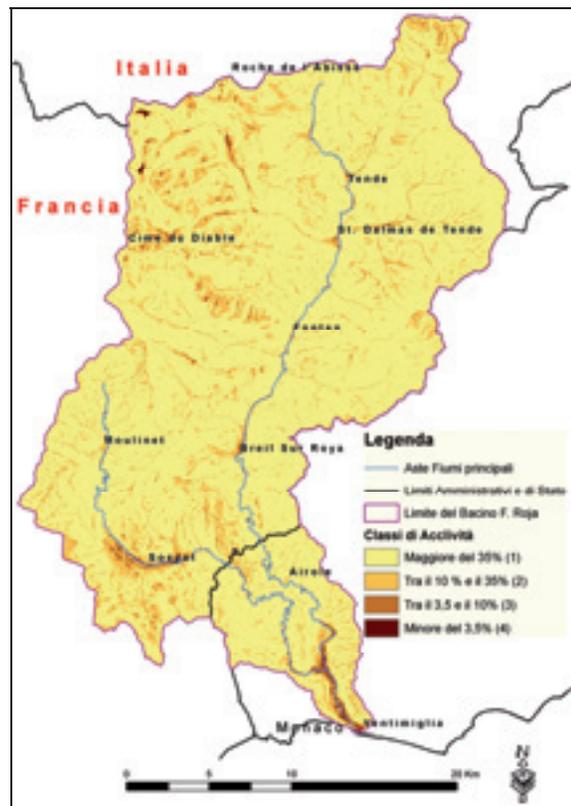


Figura 7 – Classi di Acclività secondo il metodo Kennessey
Figure 7 – Slope classes according to the Kennessey method

4. Confronto tra Cd fisiografico e Cd strumentale

Come già accennato, il valore del coefficiente di deflusso su basi fisiografiche si ottiene dalla somma dei singoli contributi apportati dalle anzidette tre componenti:

$$Cdf = C_a + C_v + C_p$$

Si deve osservare che il Cdf (fisiografico), non è altro

che un valore rappresentativo della “potenzialità” di deflusso superficiale e che perciò sarà tanto più simile al Cds (strumentale) quanto meno influiranno quelle condizioni (antropiche e/o naturali) capaci di provocare delle variazioni importanti nella misura dei volumi idrici di deflusso, vale a dire:

1 Interventi antropici sul bacino in relazione all’uso dell’acqua che possono portare variazione sia positive sia negative al valore del deflusso;

2 Possibili cospicui scambi idrici sotterranei con l’esterno del bacino legati alla mancanza di coincidenza con lo spartiacque morfologico e quello idrogeologico (acque sotterranee in entrata nel Bacino esaminato).



Figura 8 - Carta della Vegetazione secondo il metodo Kennessey
 Figure 8 – Vegetation classes according to the Kennessey method

In definitiva, il Cds (Cd strumentale) non deve essere ritenuto espressione della sola potenzialità di deflusso del bacino in esame, ma la risultante di tutti gli interventi naturali ed antropici che in questo possono intervenire. Infatti, in relazione alle suddette condizioni, esso può presentare valori maggiori o minori di quelli dovuti alle sole caratteristiche fisiografiche locali interne al Bacino (dalle quali dipende invece il Cdf).

Tutte le verifiche effettuate in oltre 30 bacini idrografici hanno confermato che il deflusso fisiografico corrisponde a quello totale naturale al netto dei quantitativi idrici sotterranei scambiati con i bacini adiacenti, assu-

mendo così le caratteristiche di deflusso derivante dai soli apporti pluviometrici interni al bacino idrografico ($D_i = \text{“deflusso da precipitazioni interne”}$ e quindi $D_f = D_i$), e che quindi esso non può assumere valori maggiori dell’eccedenza idrica.

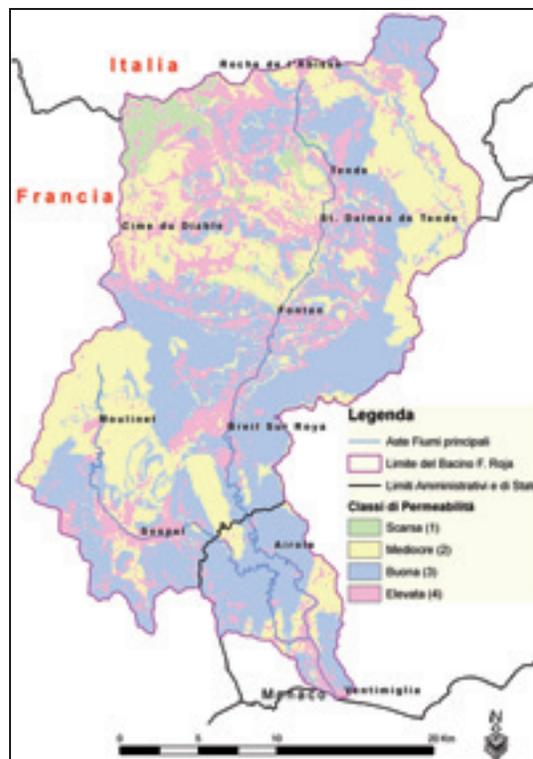


Figura 9 – Classi di permeabilità secondo il metodo Kennessey
 Figure 9 – Permeability classes according to the Kennessey method

I risultati ricavati per il Bacino ed i sottobacini del F. Roja per l’A.I. di riferimento, individuando Cdf sempre inferiori o uguali al CdWs (Tabella 1), soddisfano tale condizione e possono, quindi, ritenersi rappresentativi del deflusso interno dei relativi bacini; essi sono, conseguentemente, utilizzabili per la stesura dei bilanci idrici e la valutazione delle risorse idriche medie sia superficiali che sotterranee (Barazzuoli et alii, 1986, 1987a, 1987b, 1989, 1994, 1995, 2000).

5. Bilanci Idrici: Valutazione delle Risorse Idriche Rinnovabili

La valutazione delle risorse idriche complessive del Bacino del Fiume Roja e la loro ripartizione in superficiali e sotterranee è stata effettuata con i criteri proposti in Barazzuoli & Salleolini (1992) e Barazzuoli et alii (1994, 1995).

5.1 Risorse idriche superficiali e sotterranee tramite il bilancio idrico

Sulla base dei dati idroclimatici raccolti è stata eseguita la

valutazione delle risorse idriche superficiali e sotterranee presenti nel Bacino del Fiume Roja, attraverso l'analisi integrata dei Bilanci idrici (per l'A.I. 1969-1998) redatti con l'utilizzo di varie tipologie di deflusso: strumentale (Ds), interno o fisiografico (Di=Df) e comunque secondo lo schema concettuale illustrato in Figura 10 (alla didascalia di Figura 11 si faccia invece riferimento per l'identificazione delle sigle di seguito riportate).

Tabella 1 – Confronto tra i tre coefficienti di deflusso (Cf, Cs, Cws)

Table 1 – Comparison between the three runoff coefficients (Cf, Cs, Cws)

Bacino e Sottobacino idrografico	Cf (-)	Cs (-)	Cws (-)
Roja a S. Dalmat	0,553	0,448	0,570
Roja a Breil	0,544	0,711	0,544
Bevera a Torri	0,438	0,499	0,462
Bevera alla Confluenza	0,433	0,543	0,445
Roja alla Foce	0,503	0,682	0,504

Il bilancio, eseguito utilizzando il deflusso strumentale (Ds), quasi mai fornisce una valutazione veritiera circa l'entità delle risorse idriche del bacino, salvo i casi, a dir vero rari, in cui si abbia a che fare con bacini aventi scambi idrici sotterranei irrilevanti o nulli per quanto riguarda l'acqua in entrata per via sotterranea (Ise=0). Esso, però ci offre un primo quadro della situazione idrogeologica del bacino nel senso che:

- a) se I_e annua $\gg 0$, vorrà dire che I_e è molto superiore alla I_{se} (se presente);
- b) se I_e annua ca. = 0, vorrà dire che I_e e I_{se} (se presenti) sono dello stesso ordine di grandezza;
- c) se I_e annua $\ll 0$, vorrà dire che I_{se} è molto superiore alla I_e (se presente);

In ogni caso è bene ricordare che il valore di I_e annuo rappresenta sempre un saldo tra le entrate e le uscite di acqua sotterranea dal bacino.

I bilanci sono stati effettuati su tutti i sottobacini del Fiume Roja e dai loro risultati è stato possibile desumere, attraverso gli opportuni confronti e verifiche previste dalla metodologia già illustrata (figura 10), l'entità delle risorse superficiali e sotterranee anche in rapporto a possibili collegamenti sotterranei con i bacini limitrofi.

Qui di seguito verranno illustrati in dettaglio solo i risultati relativi all'intero bacino.

5.2. Sintesi delle valutazioni di Bilancio Idrico: Bacino del Fiume Roja alla Foce

Dall'analisi del bilancio riportato nella sottostante Figura 11 (11a e 11b = schemi di calcolo del Bilancio; 11c = schema concettuale per le interpretazioni del Bilancio e la valutazione della risorsa superficiale e sotterranea) e sintetizzate in Tabella 2 è possibile evincere che, con riferimento all'A.I. 1969-1998, l'eccedenza idrica (Ws) risulta pari a circa $372 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ (50% delle precipitazioni, P) di risorsa rinnovabile e potenzialmente utilizzabile. Questa, in relazione al Bilancio effettuato con il Df (risorsa idrica reale) ed opportunamente comparato con quello strumentale, può essere ripartita in:

- una risorsa totale superficiale (R), dovuta al ruscellamento diretto dell'acqua lungo la rete idrografica, stimabile in circa $235 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$;
- una risorsa totale sotterranea potenziale interna (I-ti), stimabile in circa $137 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, e che corrisponde alla quantità d'acqua di infiltrazione nei terreni permeabili affioranti nel bacino. Tale risorsa è a sua volta suddivisibile in I_e (da ritenersi, nel bacino in oggetto complessivamente assente), che rappresenta la perdita apparente d'acqua sotterranea verso falde emergenti in bacini limitrofi o defluenti direttamente in mare, ed I_{si} (pari a $137 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$), che costituisce invece quella parte di infiltrazione totale interna alimentante falde emergenti dentro

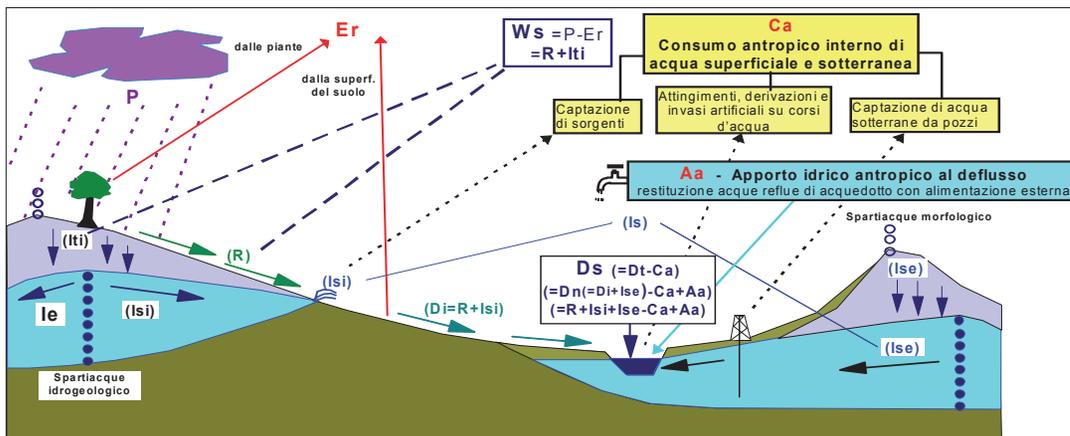


Figura 10 - Schematizzazione concettuale dei rapporti tra i parametri che contribuiscono a definire le risorse idriche di un bacino idrografico (da Barazzuoli et Al., 2000)

Figure 10 – Conceptual diagram of relationships between the parameters that help define the water resources in a river basin

il Bacino del F.Roja e che è, quindi, la risorsa sotterranea interna.

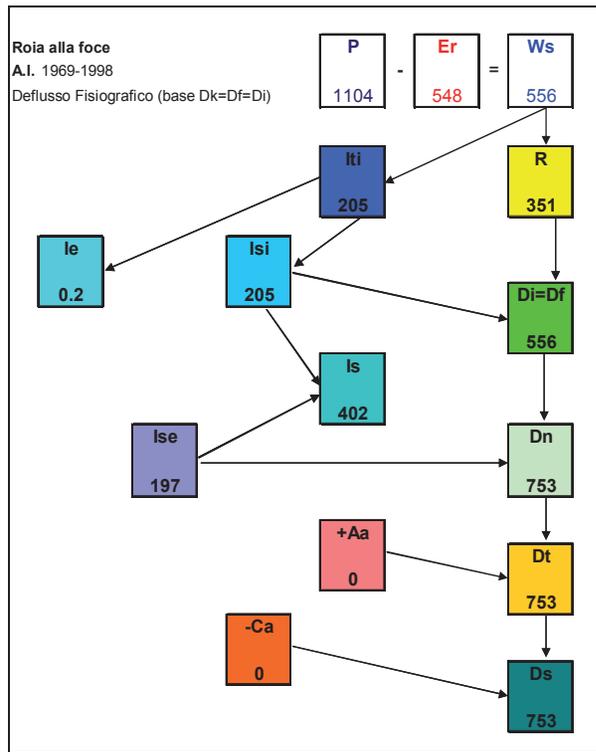


Figura 11 - a) Tabella di bilancio (secondo Thornthwaite & Mather, 1957) e (b, c) di schemi esplicativi dei criteri di calcolo utilizzati per la stima delle risorse idriche superficiali e sotterranee a livello di bacino idrografico (secondo Barazzuoli & Salleolini, 1992; Barazzuoli et alii, 1994, 1995) per l'A.I. 1969-1998: P = afflussi; T = temperatura media dell'aria; i = indice calorico; E_p = evapotraspirazione potenziale; K = coefficiente di correzione astronomica; E_{pc} = evapotraspirazione potenziale corretta; D.id.C = deficit idrico potenziale cumulato; r = riserva idrica del suolo; E_r = evapotraspirazione reale; W_s = eccedenza, rappresenta la risorsa totale potenziale interna al bacino ($P-E_r$ oppure $R+I_{ti}$); d_a = deficit agrario; D_i = deflusso interno in uscita dal bacino attraverso la rete idrografica. In prima approssimazione, questa grandezza può essere valutata direttamente con le misure rilevate nella stazione idrometrografica ($D_i = D_s$). In realtà, esso rappresenta il quantitativo idrico di deflusso, dovuto sia al ruscellamento superficiale che al contributo di acqua sotterranea, direttamente riconducibile alle precipitazioni interne al bacino (del quale costituisce quindi la risorsa totale interna, $R+I_{si}$). Esso può essere valutato per mezzo della stima del coefficiente di deflusso effettuata in funzione ad alcune caratteristiche fisiografiche e climatiche dell'area esaminata (D_f); I_e = infiltrazione efficace, calcolata con la differenza W_s-D_i , rappresenta la porzione di I_{ti} che alimenta falde emergenti all'esterno del bacino (nel caso di coincidenza tra spartiacque morfologico ed idrogeologico e in assenza di intervento antropico sul ciclo dell'acqua, I_e è uguale a zero e quindi $W_s = D_i$); I_{ti} = infiltrazione totale interna, valutata con la somma dei valori mensili positivi d'infiltrazione ricavati dal bilancio o con l'ausilio dei coefficienti di infiltrazione potenziale (I_e+I_{si}), è la risorsa totale potenziale sotterranea interna; I_{si} = infiltrazione delle emergenze interne,

valutata con la somma dei valori mensili negativi d'infiltrazione ricavati dal bilancio o con l'ausilio dei coefficienti di infiltrazione potenziale, rappresenta il contributo delle acque sotterranee interne (sorgenti, falde che emergono direttamente verso corsi d'acqua, ruscellamento ipodermico) al deflusso del bacino, assumendo così le caratteristiche di reale risorsa sotterranea interna; R = ruscellamento superficiale, stimato con la differenza W_s-I_{ti} , corrisponde alla porzione di W_s che alimenta direttamente la rete idrografica (costituisce cioè la risorsa totale superficiale interna); I_{se} = emergenze da infiltrazione esterna, calcolato con la differenza D_n-D_i , corrisponde all'eventuale contributo di acque sotterranee al deflusso provenienti da falde alimentate in bacini adiacenti; I_s = contributo totale di acqua sotterranea al deflusso, valutato con la somma $I_{si}+I_{se}$; D_n = deflusso naturale in uscita dal bacino attraverso la rete idrografica, determinato direttamente con le misure rilevate nella stazione idrometrografica, è la risorsa totale del bacino (D_i+I_{se} oppure $R+I_{si}+I_{se}$); A_a = apporto idrico esterno di origine antropica al deflusso del bacino, rappresenta un quantitativo d'acqua da sottrarre al deflusso strumentale (D_s , cioè misurato) per ricavare quello naturale (D_i-D_n); D_t = deflusso totale, che è costituito dai contributi naturali (sia interni D_i che esterni I_{se} , cioè D_n) con l'aggiunta dell'apporto esterno antropico A_a e che coincide con il deflusso strumentale (D_s) in assenza di consumo interno antropico C_a (D_n+A_a oppure $D_i+I_{se}+A_a$ oppure $R+I_{si}+I_{se}+A_a$); C_a = consumo idrico interno di origine antropica, rappresenta un quantitativo idrico da sommare al deflusso strumentale (D_s , cioè misurato) per ricavare quello naturale (D_i-D_s); D_s = deflusso strumentale, misurato alla stazione idrometrografica posta alla sezione di chiusura del bacino, il cui valore deriva dal saldo di tutte le interferenze naturali ed antropiche al bacino (sia interne che esterne) e che corrisponde al deflusso naturale residuo (cioè, D_n al netto dei consumi C_a) sommato agli apporti A_a (D_i-C_a oppure $D_n-C_a+A_a$ oppure $D_i+I_{se}-C_a+A_a$ oppure $R+I_{si}+I_{se}-C_a+A_a$).

Figure 11 - a) Balance table (according to Thornthwaite & Mather, 1957) and b), c) explanatory diagrams of the calculation criteria used for the assessment of the surface water and groundwater resources, at watershed level (according to Barazzuoli & Salleolini, 1992; Barazzuoli et alii, 1994, 1995) average hydrological year 1969-1998: P = precipitation; T = average air temperature; i = heat index; E_p = potential evapotranspiration; K = coefficient of astronomical correction; E_{pc} = corrected potential evapotranspiration; D.id.C = accumulated potential water deficit; r = soil moisture; E_r = actual evapotranspiration; W_s = water surplus represents the total potential resource within the basin ($P-E_r$ or $R+I_{ti}$); d_a = agricultural deficit; D_i = Internal flow leaving the basin through the hydrographic network.

As a first approximation, this magnitude can be evaluated directly with the measurements taken in the hydrometric stations ($D_i = D_s$). In reality, it represents the quantity of water runoff due to both surface runoff and to the contribution of groundwater, directly attributable to precipitation within the basin (of which it therefore forms the total internal resource, $R+I_{si}$).

It can be evaluated by carrying out an estimate of the runoff coefficient according to certain climatic and physiographic characteristics of the area examined (D_f);

I_e = effective infiltration, calculated with the difference W_s-D_i , represents the part of I_{ti} that feeds aquifers emerging outside the basin (if the morphological and hydrogeological watersheds coincide and in the absence of human intervention on the water

cycle, I_e is equal to zero and then $W_s = D_i$);

I_{ti} = total internal infiltration, evaluated with the sum of the monthly positive infiltration values obtained from the balance or using the potential infiltration coefficients ($I_e + I_{si}$), is the potential total underground internal resource;

I_{si} = infiltration of internal springs, estimated with the sum of the monthly negative infiltration values obtained from the balance or with the help of potential infiltration coefficients, represents the contribution of the internal groundwater (springs, aquifers that flow directly towards watercourses, subsurface runoff) to the basin runoff and therefore is the actual internal groundwater resource;

R = surface runoff, estimated by the difference $W_s - I_{ti}$, corresponds to the part of W_s that directly feeds the hydrographic network (therefore it is the total internal surface resource);

I_{se} = springs from external infiltration, calculated by the difference $D_n - D_i$, this corresponds to the possible contribution to runoff made by the groundwater from aquifers that are fed in adjoining basins;

I_s = total groundwater contribution to runoff, calculated by the sum of $I_{si} + I_{se}$;

D_n = natural runoff leaving the basin through the hydrographic network, determined directly by the measurements of the hydrometric station, is the total resource of the basin ($D_i + I_{se}$ or $R + I_{si} + I_{se}$);

A_a = external anthropogenic contribution to the basin's runoff, represents a quantity of water to be deducted from the measured runoff (D_s) in order to obtain natural runoff ($D_t - D_n$);

D_t = total runoff, is composed of the natural contributions (both internal D_i and external I_{se} , i.e. D_n) and the external anthropogenic contribution A_a and, therefore, coincides with the measured runoff (D_s) in the absence of internal anthropogenic consumption C_a ($D_n + A_a$, $D_i + I_{se} + A_a$ or $R + I_{si} + I_{se} + A_a$);

C_a = internal anthropogenic water consumption, represents a quantity of water to be added to the measured runoff (D_s , i.e. measured) in order to obtain (D_s , that is measured) in order to obtain natural consumption ($D_t - D_n$);

D_s = measured runoff, at the hydrometric station located at the section of closure of the basin, its value derives from the balance of all natural and anthropogenic interference in the basin (both internal and external) which corresponds to the residual natural runoff (i.e. D_n net of consumption C_a) added to the contributions A_a ($D_t - C_a$, $D_n - C_a + A_a$, $D_i + I_{se} - C_a + A_a$ or $R + I_{si} + I_{se} - C_a + A_a$).

E' bene precisare che tali valori di risorsa sotterranea non comprendono solo le portate delle sorgenti individuabili come tali, ma anche quelle relative ad emergenze diffuse, al ruscellamento ipodermico ed all'alimentazione diretta del fiume da parte delle falde ad esso idraulicamente collegate.

La somma dei quantitativi idrici di risorsa superficiale (R) e di quella sotterranea interna (I_{si}) rappresenta la risorsa totale interna o deflusso interno ($D_i = R + I_{si} = 372 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$); la somma di quest'ultima grandezza con l'eventuale apporto sotterraneo esterno (I_{se}) definisce invece la risorsa rinnovabile totale naturale o deflusso naturale D_n (in pratica, $D_n = D_i + I_{se}$). Avendo stimato il valore dei contributi sotterranei esterni (I_{se}) in ca. $132 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, il deflusso naturale (D_n) è stimabile in $504 \times$

$10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$; questo in virtù di apporti e consumi antropici considerati nulli ($A_a = 0$; $C_a = 0$).

Tabella 2 – Riassunto della valutazione delle risorse idriche con C_{ds} e C_{dk} tramite i calcoli di bilancio con i vari tipi di deflusso per il Bacino del Roja alla Foce

Table 2 – Summary of the evaluation of water resources by C_{ds} and C_{dk} through balance calculations with various types of runoff for the Roja basin at the mouth

TABELLA RIASSUNTIVA DELLA VALUTAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE				
BACINO DEL FIUME	Roia alla foce	A.I.	1969-1998	
VALORI IN MILIONI DI MC/ANNO			CdS	CdK
Afflussi	P		739	739
Evapotraspirazione Reale	Er		367	367
Eccedenza Idrica	Ws		372	372
Infiltrazione totale	Iti		81	137
Infiltrazione efficace	le		0	0
Contributo sorgenti interne	Isi		81	137
Ruscellamento	R		291	235
Deflusso da contributi interni	Di		372	372
Contributo sorgenti esterne	Ise		132	132
Contributo sorgenti totale	Is		213	269
Deflusso naturale	Dn		504	504
Apporti idrici esterni Antropici	Aa		0	0
Deflusso totale	Dt		504	504
Consumi idrici Antropici	Ca		0	0
Deflusso strumentale	Ds		504	504

Vista la presenza di alcuni interventi di tipo antropico nel regime dei deflussi (dighe con centrali idroelettriche), si è reputato utile (anche al fine di confrontare i dati misurati) elaborare i modelli di bilancio con i valori di deflusso di S. Dalmat, di Breil e quelli ricostruiti alla Foce del Fiume Roja corretti e ripartiti secondo le caratteristiche del bacino del Bevera alla stazione idrometrografica di Torri privo di sbarramenti artificiali. Il confronto tra i diversi bilanci è osservabile nelle Tabelle 3 e 4.

Come era prevedibile le differenze che si osservano riguardano la ripartizione della risorsa totale potenziale interna del Bacino (W_s), sia in termini di risorsa superficiale (R), che in termini di risorsa sotterranea (I_{ti}).

Infatti se si analizza il bacino di San Dalmat si può vedere come il ruscellamento superficiale passa dal 38% (rispetto alle precipitazioni P) al 46% (percentuale valutata correggendo il regime del deflusso secondo quello registrato a Torri), mentre, ovviamente, il quantitativo della risorsa sotterranea diminuisce passando dal 19% all'11% (sempre rispetto alle precipitazioni P).

Anche alla foce si assiste al medesimo fenomeno: il ruscellamento aumenta passando dal 32% (nel caso del deflusso non corretto) al 42%, mentre l' I_{ti} diminuisce passando dal 19% a circa il 9% (nel caso del deflusso corretto) delle precipitazioni.

Tabella 3 – Risultato dei Bilanci per il Bacino del Roja alla Foce e dei suoi sottobacini con l'utilizzo del Di (risorsa reale) confrontabili con i valori dei deflussi strumentali non corretti

Table 3 – Water balances for the Roja basin at the mouth and its sub-basins with the use of Di (actual resources) compared with the non corrected values of measured runoff

TABELLA RIASSUNTIVA DELLA VALUTAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE A.I. 1969-1998 (non-corretto)						
BACINO DEL FIUME ROJA		Bevera a Torri	Bevera a Confluenza Roia	Roia a S. Dalmat	Roia a Breil	Roia alla foce
VALORI IN MILIONI DI MC/ANNO		CdK				
	km ²	149,9	159,7	166,8	454,4	668,9
Afflussi	P	153	161	196	523	739
Evapotraspirazione Reale	Er	82	90	85	238	367
Eccedenza Idrica	Ws	71	72	112	285	372
Infiltrazione totale	Iti	20	19	37	101	137
Infiltrazione efficace	Ie	4	2	3	0	0
Contributo sorgenti interne	Isi	17	17	34	101	137
Ruscigliamento	R	50	52	75	184	235
Deflusso da contributi interni	Di	67	70	109	285	372
Contributo sorgenti esterne	Ise	9	18	0	87	132
Contributo sorgenti totale	Is	26	35	34	188	269
Deflusso naturale	Dn	76	88	109	372	504
Apporti idrici esterni Antropici	Aa	0	0	0	0	0
Deflusso totale	Dt	76	88	109	372	504
Consumi idrici Antropici	Ca	0	0	21	0	0
Deflusso strumentale	Ds	76	88	88	372	504

Tabella 4 – Risultato dei Bilanci per il Bacino del Roja alla Foce e dei suoi sottobacini con l'utilizzo del Di (risorsa reale) confrontabili con i valori dei deflussi strumentali corretti

Table 4 – Water balances for the Roja basin at the mouth and its sub-basins with the use of Di (real resource) compared with the values of the corrected measured runoff

TABELLA RIASSUNTIVA DELLA VALUTAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE A.I. 1969-1998 (corretto)						
BACINO DEL FIUME ROJA		Bevera a Torri	Bevera a Confluenza Roia	Roia a S. Dalmat	Roia a Breil	Roia alla foce
VALORI IN MILIONI DI MC/ANNO		Cdi				
	km ²	149,9	159,7	166,8	454,4	668,9
Afflussi	P	153	161	196	523	739
Evapotraspirazione Reale	Er	82	90	85	238	367
Eccedenza Idrica	Ws	71	72	112	285	372
Infiltrazione totale	Iti	20	19	21	45	63
Infiltrazione efficace	Ie	4	2	3	0	0
Contributo sorgenti interne	Isi	17	17	18	45	62
Ruscigliamento	R	50	52	91	240	309
Deflusso da contributi interni	Di	67	70	109	285	372
Contributo sorgenti esterne	Ise	9	18	0	87	132
Contributo sorgenti totale	Is	26	35	18	132	194
Deflusso naturale	Dn	76	88	109	372	504
Apporti idrici esterni Antropici	Aa	0	0	0	0	0
Deflusso totale	Dt	76	88	109	372	504
Consumi idrici Antropici	Ca	0	0	21	0	0
Deflusso strumentale	Ds	76	88	88	372	504

La motivazione delle differenze tra i due tipi di valutazioni risiede nel fatto che con tale correzione si va ad ipotizzare, anche nei sottobacini di S. Dalmat e Breil, un clima più temperato e caratterizzato da minori quantitativi di precipitazioni di tipo nevoso, come avviene per il sottobacino del Bevera a Torri. La neve, che però è comunque presente durante l'anno all'interno dei due sottobacini, viene pertanto "contabilizzata" dal modello come

risorsa sotterranea, "immagazzinata" per un certo periodo dal bacino (Iti), che poi "riemerge" e contribuisce al deflusso interno dello stesso ($Di=Dn=R+Is$) simulando un contributo di "acqua sotterranea" al Deflusso. Quindi è concettualmente più corretto valutare le risorse del Bacino utilizzando i "deflussi non corretti" in quanto più rappresentativi dell'andamento climatologico dell'area in esame.

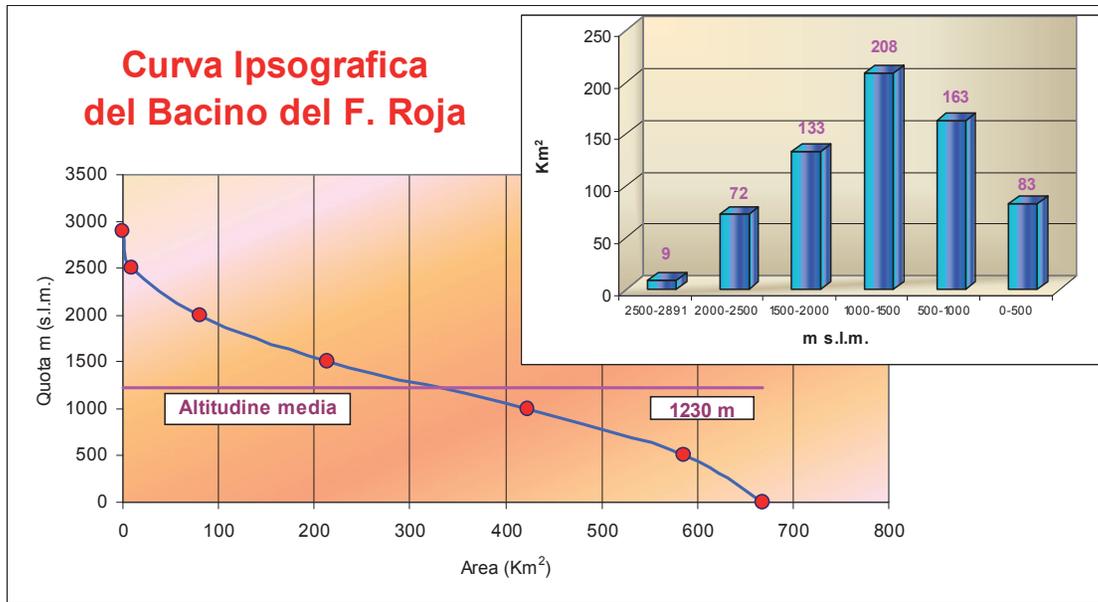


Figura12 – Curva ipsografica rappresentativa della distribuzione areale dell’altimetria del Bacino del Fiume Roja (linea azzurra); quota media del bacino (linea magenta)

Figure 12 – Hypsographic curve representative of the areal distribution of the altimetry of the Roja basin (blue line); average altitude of the basin (magenta line)

6. Considerazioni conclusive

Le elaborazioni effettuate a livello di bacino idrografico consentono di pervenire ad una valutazione attendibile della potenzialità idrica superficiale e sotterranea del territorio in esame.

Il Progetto Interreg III Alcotra Italia/Francia (Euro-bassin) costituisce senz’altro un primo passo fondamentale nella direzione della tutela e conservazione delle risorse idriche superficiali e sotterranee di questo territorio. Sarebbe quindi necessario definire quanto prima un’efficace programmazione delle attività future volta a razionalizzare la raccolta e la gestione dei dati idroclimatici (Piogge, Temperature, Deflussi) con particolare riguardo alla prosecuzione del monitoraggio delle stazioni oggi esistenti, ma tenendo presente che la densità delle medesime può essere aumentata per migliorare le valutazioni sul territorio.

In particolare:

- Le stazioni idrometrografiche esistenti appaiono numericamente insufficienti per consentire dettagliate analisi sulle risorse idriche del bacino. Infatti, i dati che ci sono stati forniti riguardano, ad esclusione della stazione idrometrografica di Torri, misurazioni che risultano alterate da interventi antropici (S. Dalmat, Breil e Airole), inoltre la distribuzione delle stazioni non appare omogenea rispetto alle caratteristiche del Bacino. A nostro avviso, sarebbe necessaria l’aggiunta di almeno altre tre stazioni idrometrografiche: due poste a monte di ciascun invaso, rispettivamente di S. Dalmat e Breil, in modo da

poter valutare quantitativamente le modalità di prelievo e di rilascio delle centrali e quindi poterle correttamente considerare nei calcoli di bilancio; l’altra ubicata in prossimità della Foce del Roja e comunque a valle della confluenza con il Bevera, in modo da poter monitorare con maggior dettaglio, sia gli apporti di questo affluente, che i valori delle risorse idriche superficiali e sotterranee dell’intero bacino del Roja.

- La distribuzione delle stazioni termopluviometriche è disomogenea rispetto alla morfologia del Bacino. Dal grafico di figura 12, dove è possibile vedere la distribuzione areale delle fasce altimetriche caratterizzanti l’intero Bacino del fiume Roja, si osserva come circa 208 Km² siano caratterizzati da un’altitudine compresa tra i 1000 e i 1500 m s.l.m., circa 133 Km² abbiano un’altitudine tra i 1500 e 2000 m, circa 81 Km² ricadano oltre i 2000 m e solo circa 246 Km² appartengano a quote inferiori ai 1000 m. Se però si analizza la distribuzione attuale delle stazioni termo-pluviometriche, si osserva come la quasi totalità di esse ricada all’interno della fascia ≤ 1000 m s.l.m., solo una è ubicata tra i 1500 e 2000 m s.l.m., mentre le altre fasce altimetriche sono completamente prive di stazioni.

- A causa di questa disomogenea distribuzione si è ricorso all’utilizzo di ben sei stazioni fittizie, dato che quindi ben 330 Km² del Bacino (circa la metà, come si vede da Figura 12) sono coperti solamente da una stazione pluviometrica. Dato che la quota media del bacino è di circa 1230 m, ben si capisce come agisca tale carenza di

stazioni di misura a quote elevate sulle reali valutazioni degli afflussi meteorici, i quali costituiscono, notoriamente, l'input dei modelli usati per le valutazioni di tipo idrologico.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano vivamente la Provincia di Imperia

(capofila) ed in particolare il Dr. Ennio Rossi, la Regione Liguria, così come il BRGM ed EdF (Electricité de France) per la parte francese. La Regione Provence Alpes Côte d'Azur, il Département des Alpes Maritimes così come la Città di Mentone che hanno partecipato al finanziamento del progetto.

Bibliografia

- Barazzuoli P., Micheluccini M., Salleolini M. & Salvadori L., 1986 - Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale: 1) Applicazione del "Metodo Kennessey" al bacino del Torrente Farma (Province di Siena e Grosseto) e sua verifica con i calcoli di bilancio. *Boll. Soc. Geol. It.*, 105, 333-350.
- Barazzuoli P., Izzo S., Micheluccini M. & Salleolini M., 1987a - Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale: 2) La carta dei coefficienti di deflusso del bacino del F. Merse (Prov. di Siena e Grosseto). *Mem. Soc. Geol. It.*, 37, 207-213.
- Barazzuoli P., Izzo S., Micheluccini M. & Salleolini M. (1987b) - L'uso della carta dei coefficienti di deflusso nella gestione del territorio. *Atti del VI Congresso Nazionale O.N.G.*, Venezia, 25-27 settembre 1987, 375-382.
- Barazzuoli P., Izzo S., Menicori P., Micheluccini M. & Salleolini M., 1989 - A new practical aid to regional hydrogeologic planning: the runoff coefficient map. *Environmental Management*, 13(5), 613-622.
- Barazzuoli P., Izzo S., Menicori P., Micheluccini M. & Salleolini M., 1989 - L'uso della carta dei coefficienti di deflusso nella gestione del territorio. *Atti VI Congresso Nazionale O.N.G.*, 25-27 settembre 1987 Venezia, 375-382.
- Barazzuoli P. & Salleolini M. 1992 - Evaluation of surface water and groundwater resources in watershed planning: comparison between various estimation methods in Southern Tuscany. *Atti del 76° Congresso S.G.I.*, 21-23 settembre 1992 Firenze, *Mem. Soc. Geol. It.*
- Barazzuoli P., Pizzuto D., Rigati R. & Salleolini M., 1994 - Valutazione delle risorse idriche dell'alto bacino del F. Biferno (Molise): un esempio di utilizzo del deflusso su basi fisiografiche. *Boll. Soc. Geol. It.*, 113(3), 709-728.
- Barazzuoli P., Izzo S., Menicori P., Rigati R. & Salleolini M., 1995 - Uso del deflusso calcolato su basi fisiografiche nella stima delle risorse idriche dell'alto bacino del F. Sinni (Basilicata). *Boll. Soc. Geol. It.*, 115(2), 287-305.
- Barazzuoli P., Renai I., Rigati R. & Salleolini M., 2000 - Hydrologic and hydrogeologic study of the River Taquari watershed (Mato Grosso do Sul, Brazil). Poster presentato al XXXI Congresso Geologico Internazionale, Rio de Janeiro, 6-17 agosto 2000
- De Martonne E.M., 1926 - Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. *La Météorologie*, 2, 449-458.
- Tonini D., 1983 - Elementi di idrografia ed idrologia. Voll. I e II, Ed. Libreria Cortina, Padova.
- Thornthwaite C.W. & Mather J.R., 1957 - Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Centerton, N. J.

Valutazione della suscettibilità da frana mediante un'analisi statistica in ambiente GIS: applicazione al bacino del T. Incinerato (Calabria Meridionale)

Massimo Conforti, Salvatore Critelli, Francesco Muto, Michele Carbone

Dipartimento di Scienze della Terra, Università della Calabria, Arcavacata di Rende (CS)
massimo.conforti@unical.it, critelli@unical.it, mutofr@unical.it

Landslide susceptibility assessment by means statistical analysis in GIS environment: application in the Incinerato catchment (Southern Calabria).

ABSTRACT: The aim of this study has been to evaluate the susceptibility of landslides in the Incinerato Stream catchment (Southern Calabria) using a bivariate statistical analysis and Geographic Information System (GIS). Landslide inventory map of the area has been obtained by detailed field survey and air-photo interpretation. Lithology, fault, land use, slope, aspect and drainage network, were assumed as predisposing factors for landslide occurrences. In order to estimate and validate landslide susceptibility the landslides mapped, were divided in two groups using random partitions method. One group (training set) was used to prepare susceptibility map, using a *Information Value* method in GIS environment and the second group (validation set) to validate the susceptibility map. The validation results showed satisfactory agreement between the susceptibility map and the existing data on landslide locations; therefore, about 80% of the landslides of the validation set is correctly classified falling in high and very high susceptibility areas.

Key terms: Landslide susceptibility, statistical analysis, GIS, Calabria

Termini chiave: Suscettibilità da frana, Statistica bivariata, GIS, Calabria

Riassunto

Lo scopo di questo studio è stato quello di valutare la suscettibilità da frana nel bacino del Torrente Incinerato (Calabria Meridionale), mediante l'applicazione di un metodo di statistica bivariata "*Information Value*" implementato in un sistema GIS (*Geographic Information System*).

La carta inventario delle frane è stata ottenuta da un attento rilevamento di campagna e dall'interpretazione di foto aeree. Per stimare e validare la suscettibilità da frana, i fenomeni franosi cartografati sono stati suddivisi in due gruppi mediante il metodo *random partitions*.

Un gruppo (*training set*) è stato utilizzato per preparare la carta della suscettibilità, il secondo gruppo (*validation set*) è servito per valutare la capacità predittiva della carta di suscettibilità prodotta.

L'applicazione del metodo necessita della selezione di un certo numero di fattori predisponenti di varia natura (geologica, geomorfologica, climatica, ecc.), che si presume siano in qualche modo legate alla generazione dei movimenti in massa.

I fattori predisponenti utilizzati sono litologia, faglie, uso del suolo, pendenza, esposizione dei versanti e reticolo idrografico. L'intersezione, in ambiente GIS, tra i fenomeni franosi del *training set* e ciascun fattore predisponente ha permesso di calcolare la densità areale da

frana nelle varie classi dei fattori causali considerati. Dai valori di densità sono stati calcolati i pesi (W) per ciascuna classe di ciascun fattore predisponente. Procedure di *overlay* delle carte tematiche riclassificate in base ai pesi hanno consentito di elaborare la carta della suscettibilità, suddivisa in cinque classi (molto bassa, bassa, moderata, alta e molto alta). I risultati ottenuti mostrano che il 34 % dell'area del bacino del T. Incinerato ricade nelle classi con suscettibilità alta e molto alta. L'elevata capacità predittiva del metodo è dettata dal fatto che circa l'80 % delle frane del *validation set* ricade nelle aree con suscettibilità alta e molto alta. Infine, la carta di suscettibilità da frana, elaborata utilizzando una metodologia facilmente applicabile ed aggiornabile e basata su dati direttamente rilevati in campo, rappresenta un utile strumento per una pianificazione territoriale finalizzata alla conservazione e alla tutela del paesaggio.

1. Introduzione

La Calabria è tra le regioni d'Italia in cui si registra il più elevato numero di fenomeni franosi causando, spesso, ingenti danni a centri abitati e/o alle infrastrutture con importanti conseguenze economiche e sociali. L'elevata propensione del territorio calabrese a questo fenomeno risulta chiaramente favorita dalle scadenti caratteristiche geo-meccaniche legate ai caratteri primari dei litotipi af-

fioranti e alla loro degradazione per processi di alterazione fisica e/o chimica, nonché dalle elevate energie del rilievo, dovute all'intensa attività tettonica che ha interessato la regione (Sorriso-Valvo & Tansi, 1996a; Tansi *et alii*, 2000). L'interazione dei suddetti fattori ha sicuramente contribuito all'attivazione di tanti fenomeni franosi diffusi in vari contesti morfologici (Sorriso-Valvo & Tansi, 1996b; Parise *et alii*, 1997; Calcaterra *et alii*, 1998; Fantucci *et alii*, 1999; Sorriso-Valvo *et alii*, 1999).

L'obiettivo di questo lavoro è quello di realizzare una zonazione territoriale della suscettibilità da frana nel bacino idrografico del T. Incinerato, situato in Calabria centro-meridionale, considerato altamente rappresentativo, per aspetti geologici, geomorfologici e climatici, di ampi settori della Calabria.

La suscettibilità, intesa anche come pericolosità spaziale (Brabb, 1984), riguarda la propensione di un territorio allo sviluppo di un fenomeno naturale, senza considerare la probabilità temporale del fenomeno (Dai *et alii*, 2002). Nel determinare la suscettibilità da frana quindi si indica l'attitudine di una zona al franamento in relazione alle sue caratteristiche fisiche; pertanto, diversi studi sono stati realizzati per stimare la suscettibilità da frana utilizzando metodi differenti (Carrara *et alii*, 1983, 1995; Yin & Yan, 1988; Van Westen, 1993, 1997; Soeters & Van Westen, 1996; Aleotti & Chowdhury, 1999; Guzzetti *et alii*, 1999; Rautela *et alii*, 2000; Lee *et alii*, 2001, 2002, 2004, 2007; Clerici *et alii*, 2002; Zézere, 2002; Cevik E., Topal T., 2003; Fernandez *et alii*, 2003; Suzen *et alii*, 2004; Catani *et alii*, 2005; Saha *et alii*, 2005; Bartolomei *et alii*, 2006; Conoscenti *et alii*, 2008; Falaschi *et alii*, 2007; Greco *et alii*, 2007; Caniani *et alii*, 2008; Magliulo *et alii*, 2008; Yalcin, 2007, 2008). In generale, le procedure utilizzate si possono suddividere in quattro tipologie: metodi di analisi geomorfologica, mediante i quali si ottengono carte inventario dei fenomeni franosi, metodi euristici, metodi deterministici e metodi di analisi statistiche, bivariata e/o multivariata (Soeters & Van Westen, 1996; Van Westen *et alii*, 1997; Aleotti & Chowdhury, 1999). I primi due approcci sono definiti qualitativi, mentre gli altri due sono detti metodi quantitativi (Aleotti & Chowdhury, 1999). Questi ultimi garantiscono un minor grado di soggettività rispetto ai metodi euristici e risultano idonei per analisi di suscettibilità su vasta area; inoltre, permettono di identificare e di descrivere con maggiore precisione le relazioni esistenti tra fenomeni franosi e fattori predisponenti (Bartolomei *et alii*, 2006).

Nel presente lavoro, per la valutazione della suscettibilità da frana è stato applicato un metodo di statistica bivariata (*Information Value*), ampiamente utilizzato (Yin & Yan, 1988; Van Westen, 1993, 1997; Rautela *et alii*, 2000; Zézere, 2002; Cevik E. & Topal T., 2003; Saha *et alii*, 2005; Yalcin, 2008; Magliulo *et alii*, 2008), implementato in ambiente GIS. La metodologia adottata ha prodotto una zonazione del territorio in gradi diversi di suscettibilità, sintetizzata in un elaborato cartografico di

grande utilità in fase di pianificazione territoriale e per studi preliminari finalizzati alla mitigazione del rischio frana.

2. Area di studio

Il Bacino del torrente Incinerato è posizionato in Calabria centro-meridionale, precisamente sul versante occidentale della Valle del Mesima ed occupa una superficie di circa 41 Km² (Figura 1).

Il torrente si sviluppa prevalentemente con una direzione NE-SO e presenta una lunghezza parallela all'asta principale di 16.3 Km. Esso presenta una forma allungata con uno sviluppo planimetrico fortemente asimmetrico, dovuto essenzialmente al forte controllo tettonico che ha subito l'area (Tortorici, 1979; Ghisetti, 1981). Le quote variano tra i 510 ed i 20 m s.l.m., mentre quella media si attesta intorno ai 221 m s.l.m. La sua pendenza media risulta essere di circa 10° e l'elemento morfologico caratterizzante l'intera area è dato dalla presenza di superfici sub-orizzontali, spesso molto estese che, poste a varie quote, rappresentano i resti di una successione di antichi terrazzi marini (Tortorici *et alii*, 2003). Queste superfici sono state profondamente dissecate dall'azione erosiva dei corsi d'acqua, spesso favorita dal sollevamento tettonico, creando una fitta ramificazione di crinali i quali presentano numerose discontinuità altimetriche.

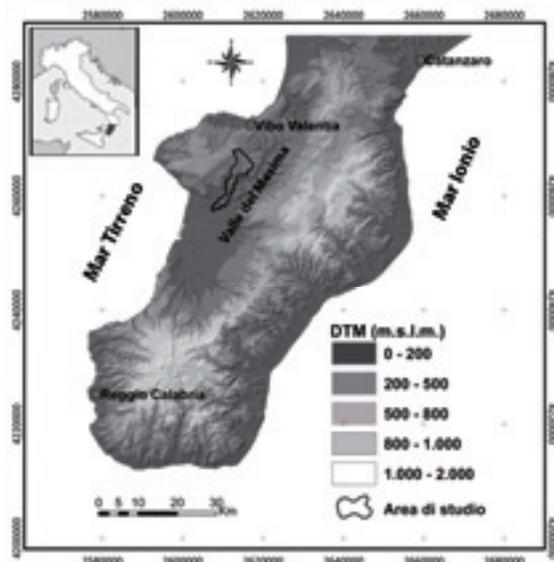


Figura 1– Localizzazione dell'area di studio.

Figure 1 – Location map of the study area.

Le valli hanno una forma generalmente stretta ed allungata, subordinatamente assumono una forma più concava a causa dello sviluppo di movimenti in massa sui versanti che tendono a colmare di detriti gli impluvi. Il reticolo idrografico presenta una gerarchizzazione di quarto ordine con un *pattern* subdentritico (Figura 2).

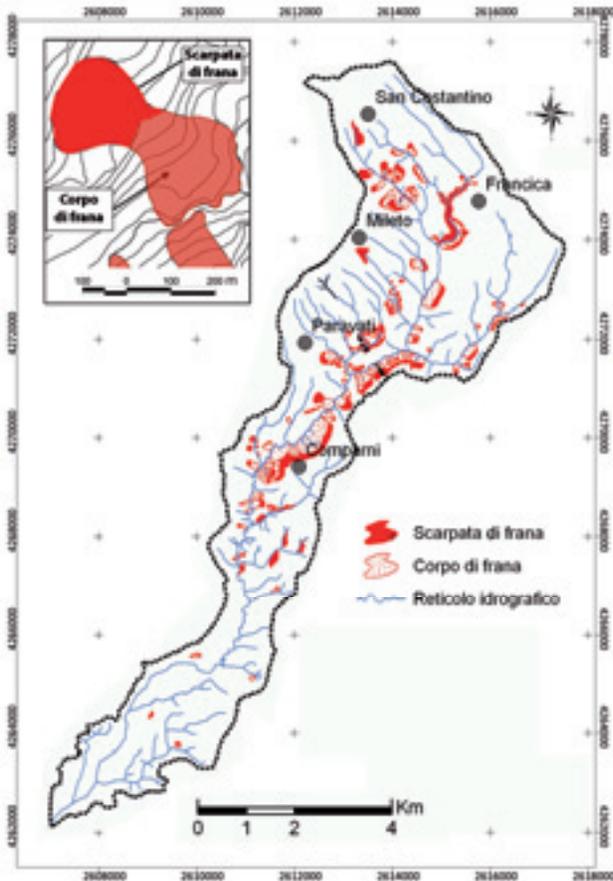


Figura 2 – Carta inventario delle frane.
Figure 2 – Landslide inventory map.

La densità di drenaggio di 2.6 km^{-1} indica, in accordo con i litotipi affioranti caratterizzati da una permeabilità medio-alta, che il reticolo idrografico è poco sviluppato. Tale dato è ulteriormente confermato dal basso valore (3.72 Km^2) della frequenza di drenaggio.

L'analisi dei dati climatici relativi alle stazioni termopluviometriche di Mileto, Vibo Valentia, Pizzoni, Arena, Feroleto della Chiesa, Rosarno, Joppolo, Zungri e Giffone, ricadenti nell'area di studio e nelle aree limitrofe, portano a stimare, per l'intero bacino, un valore medio annuo delle precipitazioni di circa 850 mm ed una temperatura media annua di 17 gradi circa. I mesi più piovosi, generalmente vanno da Novembre a Febbraio e i più siccitosi sono Luglio ed Agosto, dove si registrano i valori più elevati di temperatura.

Dal punto di vista geologico l'area ricade nel bacino sedimentario del Mesima, che rappresenta un'importante struttura a *graben* della Calabria centro-meridionale (Tortorici, 1979; Ghisetti, 1981; De Rosa *et alii*, 2001). Tale bacino è delimitato da importanti faglie normali orientate NO-SE, NE-SO e O-E, probabilmente legate a strutture trascorrenti regionali e trasversali all'arco calabro che si originano a partire dal Tortoniano (Tortorici, 1979; Ghisetti, 1981). Il *graben* del Mesima è bordato ad Ovest

dall'*horst* del M. Poro ed a Est dal massiccio delle Serre (Figura 1). Il riempimento di questo bacino è essenzialmente costituito da rocce sedimentarie neogenico-quaternarie poggianti su un basamento di rocce cristalline paleozoiche. In particolare nel bacino del torrente Incenerato affiorano, in larga parte, argille e sabbie con intercalazioni arenacee che vanno dal Miocene al Pliocene medio; sulle superfici subpianeggianti affiorano dei depositi continentali pleistocenici di colore rossastro, costituiti da conglomerati, conglomerati sabbiosi e sabbie; le zone vallive sono riempite da depositi alluvionali, sovente da materiali colluviali e da depositi di frana. Infine, nella fascia centrale del bacino affiora, in lembi, il calcare evaporitico miocenico, portato in affioramento da una fase erosiva, che ha interessato l'intero bacino del Mesima durante il sollevamento tettonico del Massiccio cristallino delle Serre alla fine del Miocene (Ghisetti, 1981).

3. Materiali e metodi

Il lavoro, nella prima fase, ha riguardato l'acquisizione dei dati necessari per la stima della suscettibilità da frana. In particolare, è stata effettuata l'interpretazione di foto aeree di diversa annata, sono state utilizzate aereofoto del 1991 (scala 1:33000) e del 1998 (scala 1:13000), cui è seguito un rilevamento geomorfologico di campagna che ha portato alla descrizione e cartografazione dei movimenti in massa all'interno del bacino del T. Incenerato. Per tutti i fenomeni gravitativi individuati sono stati distinti sia le scarpate che i corpi di frana (Figura 2). È stata effettuata una caratterizzazione dettagliata delle principali caratteristiche litologiche, utilizzando la carta geologica della Calabria a scala 1:25000 integrata con un rilevamento di superficie. Inoltre, è stata redatta una carta dell'uso del suolo utilizzando la cartografia relativa al progetto *Corine Land Cover* (www.apat.it) ed un'interpretazione delle ortofoto a colori relativi all'anno 2000 (scala 1:10000).

Al fine di ricostruire le caratteristiche topografiche del bacino, mediante l'utilizzo di un *software* GIS (ESRI ArcView GIS 3.2), è stato prodotto un modello digitale del terreno (DTM) con celle di 10 metri di lato. Il DTM è stato realizzato a partire dalla georeferenziazione e successiva digitalizzazione delle curve di livello e dei punti quotati della cartografia topografica a scala 1:10000. Il DTM ha permesso di ricavare in maniera automatica pendenza ed esposizione dei versanti. Inoltre, dalla carta topografica georiferita, è stato digitalizzato il reticolo idrografico dell'intero bacino.

In una seconda fase, tutti i dati geoambientali raccolti sono stati incamerati in un *geodatabase* relazionale e mediante l'applicazione di un metodo di statistica bivariata (Yin & Yan, 1988; Van Westen, 1993; Rautela *et alii*, 2000; Zézere, 2002; Saha *et alii*, 2005; Yalcin, 2008; Magliulo *et alii*, 2008) implementato in ambiente GIS è stata valutata la suscettibilità da frana.

4. Acquisizione dei dati

4.1. Franosità dell'area

Le frane, nel bacino Incinerato, interessano quasi il 10% dell'area e rappresentano uno dei principali processi di modellamento dei versanti. I fattori principali di innesco sono legati alle precipitazioni meteoriche, all'attività tettonica e, subordinatamente, all'attività tettonica dell'area, cui sono associati ricorrenti eventi sismici (Chiodo *et alii*, 1999).

L'azione esercitata dalla gravità si manifesta con intensità e meccanismi diversi a causa della varietà litologica affiorante, il cui comportamento geotecnico e idrologico è diversificato. Durante il rilevamento di campagna sono stati cartografati più di 130 fenomeni franosi (Figura 2), distinti per tipologia di movimento, secondo la classificazione di Varnes (1978). Piuttosto diffusi sono i movimenti franosi di tipo scorrimento, per lo più rotazionali, e subordinatamente si sono osservati fenomeni di colamento, crollo e in misura ridotta frane di origine complessa tipo scorrimento-colata. Dallo studio effettuato è emerso che la distribuzione delle frane si concentra, principalmente, nella parte centrale e apicale del bacino, dove le frane, in particolare, si innescano lungo le valli caratterizzate da versanti con pendenze elevate ($> 20^\circ$). Il settore centrale del bacino, inoltre, è attraversato da una serie di lineamenti strutturali che hanno disarticolato l'assetto morfologico dell'area creando, in molti casi, versanti con un'elevata energia del rilievo che favorisce l'innescio dei fenomeni franosi. La maggior parte (circa l'80%) dei movimenti gravitativi si sviluppa su versanti argillosi e subordinatamente sui versanti sabbiosi. Fenomeni di crollo si originano lungo pareti sub-verticali, costituite principalmente da sabbie e/o conglomerati e, sovente, nelle zone di testata degli impluvi, dove l'innescio è favorito dall'approfondimento e dal conseguente scalzamento al piede del versante operato dai corsi d'acqua in occasione di precipitazioni meteoriche particolarmente intense. Diversi movimenti in massa interessano parte di centri abitati e/o infrastrutture, compromettendo la loro stabilità e comportando una rilevante situazione di pericolo per la popolazione.

Mediante la fotointerpretazione diacronica si è potuto constatare che in molti casi i movimenti gravitativi si sviluppano all'interno di frane pregresse, di maggiore entità, che rappresentano l'effetto della riattivazione parziale delle stesse. Inoltre, i corpi di frana sono spesso rimodellati dai processi di denudazione legati all'azione delle acque dilavanti che, talvolta, ne mascherano la forma originale.

4.2. Fattori predisponenti

Contestualmente alla descrizione ed alla redazione della carta inventario delle frane, è stata effettuata l'analisi di alcuni caratteri geoambientali, scelti come fattori predisponenti da utilizzare nell'analisi per la valutazione della suscettibilità da frana. Nel seguente studio, tenuti presenti

inoltre i principali lavori a livello internazionale (Van Westen, 1997; Rautela *et alii*, 2000; Cevik E, Topal T., 2003; Suzen *et alii*, 2004; Saha *et alii*, 2005; Guzzetti *et alii*, 2005; Lee *et alii*, 2007; Yalcin, 2007; Magliulo *et alii*, 2008), sono stati utilizzati i seguenti fattori predisponenti: litologia, faglie, uso del suolo, pendenza, esposizione dei versanti e reticolo idrografico.

Litologia

La litologia è uno dei parametri fondamentali tra i fattori predisponenti la franosità, dal momento che i fenomeni geomorfologici sono necessariamente controllati dalle caratteristiche meccaniche delle rocce e dei terreni sui quali gli stessi si innescano. Nel presente lavoro, sono state distinte sette diverse litologie, in funzione del loro comportamento geomeccanico. La carta litologica (Figura 3a) evidenzia che nel bacino affiorano principalmente conglomerati e argille; quest'ultime mostrano un'elevata propensione all'innescio dei movimenti in massa. Subordinatamente a queste litologie affiorano sabbie e depositi alluvionali.

Uso del suolo

La presenza ed il tipo di uso del suolo hanno una notevole influenza sulla stabilità di un versante; in generale la presenza di una folta copertura arborea su un versante è favorevole alla sua stabilità, se si considerano frane la cui superficie di scivolamento non sia più profonda degli apparati radicali; invece, può causare instabilità se la superficie di scorrimento è più profonda rispetto alle radici degli alberi (Anbalagan 1992; Pachauri e Pant, 1992; Na garajan *et alii*, 2000). Un terreno denudato e/o con scarsa vegetazione, invece, è più soggetto alla degradazione e all'erosione da parte degli agenti atmosferici e pertanto più suscettibile all'innescio di frane. Nel bacino studiato, sono state riconosciute cinque principali classi di uso del suolo (Figura 3b): zone boscate, colture permanenti, zone agricole eterogenee, seminativi e zone urbanizzate. In particolare, più del 70% dell'area presenta un utilizzo del suolo prettamente agricolo e, secondariamente, il suolo è coperto da boschi.

Pendenza dei versanti

La pendenza rappresenta il principale parametro in una analisi di stabilità dei versanti (Lee e Min, 2001) e per tale motivo è frequentemente utilizzata per valutare la propensione dei versanti all'innescio di frane (Anbalagan 1992; Pachauri *et alii*, 1998; Clerici *et alii*, 2002; Saha *et alii*, 2002; Cevik e Topal 2003; Lee *et alii*, 2004; Lee, 2005; Yalcin, 2007; Magliulo *et alii*, 2008). In generale è stato osservato che all'aumentare della pendenza aumenta la suscettibilità di un versante a franare. Per questa ragione la carta delle pendenze gioca un ruolo determinante nella preparazione della carta della suscettibilità da frana di un territorio. In questo studio l'acclività dei versanti, estrapolata dal DTM, è stata suddivisa in sei classi, e sintetizzata nella carta di Figura 4a. La maggior parte del territorio (58%) presenta un'acclività dei versanti

inferiore a 10 gradi e solo il 4% dei versanti ha una pendenza che supera i 30 gradi

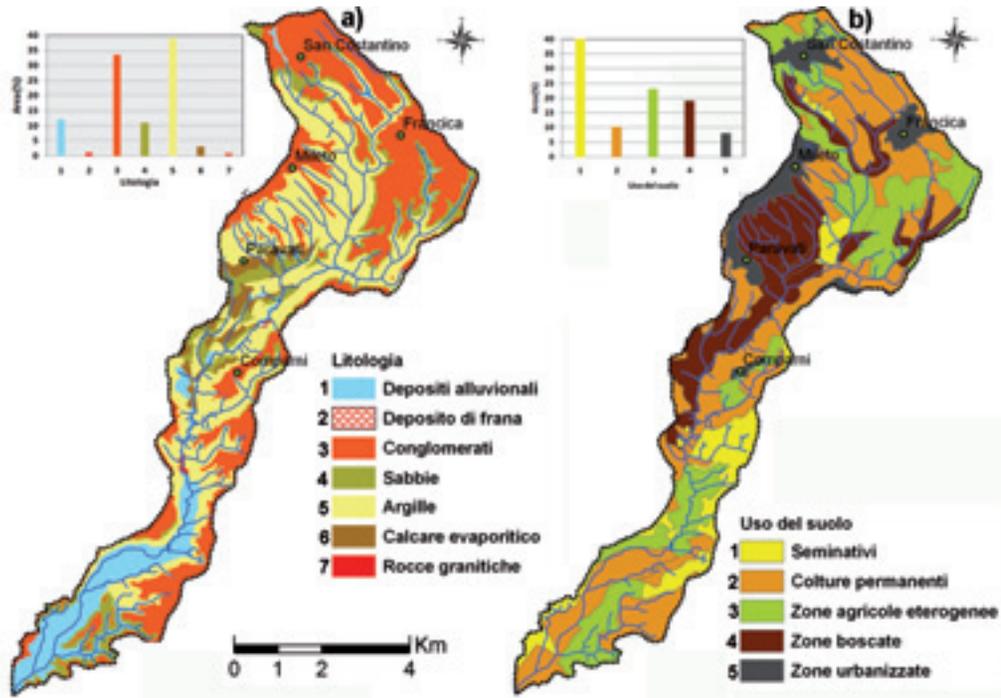


Figura 3 – a) Carta litologica; b) Carta dell'uso del suolo.
 Figure 3 – a) Lithology map; b) Land use map.

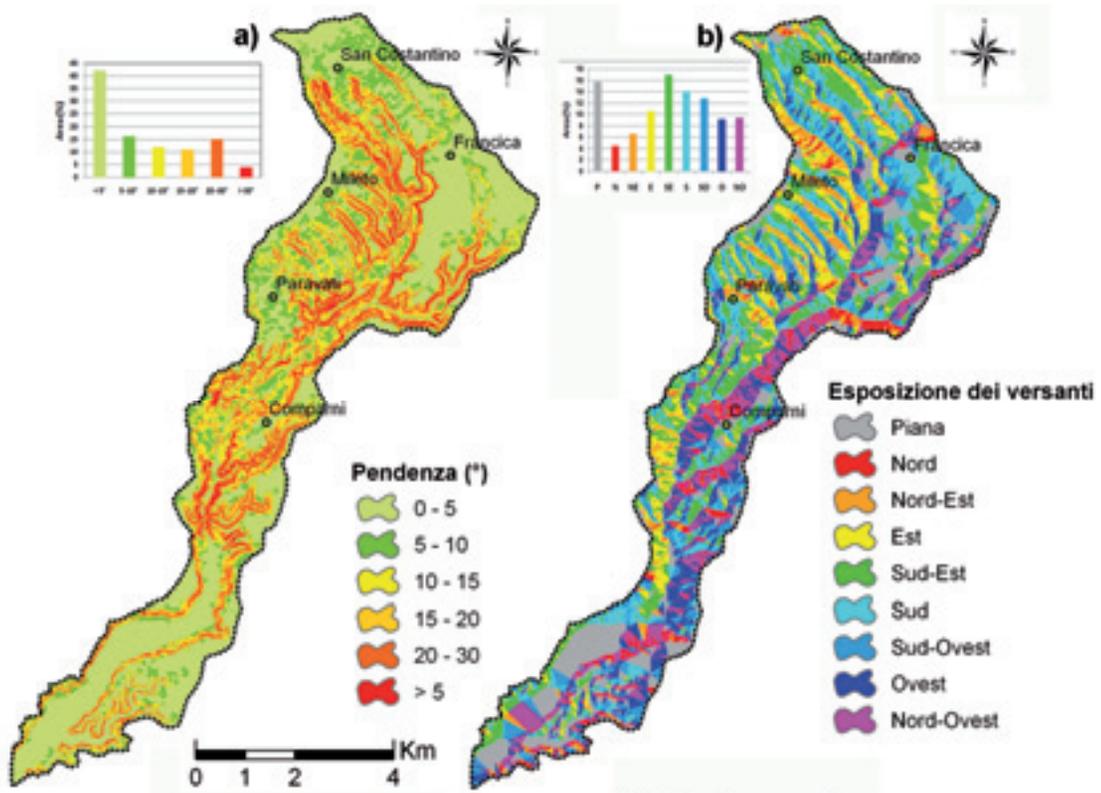


Figura 4- a) Carta delle pendenze; b) Carta dell'esposizione dei versanti.
 Figure 4 – a) Slope map; b) Aspect map.

Esposizione dei versanti

L'esposizione dei versanti è considerata un fattore morfometrico molto importante per il controllo dei processi di erosione, nel caso particolare l'innescio di frane, poiché influenza il microclima attraverso l'angolo e la durata di incidenza dei raggi solari sulla superficie del suolo.

L'esposizione dei versanti può determinare condizioni chimiche e/o meccaniche particolari, favorendo l'alterazione delle rocce e la formazione di coperture e suoli e, pertanto, predisporre a fenomeni di instabilità i versanti. Nel seguente studio la carta dell'esposizione dei versanti (Figura 4b) è stata estrapolata dal DTM ed i relativi valori sono stati suddivisi in 9 classi, 8 delle quali secondo i punti cardinali ed una relativa alle superfici sub pianeggianti. La distribuzione di questo parametro è abbastanza omogenea, con una leggera prevalenza dei versanti rivolti a sud-est.

Distanza dalle faglie

Le relazioni tra frane e strutture tettoniche sono state ampiamente studiate (Sorriso-Valvo & Tansi, 1996a; Parise *et alii*, 1997; Gupta, 2005) e, pertanto le faglie possono essere considerate uno dei principali fattori che predispongono un versante a franare sia per la forte energia del rilievo, che in molti casi creano, sia per l'enorme stato di fratturazione e successiva alterazione che producono sulle rocce. In particolare, per l'area stu-

diata sono state digitalizzate, in forma vettoriale, i lineamenti tettonici della carta geologica della Calabria in scala 1:25000. Successivamente, per valutare l'influenza della tettonica sulla distribuzione dei movimenti in massa all'interno del bacino, per ogni faglia, mediante il software GIS, sono stati creati dei buffering (zone di rispetto) con distanze, rispettivamente di 50m, 100m e >100m (Figura 5a) ed all'interno di ogni zona di rispetto è stata valutata l'area interessata da frana.

Distanza dal reticolo idrografico

Le linee di deflusso idrico superficiale possono avere un'importante controllo sia sulla stabilità di un versante che sul grado di saturazione del terreno lungo il pendio (Saha *et alii*, 2002; Cevik e Topal, 2003; Yalcin, 2007). Infatti, possono compromettere la stabilità del versante, per scalzamento al piede dello stesso o incrementare la presenza di acqua nel terreno che a sua volta può essere la causa innescante di un fenomeno franoso. Per il bacino del T. Incinerato, digitalizzate in forma vettoriale tutte le aste fluviali, come per i lineamenti tettonici, è stata valutata la loro influenza sulla distribuzione dei movimenti in massa; per ogni asta fluviale, sono stati creati quattro buffering con distanze, rispettivamente di 20m, 50m, 100m e >100m (Figura 5b) ed all'interno di ogni zona di rispetto è stata valutata l'area interessata da frana.

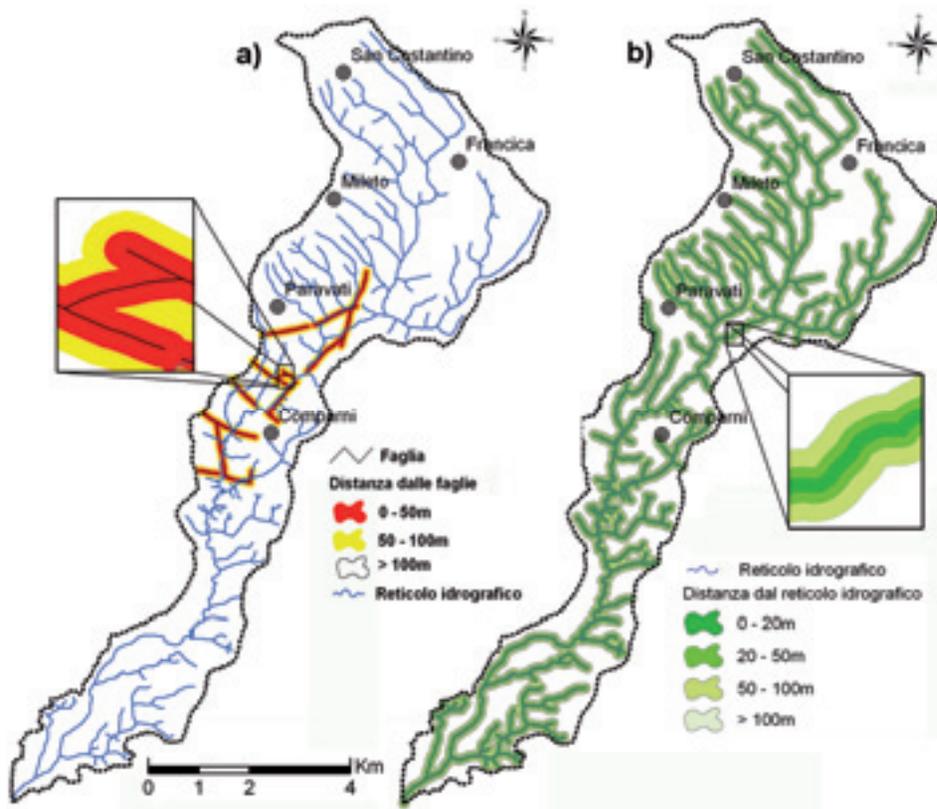


Figura 5 – a) Carta delle distanze dalle faglie; b) Carta delle distanze dal reticolo idrografico.
Figure 5 – a) Distance to fault map; b) Distance to drainage network map.

5. Applicazione e validazione del metodo

5.1. Valutazione della suscettibilità da frana

Per la valutazione della suscettibilità da frana, come in precedenza accennato, mediante un GIS è stato utilizzato un metodo di statistica bivariata - *Information Value* - (Yin & Yan, 1988; Van Westen, 1993, 1997; Rautela *et alii*, 2000; Zézere, 2002; Saha *et alii*, 2005; Yalcin, 2008; Magliulo *et alii*, 2008). L'analisi statistica utilizzata consiste nell'assegnare un "peso" a ciascun parametro segnalato come fattore predisponente (Amanti *et alii*, 1992) e si basa sul teorema di Bayes (Morgan, 1968), secondo il quale ciascuna "frequenza" può essere utilizzata per calcolare le probabilità del verificarsi di un evento franoso futuro (Carrara *et alii*, 1995). Per "frequenza" (o densità) si intende, ad esempio, il rapporto tra le aree realmente in frana per una data classe (es. pendenze comprese tra 10 - 15°) e l'area della classe stessa. Il punto di partenza è quindi la zonazione dell'area di studio in unità aventi caratteristiche comuni (UCU= *unique-condition units*), ovvero in domini omogenei rappresentati da porzioni di territorio che contengono un set di parametri tale da poter differenziare tale area, attraverso confini ben definiti, da quelle adiacenti (Hansen, 1984, Carrara *et alii*, 1995; Guzzetti *et alii*, 1999, Falaschi *et alii*, 2007).

Van Westen (1993) ha proposto che il "peso", per ogni classe di fattori predisponenti (esempio: litologia, pendenze, uso del suolo ecc.) sia definito dal logaritmo naturale della densità delle frane nella classe in esame, diviso la densità di tutte le frane nell'intera area di studio. Il metodo, dunque, è basato sull'applicazione della seguente formula:

$$W = \ln [DensClas/Densmap] = \ln [(NpixSi/NpixNi) / (\sum NpixSi / \sum NpixNi)] \quad (1)$$

dove W è il peso di ciascuna classe di parametri, $Densclas$ è la densità di frane entro la classe di parametri in esame, mentre $Densmap$ rappresenta la densità di frane nell'intera area. $Npix(Si)$ è il numero di *pixels* in frana entro la classe in esame, mentre $Npix(Ni)$ è il numero totale di *pixels* nella classe in esame; $\sum NpixSi$ è il numero totale di *pixels* in frana; $\sum NpixNi$ è il numero totale di *pixels* dell'intero bacino.

Per l'analisi della suscettibilità da frana nel bacino del T. Incinerato, in accordo con (Suzen *et alii*, 2004; Conoscenti *et alii*, 2008; Magliulo *et alii*, 2008), sono state utilizzate le sole scarpate di frana, in quanto rappresentative delle zone di innesco dei fenomeni gravitativi. Le scarpate di frana sono state divise in due gruppi quantitativa mente analoghi adottando una suddivisione *random* (Chung e Fabbri, 2003). Un gruppo (*training set*) è stato utilizzato per costruire il modello di stima della suscettibilità col metodo statistico illustrato, mentre l'altro (*validation set*) è stato impiegato per valutare la capacità previsionale del modello, verificando la percentuale di scarpate di frana del *validation set* che ricadono nelle diverse classi di suscettibilità.

I fattori predisponenti scelti per l'analisi, organizzati ciascuno in un livello informativo a sè stante, suddivisi in classi e convertiti in formato *grid* con celle quadrate di 10 m di lato, sono stati relazionati mediante un'operazione di sovrapposizione in ambiente GIS, con il *grid* "*training set*" delle scarpate di frana.

Per ogni fattore predisponente, è stato calcolato il numero di *pixels* totali di ciascuna classe (ClasTot) e delle scarpate di frana del *training set* (ClasF) ricadenti in ogni classe. Dividendo, per ogni classe, i rispettivi valori di ClasF su ClasTot, si ottiene il parametro denominato "*DensClas*", che indica la densità delle scarpate di frana nella classe in esame. Il rapporto fra il numero totale di *pixels* delle scarpate di frana del *training set* e il numero totale di *pixels* dell'area che racchiude il T. Incinerato fornisce il parametro "*DensMap*". Infine, come indicato nella formula (1), dal logaritmo naturale del rapporto tra *DensClas* e *DensMap* si ottiene il "peso" (W) delle classi di ciascun fattore predisponente. Il logaritmo naturale impone che siano assegnati valori negativi dove la densità di frane è bassa e valori positivi dove la densità è alta (Zezere *et alii*, 2004). Nella Tabella 1, si riportano i fattori predisponenti scelti per l'analisi della suscettibilità, la loro suddivisione in classi e tutti i termini necessari alla determinazione dei relativi pesi. Determinati i pesi W per ciascuna classe di ogni fattore predisponente, le carte tematiche dei fattori predisponenti sono state riclassificate in base ai valori dei pesi ottenuti e, mediante la funzione *Map Calculator* del software Arcview 3.2, sono stati sommati ottenendo così la relativa carta di suscettibilità da frana nel bacino del T. Incinerato, riportata nella Figura 6. Il campo di variabilità dei pesi è stato suddiviso in cinque classi a cui corrisponde un diverso livello di suscettibilità (molto bassa, bassa, moderata, alta e molto alta).

Dall'analisi dei dati ottenuti, è emerso che nel bacino studiato il 34 % dell'area totale ricade nelle classi di suscettibilità alta e molto alta (Figura 6). I valori di suscettibilità più elevati si osservano nella parte centrale del bacino, in concomitanza delle aree di affioramento delle litologie argillose ed in modo particolare sui versanti con pendenza superiore ai 20 gradi. Inoltre, in questo settore l'analisi ha evidenziato il forte controllo strutturale sulla propensione del territorio all'insacco di frane. Ancora, alti valori di suscettibilità si sono ottenuti lungo i versanti delle valli strette e fortemente incise dal reticolo idrografico (Figura 6).

5.2. Validazione del metodo

La validazione del metodo, utilizzato per la stima della suscettibilità da frana, è stata effettuata tramite la realizzazione e l'analisi di due curve: la *prediction-rate* e la *success-rate* (Chung e Fabbri, 2003; Remondo *et alii*, 2003; Conoscenti *et alii*, 2008).

La curva *prediction-rate* è realizzata plottando sull'ascissa di un grafico la percentuale di area cumulata a partire dalle aree a più alta suscettibilità, mentre sulle

ordinate si riporta la percentuale cumulata dell'area racchiusa dalle scarpate di frana del *validation set* (non utilizzate nell'analisi) ricadenti nelle rispettive classi di suscettibilità (Figura 7).

Tabella 1 – Distribuzione dei pesi (W) per ogni classe dei fattori predisponenti considerati.

Table 1 – Distribution of weights (W) for each class of the predisposing factors.

Litologia	NpixNi	NpixSi	DensClas	DensMap	W
Alluvioni	51018	25	0,0005	0,0261	-3,975
Depositi di frana	568	200	0,0000	0,0261	2,602
Conglomerati	139383	299	0,0021	0,0261	-2,499
Argille	160339	8287	0,0529	0,0261	0,683
Sabbie	46398	1559	0,0336	0,0261	0,253
Calcare evaporitico	13316	336	0,0252	0,0261	-0,034
Rocce granitiche	435	46	0,1057	0,0261	1,399
Uso del suolo					
Zone agricole eterogenee	95635	1793	0,0019	0,0261	-0,331
Colture permanenti	164583	2990	0,0183	0,0261	-0,362
Zone boscate	78177	4777	0,0608	0,0261	0,851
Seminativi	41146	1121	0,0276	0,0261	0,043
Zone urbanizzate	32916	71	0,0022	0,0261	-2,493
Pendenze					
< 5°	173042	79	0,0005	0,0261	-4,047
5° - 10°	64105	203	0,0032	0,0261	-2,11
10° - 15°	50333	706	0,014	0,0261	-0,622
15° - 20°	45682	1426	0,0312	0,0261	0,178
20° - 30°	61956	4526	0,0731	0,0261	1,028
> 30°	16339	3812	0,2333	0,0261	2,189
Esposizione					
Pianura	65035	14	0,0002	0,0261	-4,799
Nord	18357	636	0,0346	0,0261	0,282
Nord-Est	27244	1043	0,0383	0,0261	0,383
Est	43761	1488	0,034	0,0261	0,264
Sud-Est	69973	1253	0,0179	0,0261	-0,377
Sud	58017	1121	0,0193	0,0261	-0,3
Sud-Ovest	52624	1176	0,0223	0,0261	-0,155
Ovest	37594	1938	0,0515	0,0261	0,68
Nord-Ovest	38852	2083	0,0536	0,0261	0,719
Distanza dalle faglie					
< 50 m	11222	535	0,0547	0,0261	0,602
50 - 100 m	11090	536	0,0483	0,0261	0,616
> 100 m	389145	9681	0,0249	0,0261	-0,048
Distanza dal reticolo idrografico					
0 m - 20 m	42167	747	0,0177	0,0261	0,389
20 m - 50 m	61248	2132	0,0348	0,0261	0,287
50 m - 100	94117	3024	0,0321	0,0261	0,144
> 100 m	213925	4849	0,0227	0,0261	-0,139
Totale	411457	10752			

La forma della curva di predizione (curva *prediction-rate*) esprime il tipo di correlazione fra le classi di suscet-

tibilità e l'instabilità gravitativa "futura". Una tendenza diagonale della curva implica una predizione totalmente casuale (Conoscenti *et alii*, 2008). Pertanto, più la curva si allontana dalla diagonale e più è ripida nella parte iniziale, maggiore sarà la capacità predittiva del modello (Chung e Fabbri, 2003; Remondo *et alii*, 2003).

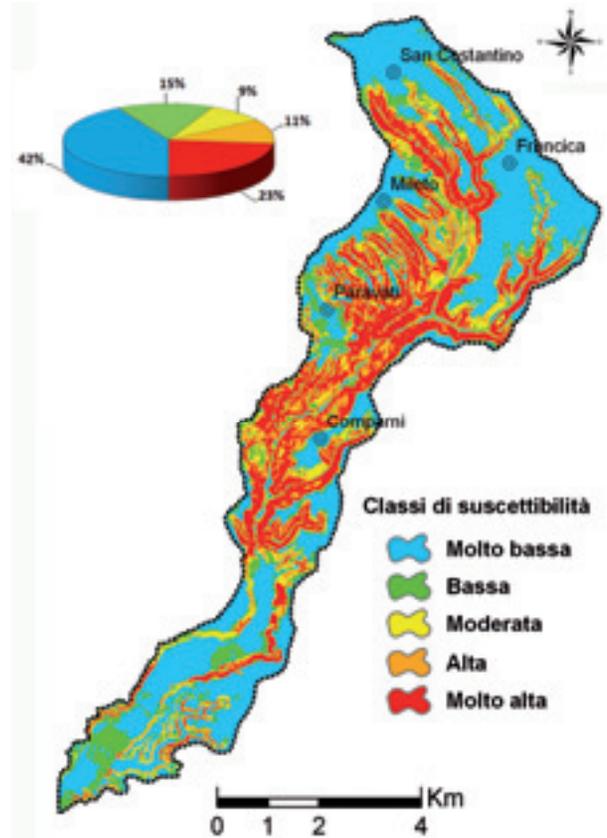


Figura 6 – Carta della suscettibilità da frana.

Figure 6 – Landslide susceptibility map.

La curva *success-rate* (Figura 7) è ottenuta seguendo la stessa procedura, con la differenza che sull'asse delle ordinate si plottano le scarpate di frana del *training set*, utilizzato nell'analisi della suscettibilità. L'andamento di questa curva ci permette di stimare la bontà (*goodness of fit*) del modello predittivo (Chung e Fabbri, 2003).

Nel nostro caso, la curva *success-rate* ottenuta (Figura 7) si presenta generalmente ripida nella parte iniziale dopodiché decresce in maniera abbastanza monotona.

La curva *prediction-rate* mostra una forma molto simile alla curva *success-rate* e dalla Figura 7 si osserva che le due fittano abbastanza bene. Pertanto, la validazione del metodo di suscettibilità utilizzato conferma un'effettiva (non casuale) correlazione fra la carta di suscettibilità predetta e la distribuzione spaziale dei movimenti in massa del *validation set*. L'elevata capacità predittiva è confermata dal fatto che il 75 % delle scarpate di frana ricade nelle classi di suscettibilità alta e molto alta

(Fig. 8), di contro, nelle aree a bassa suscettibilità ricade una percentuale di scarpate di frana al di sotto del 10 %.

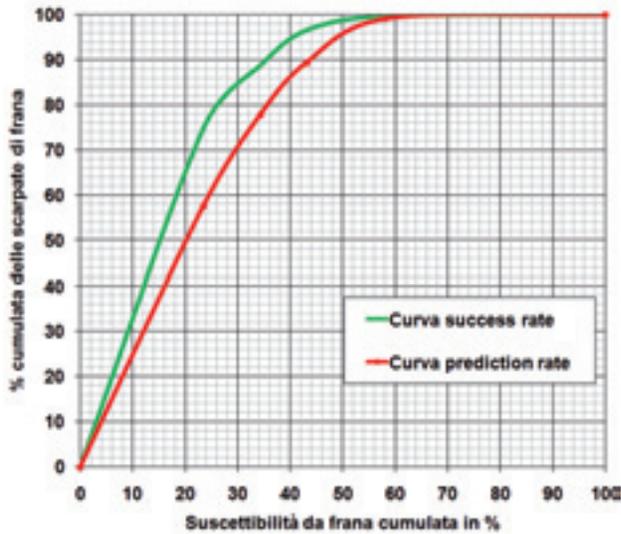


Figura 7 – Curva *success rate* e curva *prediction rate*.
Figure 7 – *Success and prediction rate*.

Si può affermare, dunque, che sia il metodo di statistica bivariata utilizzato che i fattori predisponenti scelti per l'analisi riescono a valutare in modo soddisfacente la propensione da frana nel bacino studiato.

La carta ottenuta, quindi, può essere utilizzata per prevedere i futuri movimenti franosi; questi ultimi, in concomitanza con eventi in grado di innescare tali fenomeni (piogge intense e/o prolungate), avranno luogo con maggior probabilità in quelle aree del territorio caratterizzate da suscettibilità alta e molto alta.

6. Conclusioni

In questo studio, l'analisi integrata dei dati geologici e geomorfologici ha validamente contribuito ad una caratterizzazione dei movimenti in massa che si sviluppano all'interno del bacino del T. Incinerato, i quali, rappresentano il principale processo di modellamento del paesaggio. Pertanto, i fenomeni morfogravitativi sono controllati, essenzialmente, dalle caratteristiche lito-strutturali e morfometriche del bacino. Il rilevamento geomorfologico ha messo in evidenza che i movimenti in massa svolgono un ruolo determinante nella morfogenesi dei versanti argillosi (prevalenti nel settore centrale del bacino), i quali presentano una morfologia piuttosto ondulata e, spesso, con brusche rotture di pendenza. È stato rilevato che lo sviluppo dei movimenti franosi, in alcuni settori, è fortemente controllato dalla tettonica, la quale ha creato versanti con elevata energia del rilievo, oltreché una diffusa fratturazione delle litologie affioranti ed una morfologia piuttosto disarticolata.

Il metodo di analisi statistica bivariata, implementato in ambiente GIS, adottato per effettuare la stima della suscettibilità da frana nel bacino Incinerato, si è dimostrato molto efficace per individuare e cartografare le aree con differente propensione allo sviluppo di frane nelle diverse condizioni geoambientali. Pertanto, lo studio ha messo in evidenza, in modo quantitativo, quali fattori predisponenti, tra quelli considerati, mostrano una maggiore correlazione con i fenomeni franosi che nel caso specifico sono risultati essere litologia, pendenze e faglie.

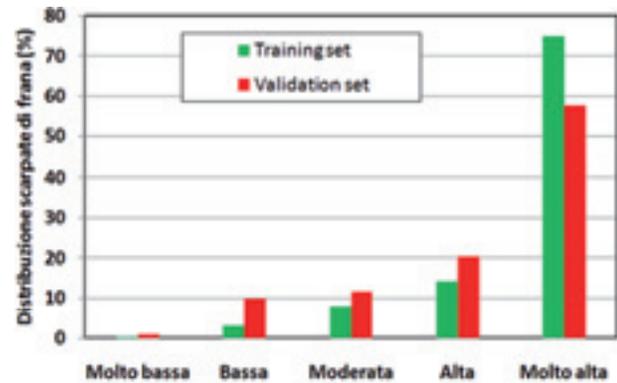


Figura 8 – Distribuzione delle scarpate di frana del *training set* e del *validation set* nelle diverse classi di suscettibilità.

Figure 8 - *Distribution of the landslide scarp of training set and the validation set in the different susceptibility classes.*

Dalla carta di suscettibilità ottenuta, suddivisa in cinque classi (molto alta, alta, moderata, bassa e molto bassa), è risultato che nel bacino Incinerato, rispettivamente, l'11 e il 23 % del suo territorio ricade nelle classi di suscettibilità alta e molto alta.

La procedura di validazione della carta di suscettibilità ha messo in evidenza l'elevato potere predittivo del metodo statistico utilizzato, in quanto più del 75% del territorio in cui ricadono le scarpate di frana utilizzate per la validazione (*validation set*) viene classificato correttamente, ricadendo nelle aree con suscettibilità alta e molto alta.

In conclusione, la carta della suscettibilità ai movimenti franosi, ottenuta utilizzando una metodologia il più possibile oggettiva e facilmente applicabile ed aggiornabile, può essere ritenuta un elaborato molto utile poiché fornisce una previsione spaziale della pericolosità da frana all'interno del bacino considerato; inoltre, tale elaborato può essere validamente utilizzato come strumento conoscitivo ai fini della pianificazione e gestione territoriale, in particolar modo in una Regione come quella calabrese con un'elevata percentuale di fenomeni franosi che si innescano e/o si riattivano periodicamente, in concomitanza di precipitazioni meteoriche particolarmente intense e prolungate.

Bibliografia

- Aleotti P, Chowdhury R., 1999. Landslide hazard assessment: summary, review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 58, 21-44.
- Amanti M., Carrara A., Castaldo G., Colosimo P., Gisotti G., Govi M., Marchionna G., Nardi R., Panizza M., Pecci M., Vianello G., 1992. Linee guida per la realizzazione di una cartografia della pericolosità geologica connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti alla scala 1:50.000. Versione Preliminare. Presidenza del Consiglio dei Ministri. Servizio Geologico, 53 pp.
- Anbalagan R., 1992. Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology* 32, 269-277.
- APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici (2005) La realizzazione in Italia del progetto europeo Corine Land Cover 2000. <http://www.apat.it>
- Bartolomei A., Brugioni M., Canuti P., Casagli N., Catani F., Ermini L., Kukavcic M., Menduni G., Tofani V., 2006. Analisi della suscettibilità da frana a scala di bacino (Bacino del Fiume Arno, Toscana-Umbria, Italia). *Giornale di Geologia Applicata* 3, 189-195.
- Brabb, E. E. 1984 - Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. *Proceedings Fourth International Symposium on Landslides*, Toronto, Canada, 1, 307 - 324.
- Calcaterra D., Parise M. & Dattola L. (1998) – Weathering processes in crystalline rocks of the Sila Massif, Calabria, Southern Italy, as predisposing factor for the development of debris-flow. In *The Geotechnics of Hard Soils-Soft Rocks*, Evangelista & Picarelli (eds), Balkema, Rotterdam.
- Caniani D., Pascale S., Sdao F., Sole A. (2008) - Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza. *Natural Hazards* 45, 55-72.
- Carrara A., 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation, *Mathematical Geology* 15, 403-426.
- Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P., 1995. GIS-based techniques for mapping landslide hazard. In: Carrara A., Guzzetti F. (eds) *Geographical information systems in assessing natural hazards*. Kluwer, Dordrecht, 135-175.
- Catani F, Casagli N, Ermini L, Righini G, Menduni G., 2005. Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River basin. *Landslides* 2, 329-342.
- Cevik E., Topal T., 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology* 44, 949-962.
- Chiodo G., Dramis F., Gervasi A., Guerra I., Sorriso-Valvo M., 1999. Frane sismo-indotte e pericolosità di sito: primi risultati dello studio degli effetti di forti terremoti storici in Calabria centro-settentrionale, *Atti XVIII convegno GNGTS*, Roma, (CD-Rom, sessione. 13 pp. 11).
- Chung, C.F., Fabbri, A.G., 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards* 30, 451-472.
- Clerici A., Perego S., Tellini C., Vescovi P., 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology* 48, 349-364.
- Conoscenti, C., Di Maggio, C., Rotigliano, E., 2008. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy). *Geomorphology* 94, 325-339.
- Cruden D. M. & Varnes D. J., 1996. Landslide type and processes, In: Turner A. K. and Schuster R. L. (Eds.), *Landslides. Investigation and mitigation*, Nat. Acad. Press, Washington, 36-75.
- Dai F. C., Lee C. F., Ngai Y. Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview, *Engineering Geology* 64, 65-87.
- De Rosa R., Dominici R., Sonnino M., 2001. Evidenze di Vulcanismo sin sedimentario nella successione pleistocenica del graben del Mesima (Calabria centro-occidentale). *Il Quaternario* 14, 81-91
- Falasci F., Federici P.R., Puccinelli A., Bottai M., Casarosa N., D'Amato Avanzi G., Giacomelli F., Giannecchini R., Pochini A., Ribolini A., Salvati N., Stano S., Testi C., 2007. Metodologie di valutazione della suscettibilità di frana in alcune aree campione della Toscana settentrionale. *Atti Soc. tosc. Sci. nat., Mem., Serie A*, 112, 21-39.
- Fantucci R. & Sorriso-Valvo M., 1999. Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago, Calabria (Italy). *Geomorphology* 30, 165-174.
- Fernandez T., Irigaray C., Hamdouni R.E., Chacon J., 2003. Methodology for landslide susceptibility mapping by means of a GIS. Application to the Contraviesa area (Granada, Spain). *Natural Hazards* 30, 297-308.
- Ghisetti F., 1981. L'evoluzione strutturale del bacino plio-pleistocenico di Reggio Calabria nel quadro geodinamico dell'arco Calabro. *Bollettino Società Geologica Italiana* 100, 433-466.
- Greco R., Sorriso-Valvo M., Catalano E., 2007. Logistic Regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: The Aspromonte case study, Calabria, Italy. *Engineering Geology* 89, 47-66.
- Gupta V., 2005. The relationship between tectonic stresses, joint patterns and landslides in the higher Indian Himalaya. *Journal of Nepal Geological Society* 31, 51-58.
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31, 181-216.
- Hansen A., 1984. Landslide hazard analysis. In: Brunsen D., Prior D.B., eds., *Slope Stability*. John Wiley & Sons, New York, 523-602.
- Lee S., 2005. Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *Int J Remote Sensing* 26, 1477-1491.
- Lee S., Choi J., Min K., 2002. Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology* 43, 120-131.
- Lee S., Choi J., Min K., 2004. Landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea. *Int J Remote Sensing* 25, 2037-2052.
- Lee S., Min K., 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology* 40, 1095-1113.
- Lee S., Pradhan B., 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* 4, 33-41.
- Magliulo P., Di Lisio A., Russo F., Zelano A., 2008. Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: a case study in southern Italy. *Natural Hazards* 47, 411-435.
- Morgan B.W., 1968. *An introduction to Bayesian statistical decision process*. Prentice_Hall New York.
- Nagarajan R., Roy A., Vinod Kumar R., Mukherjee A., Khire M.V., 2000. Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bull. Eng. Geol. Env.* 58, 275-287.
- Pachauri A.K., Gupta P.V., Chander R., 1998. Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas. *Environmental Geology* 36, 325-334.
- Pachauri A.K., Pant M., 1992. Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology* 32, 81-100.
- Parise M., Sorriso-Valvo M. & Tansi C., 1997. Mass movements related to tectonics in the Aspromonte massif (Southern Italy). *Engineering Geology* 47, 89-106.
- Rautela P., Lakhera R.C., 2000. Landslide risk analysis between Giri and Ton Rivers in Himalaya (India). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 2, 153-160.
- Remondo J., González-Diez A., Diazde Teran J.R., Cendrero A., Fabbri A., Chung C.F., 2003. Validation of Landslide Susceptibility Maps; Examples and Applications from a Case Study in Northern Spain. *Natural Hazards* 30, 437-449.
- Saha A.K., Gupta R.P., Arora M.K., 2002. GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *Int J Remote Sensing* 23, 57-369.
- Saha A.K., Gupta R.P., Sarkar I., Arora M.K., Csaplovics E., 2005. An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation-with a case study in the Himalayas. *Landslides* 2, 61-69.
- Soeters R., Van Westen C.J., 1996. Slope insta-

- bility recognition, analysis and zonation. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides. Investigation and mitigation. Transportation Research Board, Special Report. National Academy Press, Washington, pp 129–177.
- Sorriso-Valvo M., Gullà, Antronico L., Tansi C. & Amelio M., 1999. Mass-movement, geologic structure and morphologic evolution of the Pizzetto-Greci slope (Calabria-Italy). *Geomorphology* 30, 147-163.
- Sorriso-Valvo M., Tansi C., 1996a. Relazioni tra frane, forme del rilievo e strutture tettoniche nella media Valle del Fiume Crati (Calabria). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 19, 107-117. Sorriso-Valvo M., Tansi C., 1996b. Grandi frane e deformazioni gravitative profonde di versante della Calabria: Note Illustrative per la carta al 250.000. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 19, 395 – 408.
- Süzen ML., Doyuran V., 2004. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology* 71, 303–32.
- Tansi, C., Sorriso-Valvo, M., Greco, R., 2000. Relationships between joint separation and faulting: an initial numerical appraisal. *Engineering Geology* 52, 225–230.
- Tortorici L., 1979. Dati sulla neotettonica del bacino del Fiume Crati (Cosenza). P.F. Geodinamica. *Contributi alla realizzazione della Carta neotettonica d'Italia* 251, 341-350.
- Tortorici, G., Marcello, B., De Guidi, G., Monaco, C., Tortorici, L., 2003. Fault activity and marine terracing in the Capo Vaticano area (southern Calabria) during the middle-late Quaternary. *Quat. Int.* 101–102, 269–278.
- Van Westen C.J., 1993. Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. ITC publication No. 15, International Institute for Aerospace and Earth Resources Survey, Enschede, The Netherlands, pp. 245
- Van Westen C.J., 1997. Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide. ITC publication, Enschede, The Netherlands, 73-84.
- Varnes D.J., 1978. Slope movements, type and process. In: Schuster R.L., Krizel R.J., eds., *Landslides analysis and control*. Transp. Res. Board., Special report 176, Nat. Acad. Press., Washington, D.C., 11-33.
- Yalcin A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparison of results and confirmations. *Catena* 2, 1-12
- Yalcin A., Bulut F., 2007. Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey). *Natural Hazards* 41, 201–226.
- Yin K.J., Yan T.Z., 1988. Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. *Proceedings of the 5th international symposium on landslides*, Lausanne, Switzerland 2, 1269–1272.
- Zezeze J.L., Reis E., Garcia R., Oliveira S., Rodrigues M.L., Vieira G., Ferreira A.B., 2004. Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Haz Earth Sys Science* 4, 133–146.

Effetto della stabilizzazione con calce sul comportamento meccanico di un terreno argilloso

Michele Orazi, Ugo Sergio Orazi

Laboratorio Geomeccanico di Ugo Sergio Orazi - via Cairo, 61024 Mombaroccio (PU) – info@laborazi-it

Lime stabilization effect on the mechanical behaviour of a clayey soil

ABSTRACT: Lime stabilization is widely used in road construction to improve the mechanical properties of clayey soils. This paper presents the results of a laboratory study on the effect of lime stabilization on the mechanical behaviour of a clayey soil. Lime modifies the soil conditions from “wet than optimum” to “nearly optimum”. Lime stabilization significantly improves the strength and stiffness of the tested material and modifies his mechanical behaviour.

Key terms: Lime stabilization, Clayey soil, Mechanical behaviour, Laboratory tests

Termini chiave: Stabilizzazione con calce, Terreno argilloso, Comportamento meccanico, Prove di laboratorio

Riassunto

La tecnica della stabilizzazione con calce, al giorno d’oggi molto utilizzata in ambito stradale, è finalizzata a migliorare le caratteristiche meccaniche dei terreni argillosi. In questo articolo sono presentati i risultati di uno studio di laboratorio eseguito con lo scopo di valutare l’effetto della stabilizzazione con calce sul comportamento meccanico di un terreno argilloso, utilizzato per la realizzazione di un rilevato stradale. Per effetto del trattamento, il materiale passa da un contenuto in acqua assolutamente non adeguato alla sua messa in opera a condizioni molto prossime a quelle ottimali. La calce incrementa in maniera rilevante la resistenza al taglio e la rigidità del materiale oggetto di studio e ne modifica in maniera sostanziale il suo comportamento meccanico.

Introduzione

La tecnica della stabilizzazione con calce dei terreni argillosi costituisce una valida alternativa all’impiego di inerti nell’ambito della costruzione di rilevati stradali. In Italia esistono numerosi esempi applicativi nei quali è stata utilizzata con successo questa tecnica (Canziani et al., 2002), che consiste nel miscelare intimamente delle terre argillose con una quantità di calce tale da modificarne significativamente le caratteristiche fisico-meccaniche. Attraverso il trattamento con calce è possibile rendere idonee all’utilizzo in ambito stradale terre dalle scadenti caratteristiche tecniche, limitando così i problemi del reperimento di inerti e dello smaltimento delle terre da scavo.

L’attitudine di una terra ad essere stabilizzata deve essere accertata attraverso uno studio preliminare di laboratorio. Generalmente si considerano adatti al trattamento

terreni con indice di plasticità maggiore del 10%. Quindi, con riferimento alla classificazione UNI 10006 (2002), si prestano ad essere stabilizzati con calce le terre appartenenti ai gruppi A6, A7, A2-6 e A2-7. Nel caso di terreni classificabili come A2-6 o A2-7, la frazione limoso-argillosa deve essere comunque presente in quantità rilevante. La miscela di progetto, determinata sperimentalmente in laboratorio, deve soddisfare i requisiti imposti dalla norma tecnica CNR BU N36 (1973) “Stabilizzazione delle terre con calce”.

I principali processi chimico-fisici che si manifestano nei trattamenti con calce sono (TRB, 1987):

- a) l’idratazione della calce (CaO);
- b) lo scambio ionico tra gli ioni presenti sulla superficie delle particelle di argilla e quelli derivanti dalla dissociazione della calce (reazioni a breve termine);
- c) la formazione di composti stabili dotati di forti proprietà leganti (reazioni a lungo termine).

Gli effetti più significativi del trattamento con calce sulle terre argillose sono (Thompson, 1966; Le Roux, 1969; TRB, 1987; Little, 1995):

- a) la rilevante diminuzione del contenuto in acqua;
- b) la sensibile diminuzione dell’indice di plasticità;
- c) il sensibile aumento dell’umidità ottimale di costipamento;
- d) il marcato miglioramento delle caratteristiche meccaniche;
- e) la significativa diminuzione della sensibilità nei confronti dell’acqua (Figura 1).

La stabilizzazione con calce incrementa in maniera rilevante la resistenza e la rigidità dei terreni argillosi (Thompson, 1966). L’entità di tali incrementi, a parità di altre condizioni, è funzione del tempo di stagionatura (Thompson, 1966; Little, 1995; Orazi & Orazi, 2009).

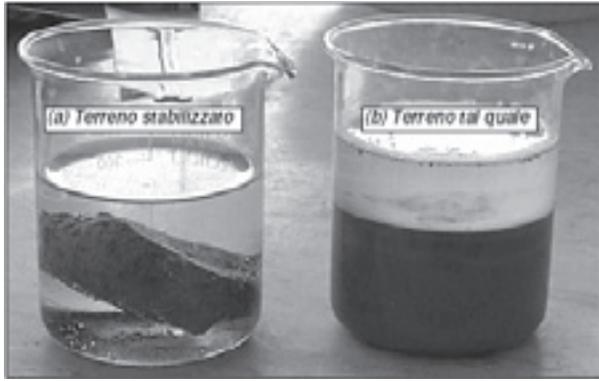


Figura 1. Terreno stabilizzato con calce (a) e terreno tal quale (b) dopo alcuni giorni di immersione in acqua (Orazi, 2004).
 Figure 1. Lime stabilized soil (a) and natural soil (b) after some days in water (Orazi, 2004).

Sperimentazione

Le principali caratteristiche del terreno oggetto di studio, appartenente al gruppo A6 della classificazione UNI 10006 (2002), sono sintetizzate in Tabella 1.

In via preliminare è stato effettuato uno studio di laboratorio atto a verificare la fattibilità della stabilizzazione. Tale studio è stato sviluppato in maniera tradizionale, secondo quindi le indicazioni della norma tecnica CNR BU N36 (1973), la quale prevede di valutare l'efficacia del trattamento attraverso prove di compressione e di penetrazione CBR.

In condizioni ottimali sarebbe stato sufficiente trattare il terreno con il 3% in peso di calce (CaO), tuttavia la stabilizzazione è stata effettuata con l'aumento di un punto percentuale del quantitativo di legante, data l'elevata umidità che presentava il materiale all'inizio della sperimentazione.

Con il fine di valutare l'effetto del trattamento con calce sul comportamento meccanico del materiale, durante le prime fasi della lavorazione in cantiere, è stato prelevato un campione di terreno tal quale appena fresato ed un campione di terreno trattato con una quantità di CaO

prossima al 4% in peso, sui quali sono state eseguite prove triassiali CID (AGI, 1994) su provini compattati in laboratorio. Su entrambi i campioni sono stati determinati inoltre i limiti di consistenza (CNR-UNI 10014, 1964) e la curva di compattazione "Modificata" (CNR N69, 1978).

Per le prove triassiali sono state utilizzate celle equipaggiate con una cella di carico ad immersione da 10 KN per la misura del carico verticale, con trasduttori di pressione per la misura della pressione di contenimento e della pressione interstiziale, con un trasduttore LVDT per la misura della deformazione assiale e con un volumometro a membrana strumentato con un trasduttore LVDT per la misura della variazione di volume. La fase di taglio è stata condotta con una velocità di deformazione costante pari a 0.002 mm/min, dopo le consuete fasi di saturazione e di consolidazione opportunamente monitorate. Tutti i dati misurati durante le fasi di prova sono stati registrati automaticamente, ad intervalli di tempo prefissati, da una centralina di acquisizione.

I provini, di 50 mm di diametro e 100 mm di altezza, sono stati preparati, così come prelevati, mediante compattazione (CNR N69, 1978) con energia "Modificata" e confezionati seguendo le indicazioni di Head (1986). Quelli trattati, opportunamente sigillati, sono stati conservati in ambiente controllato a temperatura (20°C) ed umidità costante (superiore al 95%) durante i 7 giorni di stagionatura previsti.

Risultati sperimentali

La Figura 2 mostra come il trattamento con calce provoca la significativa riduzione del contenuto in acqua del materiale (W_N) e la traslazione, verso umidità più elevate, dell'intera curva di compattazione (Figura 2a). Pertanto il terreno passa da un contenuto in acqua assolutamente non adeguato alla sua messa in opera a condizioni molto prossime a quelle ottimali. Questi fenomeni sono accompagnati dalla sensibile riduzione dell'indice di plasticità del materiale (Tabella 1).

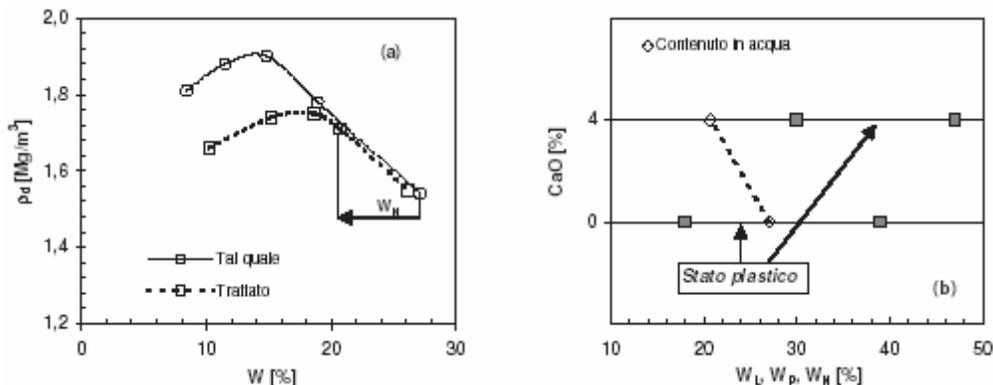


Figura 2. Effetto del trattamento con calce: (a) curve di compattazione; (b) contenuto in acqua e limiti di consistenza.
 Figure 2. Effect of lime stabilization: (a) compaction curves; (b) moisture content and consistency limits.

Tabella 1. Alcune caratteristiche del materiale sottoposto a prova.

Table 1. Some characteristics of tested soil.

Calce	(%)	0	4
Contenuto in acqua	(%)	27,1	20,7
Passante 2,000 mm	(%)	95,0	-
Passante 0,420 mm	(%)	91,9	-
Passante 0,075 mm	(%)	78,6	-
Frazione argillosa	(%)	16,0	-
Limite di liquidità	(%)	39	47
Limite di plasticità	(%)	18	30
Indice di plasticità	(%)	21	17
Classificazione UNI 10006	(-)	A6	-

Conseguentemente, come mostra la Figura 2b, il materiale passa da un contenuto in acqua compreso tra il limite di liquidità e quello di plasticità (stato plastico) ad uno minore di quello corrispondente al limite di plasticità (stato semisolido).

Nelle Figure 3 e 4 sono riportati i risultati sperimentali relativi alla fase di taglio delle prove triassiali drenate facendo riferimento agli invarianti di tensione, sforzo deviatorico (q) e pressione efficace media (p'), ed ai rispettivi invarianti di deformazione, deformazione deviatorica (ϵ_q) e deformazione volumetrica (ϵ_p).

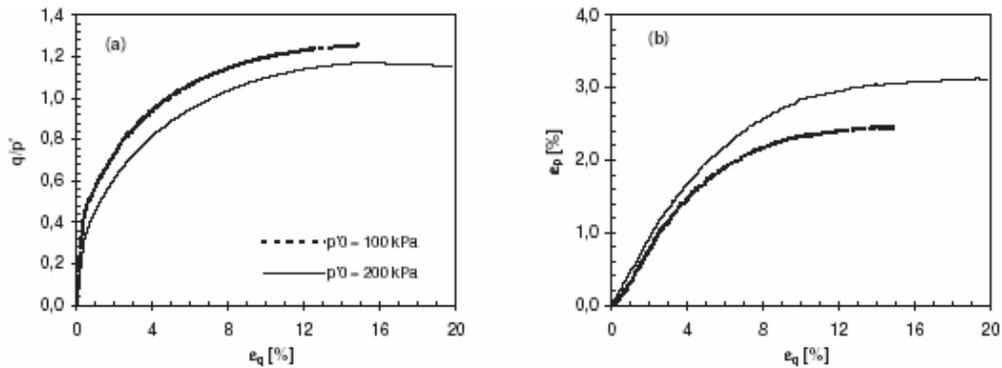


Figura 3. Prove di compressione triassiale drenate sul terreno tal quale: (a) curve sforzo-deformazione; (b) comportamento volumetrico.

Figure 3. Drained triaxial compression tests on natural soil: (a) stress-strain curves; (b) volumetric behaviour.

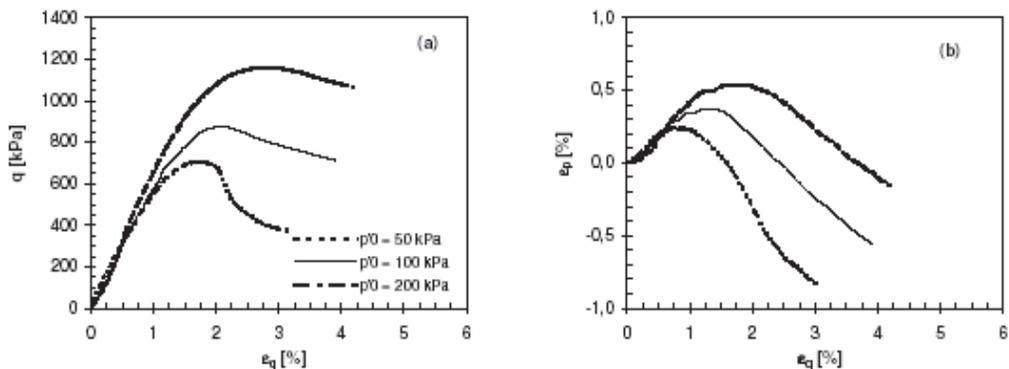


Figura 4. Prove di compressione triassiale drenate sul terreno stabilizzato con calce: (a) curve sforzo-deformazione; (b) comportamento volumetrico.

Figure 4. Drained triaxial compression tests on lime stabilized soil: (a) stress-strain curves; (b) volumetric behaviour.

Le curve sforzo-deformazione del terreno tal quale, rappresentate in Figura 3a in termini di rapporto di carico (q/p'), presentano un andamento fortemente non lineare, asintotico, con valori di q/p' che tendono mediamente a 1.21, corrispondente ad un angolo di resistenza al taglio di 30.2° . Il comportamento volumetrico di tipo contraente (Figura 3b) si attenua con il procedere della fase di taglio, fino a stabilizzarsi quando q/p' raggiunge un valore stazionario.

Al termine della prova, i provini presentano la classica configurazione a “botte”, senza quindi nessuna discontinuità particolarmente rilevante. Il terreno tal quale presenta pertanto il comportamento meccanico tipico dei materiali poco addensati il cui stato iniziale è localizzabile alla destra della linea di stato critico.

Al contrario il terreno stabilizzato esibisce la risposta meccanica tipica dei terreni molto addensati. Le curve sforzo-deformazione, mostrate in Figura 4a, sono caratterizzate infatti da una chiara situazione di instabilità meccanica. Una volta raggiunto il punto di collasso si osserva una rapida caduta dello sforzo deviatorico al crescere della deformazione, meno evidente all’aumentare della pressione di consolidazione.

La resistenza di picco viene mobilitata entro livelli deformativi relativamente piccoli (compresi tra l'1.5 % ed il 3.0 %), sensibilmente crescenti con la pressione di consolidazione. Dopo una fase iniziale a comportamento leggermente contraente, i provini esibiscono un comportamento volumetrico marcatamente dilatante, più pronunciato a basse pressioni di consolidazione (Figura 4b).



Figura 5. Provino di terreno stabilizzato con calce al termine della prova di compressione triassiale.

Figure 5. Lime stabilized soil sample after triaxial compression test.

Durante la fase di taglio nei provini si formano discontinuità ben definite. Questo fenomeno è particolarmente evidente nel caso del provino consolidato a 50 kPa, il quale presenta un netto piano di rottura che lo separa, di fatto, in due blocchi che scorrono rigidamente uno sull'altro (Figura 5). Per lo stato tensionale indagato, facendo riferimento alla classica equazione di Mohr-Coulomb, i parametri di resistenza al taglio, coesione in-

tercetta ed angolo di resistenza al taglio, risultano rispettivamente pari a 140.3 kPa e 36.9°, in linea con i dati disponibili in letteratura (Bergia et al., 2002; Lo Presti et al., 2003).

In Figura 6a vengono confrontate le curve sforzo-deformazione dei provini di terreno stabilizzato con quelle dei provini di terreno tal quale. La Figura 6b mostra infine gli involuipi di rottura del terreno prima e dopo il trattamento con calce. È evidente come la stabilizzazione con calce incrementa in maniera molto marcata la resistenza al taglio e la rigidità del materiale oggetto di studio.

Conclusioni

I risultati dello studio di laboratorio finalizzato a valutare l'effetto della stabilizzazione con calce sul comportamento meccanico di un terreno argilloso, utilizzato per la costruzione di un rilevato stradale, hanno mostrato che il trattamento con calce è particolarmente efficace in quanto determina una rilevante diminuzione del contenuto in acqua del materiale e ne aumenta sensibilmente l'umidità ottimale di costipamento. Il terreno passa così da una condizione assolutamente non adeguata alla sua messa in opera, ad una molto prossima a quella ottimale.

La stabilizzazione con calce migliora significativamente le caratteristiche meccaniche del materiale e ne modifica in maniera sostanziale la risposta meccanica. Il marcato incremento di resistenza al taglio e di rigidità, che testimonia l'efficacia del trattamento con calce, è accompagnato da drastici cambiamenti nella tipologia della curva sforzo-deformazione, nel comportamento volumetrico e nella configurazione a rottura dei provini.

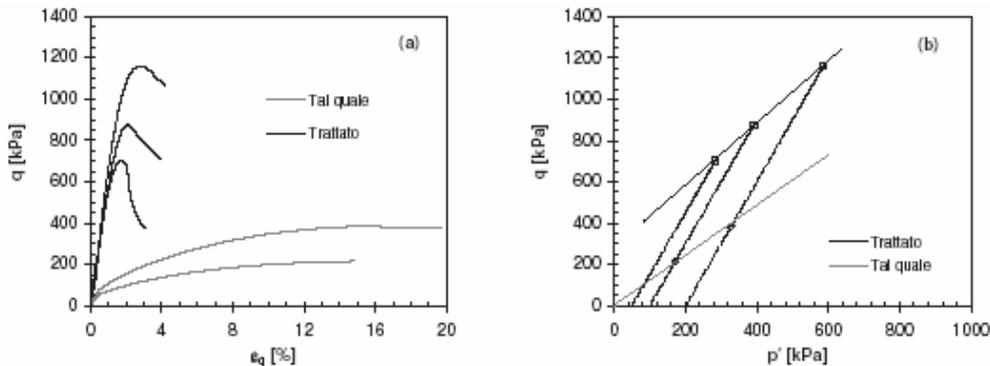


Figura 6. Effetto della stabilizzazione con calce sulla resistenza al taglio e sulla rigidità del materiale oggetto di studio: (a) curve sforzo-deformazione; (b) involuipi di rottura.

Figure 6. Effect of lime stabilization on the shear strength and stiffness of soil: (a) stress-strain curves; (b) failure envelopes.

Bibliografia

AGI, 1994. Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio. Associazione Geotecnica Italiana.

Bergia E., Cotecchia V., Faraco M.E., Guerra

C., Leboroni F., Massa F., Monterisi L., Pasqualini E., 2002. Stabilizzazione di una frana con terreno additivato con calce. Le Strade, 3, 62-66.

Canziani A., Cariboni L., Pressato U., 2002. Terre limo-argillose trattate con calce per rilevati stradali. Le Strade, 4, 94-99.

CNR BU N36, 1973. Stabilizzazione delle terre

- con calce. Consiglio Nazionale delle Ricerche. CNR BU N69, 1978. Norme sui materiali stradali – Prova di costipamento di una terra. Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- CNR-UNI 10014, 1964. Prove sulle terre – Determinazione dei limiti di consistenza di una terra. Consiglio Nazionale delle Ricerche-Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- Head K.H., 1986. Manual of soil laboratory testing. Pentech Press, London.
- Le Roux A., 1969. Traitements des sols argileux par la chaux. Bull. LCPC n.40.
- Little D.L., 1995. Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. Kendall/Hunt Publishing Company.
- Lo Presti D., Tordella L., Froio F., Peisino V., 2003. Indagini di laboratorio e in sito su un limo stabilizzato con calce e cemento: un caso reale. Rivista Italiana di Geotecnica, 4, 58-79.
- Orazi M., Orazi U.S., 2009. Miscela terra-calce per rilevati stradali: effetto del tempo di maturazione sulle caratteristiche meccaniche. Atti del 3° Congresso Nazionale AIGA, Università degli Studi di Siena, San Giovanni Valdarno (AR).
- Orazi U.S., 2004. Stabilizzazione delle terre a calce: prove geotecniche di laboratorio. Seminario dell'Ordine dei Geologi dell'Umbria, Perugia.
- Thompson M.R., 1966. Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures. Highway Research Board, Washington.
- TRB, 1987. Lime stabilization: reactions, properties, design and construction. Transportation Research Board, Washington.
- UNI 10006, 2002. Costruzione e manutenzione delle strade – Tecniche di impiego delle terre. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

La Carta Giacimentologica del Piano Regionale delle Attività Estrattive della Puglia

Claudio Cherubini¹, Alessandro Reina², Donato Sollitto³, Francesca Visicchio⁴

¹Dipartimento di Ingegneria Civile delle Acque – Politecnico di Bari

²Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Politecnico di Bari

³CRA-Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura – U.R. SCA;

⁴Regione Puglia – Servizio Ecologia

The mining resources map for the mining activity plan of the Apulia Region.

ABSTRACT: All the aspects regarding the mining industrial sector are based on the balance between the economical and the environmental impacts. Actually the wise management of the mining activity need to be founded on the clear knowledge of all the involved factors. One of the main elements and the most useful tool for the mining activity management is represented by the mining resources map, as a modern reference tool for who wants to engage in mining activity. The mining resources map of the Apulia region (Southern Italy) was developed for the Regional Program of the mining activity by a research team of the Technical University of Bari (Geotechnical and Environmental Department), according with the Mining sector of the regional government. The map was developed on a geographic information system support by implementing different thematic maps of the region on overlaying layers, in order to define leaning areas for mining activity, not subjected to restriction for the environmental protection. The final product represents a clear and easy to use support to the decision making for mining activity planning.

Key terms: Quarries, Apulia, Southern Italy, G.I.S.

Termini chiave: Cave, Puglia, Italia meridionale, G.I.S.

Riassunto

La gestione dell'attività estrattiva deve tenere conto del bilancio tra aspetto economico e disponibilità delle riserve ed anche del rapporto tra crescita economica e rischio ambientale indotto dall'attività estrattiva. La gestione prudente e assennata (più di quanto non sia stato fatto in passato) deve essere fondata sulla conoscenza completa di tutti i fattori coinvolti.

Uno degli elementi fondamentali per una corretta e funzionale gestione delle attività estrattive è la realizzazione della carta giacimentologica che si propone come strumento moderno di consultazione per tutti gli operatori economici del settore interessati ad ottimizzare gli investimenti.

La Carta giacimentologica della Regione Puglia come aggiornamento al Piano Regionale delle Attività Estrattive (P.R.A.E) è stata realizzata dai ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (sezione di Ingegneria geotecnica e geoambientale) in virtù di una convenzione stipulata tra il Politecnico di Bari e l'Assessorato all'Ecologia (Servizio estrattivo) della Regione Puglia.

Nella carta giacimentologica ~~proposta~~ sono individuate le aree suscettibili di attività estrattiva, non sottostanti a vincoli o a condizionamenti ostativi all'attività stessa. La

realizzazione di uno strumento chiaro e condiviso costituisce l'occasione anche per semplificare i tempi di approvazione dei progetti oggi ancora estremamente dilatati.

1. Premessa

“L'assetto del territorio è il risultato di un complesso e dinamico processo di relazioni tra fattori naturali e antropici, fra la sua conformazione fisica e biologica e la sua evoluzione connessa con i processi storici, culturali, sociali ed economici.” (Ronchi, 2006)

Parlare di territorio significa, dunque, parlare dei segni che la natura da un lato e le singole comunità locali dall'altro vi hanno impresso, siano essi memorie di una attività produttiva, monumenti architettonici o spazi in cui ambiente e arte vengono ricondotti ad un'unica entità.

All'interno di tale lento e implacabile processo di stratificazione un significato e un ruolo rilevante va attribuito agli elementi endogeni naturali.

Non da meno può ritenersi l'attività antropica e in particolare quella estrattiva, che ha contribuito ad alimentare cambiamenti e processi evolutivi, condizionando l'esistenza dell'uomo e le forme stesse del suo insediarsi sul e nel territorio.



Figura 1 – Cava di pietra da taglio del Gargano.
Figure 1 – Limestone quarry in the Gargano promontory.

Risulta evidente che nel definire le linee di sviluppo e di intervento su quest'ultimo non è sufficiente unicamente un'adeguata base tecnica ed analitica, ma è indispensabile che questa sia supportata ed integrata dalla comprensione delle trasformazioni in atto, dei possibili mutamenti dei fenomeni che le regolano e delle loro interazioni con la qualità dello sviluppo.

Emerge, quindi, la necessità di indagare sul valore della complessità dei luoghi attraverso letture territoriali finalizzate alla valorizzazione delle identità locali e ad un uso sinergico di tutte le risorse presenti, in sintesi un approccio di maggior rigore che ponga la complessità alla base della conoscenza, lo strumento per l'esercizio delle trasformazioni fisiche dell'ambiente. Non basta suddividere il territorio in aree d'uso se non si analizzano in generale le regole sistemiche che lo definiscono e lo governano.

Il progetto di aggiornamento della Carta Giacimentologica per il PRAE della Regione Puglia si configura, così, in maniera interdisciplinare e multiscalare (tale è, tra l'altro la varietà delle attività antropiche con le quali va a confrontarsi e sulle quali va ad agire), superando l'approccio deterministico e pragmatico: non più, dunque, una soluzione univocamente definita come risposta certa e determinata al problema in esame, ma un ventaglio di possibili scenari, rispondenti alle molteplici opportunità e criticità ecologiche, urbanistiche, sociali, culturali, storiche ed economiche degli svariati elementi di cui si compongono i luoghi.

2. Stato dell'arte

La regione pugliese è dotata di una larga disponibilità di risorse estrattive derivante dalla sua particolare configurazione geologica, caratterizzata dalla presenza di rocce calcaree e dolomitiche del Cretaceo, a tratti ricoperte da calcareniti relativamente tenere e da argille più o meno marnose del Plio-pleistocene; in talune aree del Salento, sui calcari si rivengono anche calcareniti mioceniche

(pietra leccese). Sul territorio si rileva la presenza di oltre 500 cave attive (Regione Puglia, 2010).

L'attività di estrazione dei minerali di seconda categoria, dunque, rappresenta un importante settore dell'economia regionale pugliese che discende da una tradizione mineraria che si è radicata fin da epoca romana (per es. le cave della "breccia corallina" del Gargano; Reina, 2003). Al tempo stesso ha significato una forte causa di degrado ambientale, sia per quanto riguarda le operazioni di coltivazione, sia per le problematiche relative alla destinazione d'uso dei siti dismessi: la coltivazione dei minerali di seconda categoria ha spesso indotto un notevole impatto sull'ambiente, modificando in modo irreversibile la morfologia, l'idrografia e il suo ecosistema. Tale degrado si è accentuato a causa anche del ritardo con cui la normativa è intervenuta per regolamentarla (1985). Infatti il primo strumento, a scala regionale, di pianificazione del settore estrattivo previsto dalla L.R. 37/85 Titolo V, art. 31 è il Piano Regionale delle Attività Estrattive (P.R.A.E.).



Figura 2 – Antica cava di salnitro all'interno del Pulo di Molfetta (BA).

Figure 2 – Old salnitro quarry near the Pulo di Molfetta area (BA).

In particolare il P.R.A.E. aveva individuato gli ambiti più favorevoli per lo sviluppo dell'attività estrattiva ove consentire la coltivazione delle cave esistenti e l'apertura di nuove cave. Forniva le norme e le prescrizioni cui le attività, sia quelle in corso che quelle da avviare, dovevano adeguarsi. Esso, inoltre, indicava i criteri e le modalità di attuazione degli interventi di recupero delle aree degradate dall'attività estrattiva. Il PRAE prevedeva che l'attività estrattiva fosse concentrata in "bacini di estrazione".

Con Deliberazione n. 1744 dell'11.12.2000 pubblicata sul B.U.R.P. del 29/03/2001 n. 50 suppl. la Giunta Regionale ha adottato il P.R.A.E.

In seguito ad alcune rivisitazioni ed aggiornamenti anche dell'Ufficio di Settore, i Bacini estrattivi sono diventati 163 a fronte di un numero di 100 individuati in fase di elaborazione del PRAE consegnato in data 1991. Conseguentemente la superficie interessata dai Bacini

estratti è risultata pari a Ha 49.449 rispetto al valore iniziale di Ha 29.102. L'adozione del piano è avvenuta nel 29 marzo 2001 (B.U.R.P. n°50).

In considerazione della necessità di coniugare e contemperare l'interesse di un settore produttivo rilevante quale è l'attività di coltivazione delle cave con l'interesse primario della tutela sia del paesaggio che dell'ambiente, l'iter di approvazione del PRAE si è infine conclusa con la Deliberazione della Giunta n. 824 del 13 giugno 2006. Gli aspetti della tutela paesaggistica infatti non erano stati considerati nel PRAE (adottato nel 2000 dopo un decennio dalla sua elaborazione) pur in presenza di norme di tutela paesaggistica ed ambientale già esistenti al momento dell'adozione (Piano urbanistico territoriale tematico per il Paesaggio, Legge quadro delle aree protette n.394/1991, Siti di Importanza comunitaria, Zone di Protezione Speciale ex DPR 357 / 1997).

Con delibera di Giunta regionale del marzo 2009, la Regione Puglia ha adottato un disegno di legge ("nuova disciplina generale in materia di attività estrattiva") con l'obiettivo di aggiornare finalmente la normativa in materia di attività di cava, risalente a oltre vent'anni.

Il nuovo D.d.l. regionale sancisce in particolare l'esigenza di pianificare e programmare l'attività in coerenza con gli altri strumenti di pianificazione territoriale, al fine di contemperare l'interesse pubblico allo sfruttamento delle risorse del sottosuolo con l'esigenza prioritaria di salvaguardia dell'ambiente e difesa del suolo.

A tale riguardo vengono per la prima volta indicate le aree nelle quali l'attività estrattiva è totalmente preclusa, ad esempio nelle aree naturali protette e nei siti di interesse comunitario. Per i profili di tutela paesaggistica e idrogeologica è previsto un rinvio "dinamico" alle previsioni contenute rispettivamente nel Piano paesaggistico e nel Piano di assetto idrogeologico.

Viene anche sancito il principio secondo cui il P.R.A.E. costituisce variante agli strumenti urbanistici generali e le previsioni ivi contenute prevalgono automaticamente sulle eventuali previsioni difformi contenute nei piani urbanistici.

In attesa che si porti a compimento l'iter di approvazione della nuova legge, la Regione Puglia con Deliberazione di Giunta regionale n°445 del 23/2/10 ha approvato le variazioni al PRAE: la carta giacimentologica, le Norme tecniche di Attuazione e il regolamento del PRAE

3. La Carta Giacimentologica

Nella carta giacimentologica sono presenti informazioni e dati di carattere morfologico, litologico, giacimentologico, idraulico, urbanistico ed amministrativo, gestite attraverso un sistema informativo territoriale. Le indicazioni sono finalizzate alla identificazione della effettiva potenzialità di coltivazione di un giacimento.

Inoltre le informazioni presenti si articolano in:

- censimento della cave attive e dismesse alla data

della stipula della convenzione;

- aggiornamento con verifica ed integrazione della carta litologica regionale seguendo le metodologie per l'informatizzazione in coerenza con il SIT della Regione Puglia;
- carta dei vincoli secondo quanto previsto dalle NTA del PRAE

Una prima fase del lavoro, quindi, è stata orientata alla raccolta di dati di archivio relativi alle informazioni amministrative e alla distribuzione sul territorio regionale dei vincoli urbanistici, paesaggistici, culturali, idrogeologici, forestali e archeologici.

Successivamente i dati forniti, principalmente nei formati vettoriale e raster, sono stati omogeneizzati e uniformati al medesimo sistema di riferimento geografico, ossia al sistema U.T.M., fuso 33N, riferito all'ellissoide internazionale WGS84.



Figura 3 – Cava a fossa per inerti calcarei delle Murge.

Figure 3 – Limestone quarry in the Murge region.

Nella produzione del sistema informativo territoriale una fase di lavoro importante è stata dedicata alla realizzazione della mappa dei giacimenti, che costituisce il layer informativo principale della carta giacimentologica.

Una approfondita fase di studi e indagini sul campo circa le caratteristiche geologiche della Puglia ha condotto alla definizione di alcune unità giacimentologiche presenti sul territorio. La base conoscitiva di partenza è stata la Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000, quale unica fonte bibliografica al momento estendibile all'intero territorio e ufficialmente condivisa.

Considerato l'assetto geologico della Puglia, la maggior parte della regione è costituita da un substrato calcareo e calcarenitico, localmente ricoperto da depositi miocenici e plio-quadernari di origine sia marina che continentale. Tale situazione viene rappresentata nella cartografia geologica attraverso una serie di unità che, oltre alle proprietà litologiche, assumono un particolare significato stratigrafico e sedimentario.

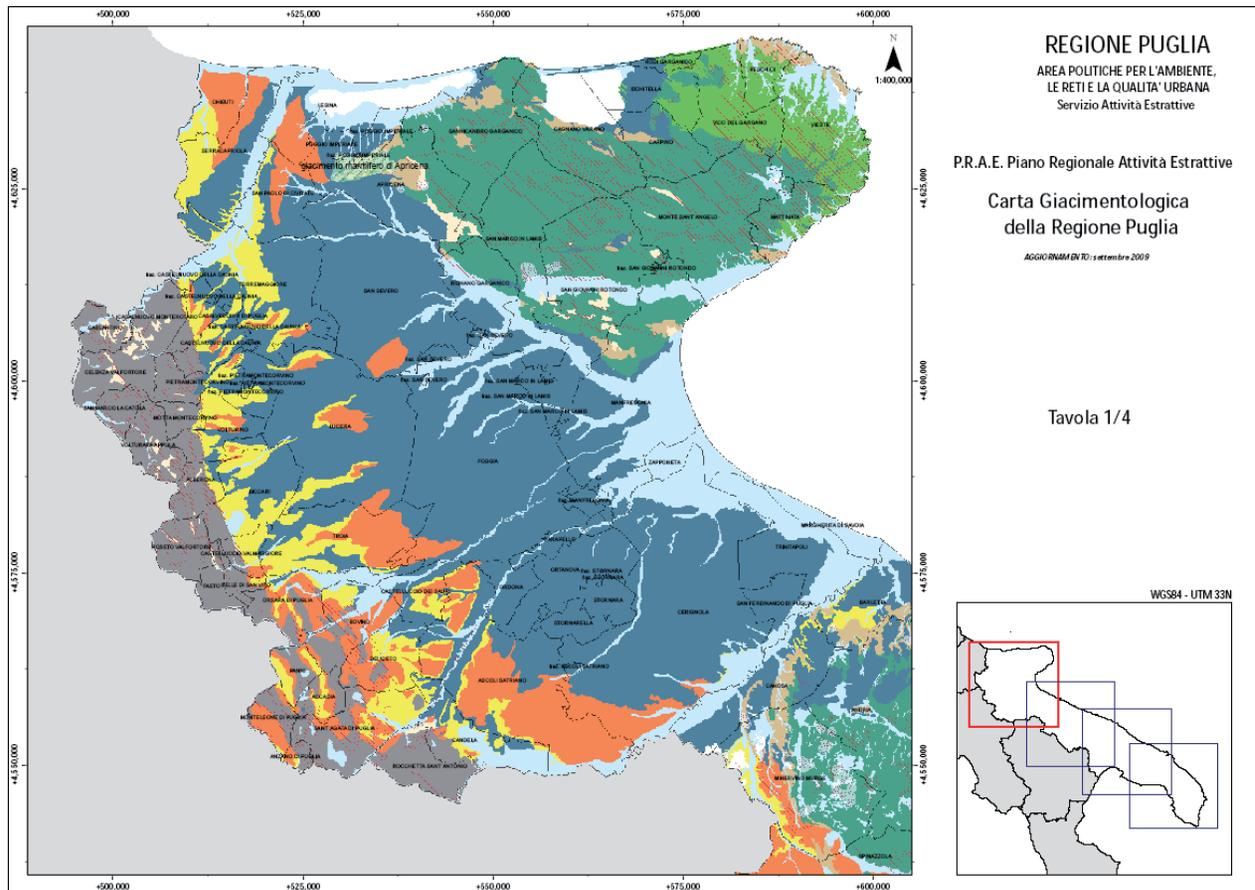


Figura 4 – Carta giacimentologica dell’area della Provincia di Foggia.
 Figure 4 – Mining resources map in the Foggia Province territory.

Ai fini dell’attività estrattiva, tuttavia, resta di primaria importanza la definizione dei caratteri lito-tecnici delle rocce affioranti sul territorio, per si è r cui si è ritenuto di procedere ad una riclassificazione delle risorse litologiche.

Il criterio di base per la realizzazione della Carta Giacimentologica è stato quello di definire la distribuzione delle diverse litologie affioranti nel territorio regionale, cercando di accorparle tenendo conto anche della distribuzione delle cave e la tipologia dei prodotti (inerti, pietre da taglio, ecc), dunque prescindendo da un eventuale condizionamento di carattere stratigrafico formazionale.

Con tali indicazioni, per esempio, Unità formazionali (presenti nella Carta Geologica d’Italia in scala 1:100.000) quali il Calcarea di Monte Sacro (sul Gargano), il Calcarea di Altamura (sulle Murge) e le Dolomie di Galatina (nel Salento) corrispondono alla stessa unità giacimentologica.

Lo studio ha determinato, dunque, un raggruppamento di formazioni rocciose caratterizzate dalle medesime proprietà litologiche e riconducibili ad una medesima classe di materiale, primario per le finalità estrattive. In tal mo-

do sono state individuate nove unità giacimentologiche:

Brecce sciolte o cementate e terre rosse: comprendente tutti i depositi eluvio-colluviali, i detriti di falda e i prodotti residuali del carsismo e dell’alterazione delle rocce;

Depositi conglomeratico-sabbiosi sciolti: insieme di sedimenti grossolani sciolti di fondovalle e dei depositi fluviali recenti, oltre che i depositi sabbiosi di spiaggia attuale;

Depositi conglomeratici, sabbioso-limosi e calcarenitici variamente cementati: complesso di terreni di copertura plio-quadernaria di origine sia marina che fluviale, talora terrazzati;

Depositi sabbiosi e conglomeratici variamente cementati: comprendenti le formazioni conglomeratiche e sabbiose plio-pleistoceniche di riempimento della Fossa Bradanica;

Depositi argillosi e argilloso-marnosi: comprendente tutti i termini argillosi della serie bradanica;

Complesso dei depositi arenaceo-calcareao-pelitici: comprendenti in maniera indistinta tutte le unità alloctone dell’Appennino Dauno;



Figura 5 – Cava pedemontana per inerti calcarei delle Murge.
Figure 5 – Piedmont quarry for crushed limestone production in the Murge region.

Calcareniti e calcilutiti variamente cementate di aspetto tufaceo: rappresentate da tutte le formazioni calcarenitiche dal Miocene al Pleistocene caratterizzate da un buon grado di cementazione e lavorabilità e da uniformità dei caratteri granulometrici e fisici;

Calcari a liste e noduli di selce: gruppo dei calcari di bacino tipicamente in affioramento sul Gargano occidentale, alternati a elementi di selce stratiformi o nodulari;

Calcari e calcari dolomitici, stratificati o in banchi, variamente fratturati: gruppo di formazioni carbonatiche afferenti al medesimo ambiente di piattaforma interna.

Dopo aver definito le unità giacimentologiche i 23 fogli geologici sono stati georiferiti secondo il sistema di riferimento prescelto ed implementati nel G.I.S. A questo punto, sullo stesso layer sono state digitalizzate le aree di affioramento delle unità e salvate in formato shapefile.

4. Prospettive future

In passato si è utilizzata nell'attività di pianificazione la

carta degli affioramenti geologici, invece delle carte dei giacimenti, con evidenti insuccessi per la impraticabilità economica di iniziative collocate in aree così scelte. Nella carta giacimentologica sono invece individuate le aree suscettibili di attività estrattiva, non sottostanti a vincoli o a condizionamenti ostativi all'attività estrattiva. Elementi di pregio diversamente da quanto precedentemente realizzato saranno la facile consultazione, la fruibilità dei dati e il continuo aggiornamento.

La carta giacimentologica è consultabile sul sito: www.regione.puglia.it/areetematiche/attivita_estrattive

Ringraziamenti

Si ringrazia per la preziosa collaborazione l'Ufficio del Settore estrattivo dell'Assessorato all'Ecologia della Regione Puglia e in particolare del suo Dirigente l'Ingegnere Francesco Sciannameo, senza il quale gli obiettivi del presente studio non si sarebbero potuti concretizzare.

Bibliografia

- Regione Puglia (2010) Rapporto sullo stato delle attività estrattive in Puglia. Regione Puglia, Area Politiche per l'Ambiente, le Reti e la Qualità Urbana, Servizio Attività Estrattive. Bari.
- Baldassarre G. & Reina A. (2001) Contributo alla valutazione della resa in blocchi della coltivazione nel bacino marmifero di Apricena (FG). Atti del Convegno GEAM. Trani, novembre 2001.
- D'Amato C., Paesaggi di cava (2002) L'attività estrattiva e il paesaggio in area mediterranea. Atti del Workshop promosso dal CIRP (Consorzio Interuniversitario Regionale Pugliese): Know-how e innovazione tecnologica nel settore lapideo pugliese: università, centri di formazione e imprese a confronto. Bari.
- Greco V., Reina A., Selicato F. (2006) Principi metodologici per azioni di recupero delle cave abbandonate. 2° Congresso Nazionale AIGA – Bari 15-17 febbraio 2006.
- Menoni S. (1996) Pianificazione e incertezza. Elementi per la valutazione e la gestione dei rischi territoriali, FrancoAngeli, Milano.
- Orlando G., Selicato F., Torre C. M. (2005) The use of GIS as tool to support risk assessment, in Geo-information for disaster Management, a cura di P. van Oosterom, S. Zlatanova, E. M. Fendel, ed. Springer Verlag.
- Pinna S. (2002) Rischi ambientali e difesa del territorio, FrancoAngeli, Milano.
- Ronchi E. (2006) Progettare l'uso sostenibile del territorio, in Imperio Maurizio e Vendittelli Manlio (a cura di), "Complessità del territorio e progetti ambientali", Franco Angeli, Milano
- Santoanni F. (1996) Rischio e vulnerabilità. Disastri e territorio, CUEN, Napoli.
- Stella M., "Le pietre da costruzione di puglia: il tufo calcareo e la pietra leccese", quaderno monografico IRIS-CNR 10, Bari, 1991.
- Reina A., Buttiglione L. (2005) Tecniche geologiche tradizionali nella ricerca di nuovi Giacimenti di pietre ornamentali in Puglia. Geologi e Territorio n°1/2 – 2005.
- Zeza F. (1980) Le pietre da costruzione e ornamentali della Puglia, caratteristiche sedimentologico-petrografiche, proprietà fisico-meccaniche e problemi geologico tecnici relativi all'attività estrattiva, in Continuità - Rassegna tecnica pugliese, anno VIII, n.3-4.

Test di risposta termica per la geotermia superficiale: un approccio geostatistico

Roberto Bruno, Sara Focaccia, Francesco Tinti

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali,
roberto.bruno@unibo.it, sara.focaccia2@unibo.it, francesco.tinti2@unibo.it

Thermal Response Test for shallow geothermal applications: a geostatistical approach

ABSTRACT: Thermal Response Test (TRT) is an onsite test used to characterize the thermal properties of shallow underground and of the borehole used to extract / inject heat. The consolidated deterministic methodology based on the “Infinite Linear Source” (ILS) theory is reviewed and a nested probabilistic approach for TRT output interpretation is proposed. 5 key parameters (ground thermal conductivity- λ , ground volumetric heat capacity ρC and borehole thermal resistance- R_b , initial time t_i and final time t_f) are required for applying the theory and must be deduced by the test records. Once chosen, through different methods, initial and final test time, based on a geostatistical residual model in the time-logarithm, the drift analysis of temperature records allows for robust ground thermal conductivity (λ) identification, whose precision is measured by estimation variance. Afterwards a new univariate regression on the original data allows for the identification of the theoretical hyperbolic relationship between ρC and R_b . Once chosen the most appropriate probabilistic distribution function, it is possible to find the joint probabilistic distribution function conditional to the ρC - R_b relationship. Finally the conditional expectation allows for identifying the correct and optimal couple of the ρC - R_b estimated values.

Key terms: Geostatistics, Drift, Ground response test, Ground thermal conductivity, Ground volumetric heat capacity, Borehole thermal resistance, Estimation variance, Conditional probability Distribution function

Termini chiave: Geostatistica, Deriva, test di risposta termica, Conduttività termica del terreno, Capacità termica volumetrica del terreno, Resistenza termica del foro, Varianza di stima, Funzione di distribuzione di probabilità condizionale

Riassunto

Thermal Response Test (TRT) è un test *in situ* utilizzato per caratterizzare le proprietà termiche superficiali del sottosuolo e del foro per l'estrazione / iniezione di calore.

La consolidata metodologia deterministica basata sulla *Infinite Linear Source* (ILS, sorgente lineare infinita) viene rivisitata, proponendo un approccio probabilistico per l'interpretazione degli output del TRT.

Sono necessari 5 parametri fondamentali (conducibilità termica del terreno λ , capacità termica volumetrica del terreno ρC e resistenza termica del foro R_b , tempo iniziale t_i e tempo finale t_f) per l'applicazione della teoria, i quali devono essere dedotti dai dati registrati durante il test.

Scelti, tramite diverse tecniche, tempo iniziale e tempo finale del test, sulla base di un modello geostatistico a residuo nel logaritmo di tempo, l'analisi della deriva della temperatura permette una robusta identificazione della conducibilità termica del terreno (λ), la cui precisione viene misurata mediante la varianza di stima.

Successivamente una nuova regressione monovariata sui dati originali permette l'identificazione del rapporto teorico iperbolico tra ρC e R_b . Una volta scelta la funzio-

ne di probabilità più appropriata per i due parametri, viene identificata la funzione di probabilità congiunta condizionata al rapporto ρC - R_b .

Infine il valore atteso condizionale consente di individuare la coppia corretta e ottimale dei valori stimati ρC - R_b .

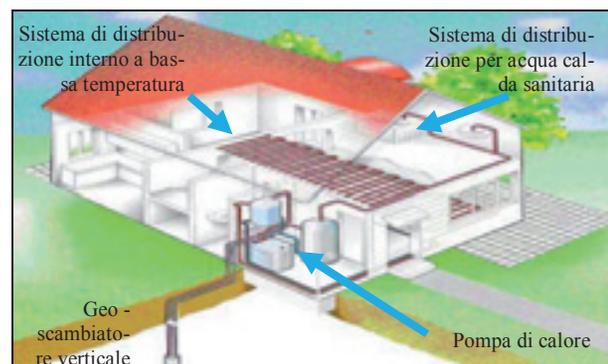


Figura 1. Schema di un sistema geotermico superficiale (Tinti, 2008).

Figure 1. Scheme of a shallow geothermal system based on a surface geoechanger

Introduzione

Negli ultimi anni, si è evidenziato un crescente interesse per sistemi di condizionamento a pompa di calore accoppiati a reservoir geotermici superficiali. Il sottosuolo, installando opportuni geo-scambiatori, viene sempre di più usato come stoccaggio stagionale di energia termica, dal quale è possibile estrarre calore in inverno ed immetterlo in estate.

I geo-scambiatori, di diverso tipo e dimensione, sono prevalentemente a circuito chiuso, dentro i quali circola il fluido termovettore; questo fluido scambia energia termica, principalmente per conduzione, con i materiali naturali incontrati lungo il ciclo.

La variabilità delle condizioni geologiche ed idrogeologiche per ogni installazione dà luogo a diverse potenze termiche supportabili da ogni geo-scambiatore e conseguentemente a diversa energia estraibile dal terreno.

Per questa ragione, un punto critico di ogni buon progetto è la conoscenza, più dettagliata possibile, delle proprietà termiche del sottosuolo [1].

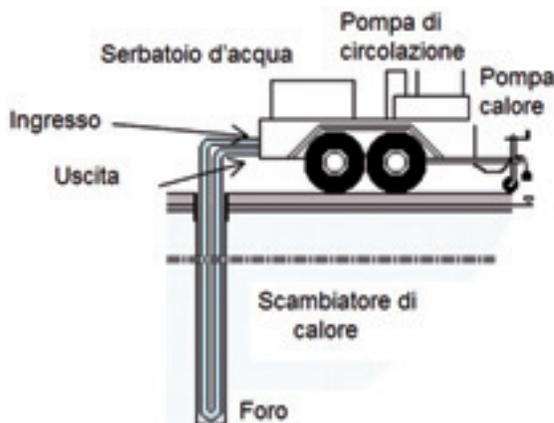


Figura 2. Attrezzatura per il Test di Risposta Termica.
Figure 2. Thermal Response Test rig.

Allo stato attuale della tecnologia [3], il test esistente con il più alto grado di accuratezza per la caratterizzazione del reservoir geotermico superficiale è il Test di Risposta Termica (TRT), che consiste in una simulazione del funzionamento del sistema per un periodo limitato di tempo, attraverso l'iniezione/estrazione di calore a potenza costante all'interno del geo-scambiatore.

Dall'analisi della variazione delle temperature del fluido circolante all'interno del circuito, è possibile avere una stima delle proprietà termiche medie dell'intera porzione del reservoir geotermico considerato.

Calcolo tradizionale della conduttività termica attraverso i dati del TRT

Di seguito è descritto un breve riassunto della teoria tradizionale, necessario per focalizzare i parametri e le ipotesi di base.

Per ottenere la conducibilità termica media effettiva del sottosuolo e la resistenza termica del foro (scambiatore + materiale di cementazione), il sistema deve essere approssimato a un modello termico che permetta di stimare indirettamente questi parametri, a partire dai dati ottenuti dal TRT, e cioè: temperatura di ingresso del fluido, temperatura di uscita, portata di circolazione. Ci sono diversi modelli possibili, tra cui il più utilizzato è il modello della sorgente lineare (Ingellson e Plass, 1948), che è basato sulle seguenti approssimazioni iniziali:

- la temperatura lungo il foro è giudicata costante;
- il foro è considerato di lunghezza infinita per brevi periodi di tempo;
- lo scambio termico tra il fluido e il terreno circostante è considerato puramente conduttivo.

Il problema è stato risolto dall'equazione semplificata di Hellstrom (Eskilso e Mogensen [5] (Equazione 1):

$$\Delta T(r_b, t) = q \cdot R_g = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot a \cdot t}{r_b^2} - \gamma \right) \quad \text{Eq. 1}$$

dove:

- * $\Delta T(r_b, t)$ = differenza di temperatura nell'intorno del foro; è funzione del raggio del foro e del tempo, ed è uguale a $T_b - T_g$ [K];
- * r_b = raggio del foro [m];
- * t = durata del test [s];
- * T_b = temperatura media sulle pareti del foro [K];
- * T_g = temperatura del terreno indisturbato [K];
- * q = potenza termica iniettata per metro nello scambiatore di calore [W/m];
- * R_g = resistenza termica del foro [K/(W/m)],
- * λ = conduttività termica del terreno, giudicata costante [W/(mK)];
- * a = diffusività termica del terreno; è uguale a λ/c [m²/s];
- * $c = \rho C$ = capacità termica volumetrica del terreno [J/(m³K)];
- * γ = costante di Eulero, uguale a 0,5772.

Il terreno è disomogeneo, così che i parametri chimico-fisici non possono essere costanti. Cionondimeno, la semplificazione più diffusa consiste nel considerare un valore effettivo che permetta di soddisfare la relazione teorica. Questo è il caso per la conducibilità termica qui considerata.

L'accuratezza del modello di sorgente lineare aumenta con il tempo del test, così che la curva delle temperature gradualmente abbandona lo stato transitorio per stabilizzarsi. Diverse indagini sperimentali hanno confermato che l'equazione semplificata è accettabile per:

$$t \geq \frac{5r_b^2}{a}$$

La condizione ottimale è ottenuta per:

$$t \geq \frac{20r_b^2}{a}$$

valore che garantisce un'accuratezza intorno a 2.5%.

Un altro fattore di estrema importanza è la resistenza termica R_b tra il fluido termovettore e la superficie esterna del foro, a contatto con il terreno. Normalmente, è approssimata dalla resistenza termica della miscela cementizia usata nel foro, ed è considerata costante lungo la parete del foro.

Vale la seguente relazione (Equazione 2):

$$T_f - T_b = R_b \cdot q \quad \text{Eq. 2}$$

dove :

- T_f = temperatura media del fluido termovettore; $T_f = (T_{fin} + T_{fout}) / 2$ [K];
- T_b = temperatura sulla parete del foro [K];
- q = Potenza termica iniettata per metro [W/m];
- R_b = resistenza termica del foro K/(W/m).

Le due resistenze R_g e R_b sono disposte in serie (Figura 3), così che l'ammontare della potenza termica iniettata risulta costante, mentre la variazione termica totale è la somma delle due: ΔT (Figura 4), cioè $T_f - T_g$ (Equazione.3).

$$\Delta T(r_b, t) = q \cdot (R_b + R_g) = q \left[R_b + \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(\ln \frac{4 \cdot a \cdot t}{r_b^2} - \gamma \right) \right] \quad \text{Eq. 3}$$



Figura 3.- Resistenze disposte in serie, che rappresentano il foro e il terreno.

Dopo diversi passaggi, è possibile esprimere la temperatura media del fluido nella forma della Equazione.4.

$$T_f = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot H} \cdot \ln(t) + \left[\frac{Q}{H} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot a}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right) + T_g \right]$$

dove H è la lunghezza del foro. Eq. 4

L'Equazione 4 assume la forma di una retta, se rapportata al logaritmo del tempo (Equazione 5):

$$T_f = K \ln t + m \quad \text{Eq 5}$$

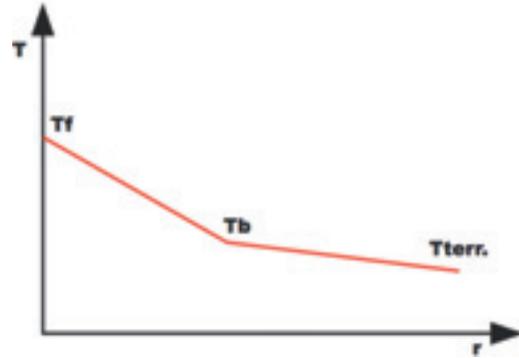


Figura 4. Evoluzione della temperatura, in relazione alla distanza con il centro del foro.

Figure 4. Evolution of temperature distance from the borehole centre.

In tal modo, conoscendo la pendenza K , è possibile ottenere la conducibilità termica effettiva media del sottosuolo λ (Equazione 6), indipendentemente dal tempo [6]:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi H K} \quad \text{Eq. 6}$$

L'intercetta della retta con l'asse delle ordinate, per contro, permette di stimare la resistenza termica del foro, attraverso la seguente equazione (Equazione 7):

$$R_b = \frac{H}{Q} (m - T_g) - \left(\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\ln \frac{4a}{r_b^2} - \gamma \right) \right) \quad \text{Eq. 7}$$

È possibile trovare la pendenza K e l'intercetta m effettuando una regressione lineare (Figura 5) sui dati sperimentali T_f .

Una volta ottenuta la conducibilità termica λ con l'equazione 6, e una volta stimata la capacità termica volumetrica del terreno partendo dall'analisi della successione stratigrafica, la resistenza termica del foro R_b è ottenuta utilizzando l'equazione 7.

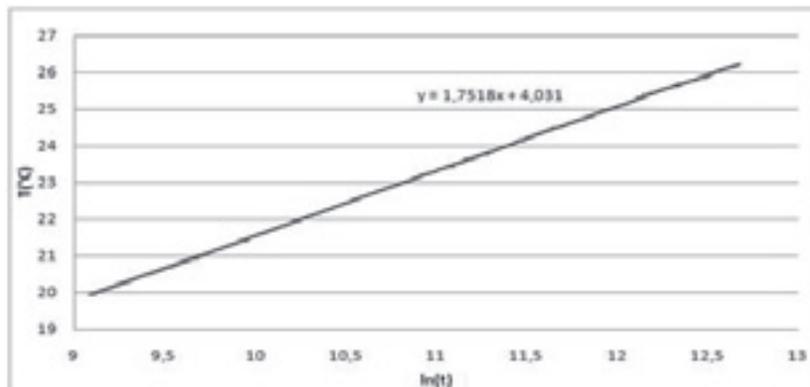


Figura 5. Regressione lineare della temperatura del fluido Tf su scala logaritmica ln(t).

Figure 5. Linear regression of fluid temperature Tf on time_log scale, ln(t).

L'approccio probabilistico all'analisi del TRT

Una tipica registrazione di un TRT è un grafico caratterizzato da un set di dati sperimentali. E' possibile riferirsi a un test molto regolare, ma, cionondimeno, ci saranno sempre delle piccole fluttuazioni della temperatura media del fluido (Figura 6).

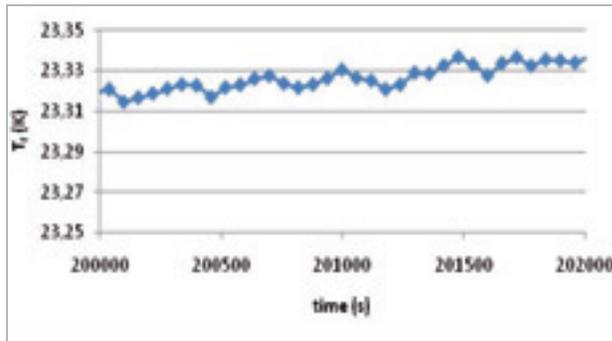


Figura 6. Zoom dell'evoluzione della temperatura del fluido sulla scala dei tempi.

Figure 6. Zoom of the evolution of fluid temperature in the time scale.

La teoria della sorgente lineare infinita si riferisce alla ben nota relazione che permette di rapportare la temperatura del fluido T_f al tempo logaritmico, $\ln(t)$ (vedi Equazione 5).

Una regressione permette di stimare la costante K e quindi la conducibilità termica del terreno λ , attraverso una coppia di parametri ben noti, la potenza iniettata Q e la lunghezza del foro H .

La prima considerazione consiste nel fatto che si sta affrontando un classico problema di stima dei parametri, perché non si sa, e non si saprà mai, il vero parametro di servizio K , ma solo la sua stima, K^* . Si produce quindi un errore di stima, che può essere solamente considerato come una variabile aleatoria.

Oltre ad alcune semplificazioni e approssimazioni (ad es. $T_f = (T_{fin} + T_{fou}) / 2$ etc.), il metodo tradizionale si basa su una premessa fondamentale: la potenza termica iniettata Q deve essere mantenuta costante durante tutto il periodo del test. In effetti, il valore della potenza dipende da diversi fattori secondari che influenzano il TRT (attrezzatura impiegata, condizioni meteorologiche, variazione di portata dovuta alla variazione della temperatura del fluido durante il test etc.). In pratica, il valore di potenza termica per ogni test, durante il periodo della prova, è soggetto a fluttuazioni, in alcuni casi rilevanti. Inoltre, le temperature registrate sono influenzate da diversi fattori, non solo quelli che influiscono sulla stabilità della potenza (influenza dell'irraggiamento solare sulle connessioni test - sonda etc.).

È possibile considerare perciò l'approccio lineare come la rappresentazione del comportamento medio dei risultati del test e i dati sperimentali fluttuano attorno a

questo andamento medio.

Inoltre, è opportuno considerare che le registrazioni di TRT ripetute raramente si sovrappongono esattamente ai profili di T_f precedenti, ma coincidono solo sulla media. Questo è spiegato dal fatto che tali fattori secondari variano e non possono essere controllati. Il punto è che le registrazioni di T_f sono irregolari e impossibili da predire, e quindi è quasi inevitabile attribuire una natura variabile alle fluttuazioni.

Può essere interessante proporre un approccio probabilistico capace di tenere in conto degli aspetti aleatori dei dati sperimentali del TRT e della loro elaborazione. Gli strumenti sviluppati in questo caso possono fornire nuovi punti di vista e nuove idee su come migliorare o risolvere i classici problemi del test.

L'approccio probabilistico considera la temperatura del TRT come una funzione aleatoria (FA) non stazionaria nel tempo [7], modellizzata come la somma di una funzione media (il valore atteso), $m(t)$, deterministico, e una fluttuazione aleatoria¹, $Y(t)$, con media zero (Eq. 9). La funzione media, che rappresenta il comportamento medio della FA, è definita sulla base della teoria della sorgente lineare (Eq. 10):

$$T(t) = m(t) + Y(t) \quad \text{Eq. 9}$$

$$E[T(t)] = m(t) = a + b \ln t \quad t \geq t_0$$

Eq. 10

Una registrazione del TRT è quindi considerata come una realizzazione della FA, cioè uno dei possibili risultati. La natura aleatoria dei risultati del test è trasferita alle fluttuazioni [9]). Tale è la caratterizzazione delle fluttuazioni che fornirà gli strumenti per risolvere il problema dell'interpretazione del TRT.

In Figura 7 è rappresentata una visualizzazione grafica del modello, il cosiddetto modello a residui.

Stima della conduttività termica attraverso il metodo della deriva

Il metodo della deriva in teoria

Richiamiamo il modello probabilistico in cui la temperatura del fluido è considerata la somma della funzione media $m(t)$ e della fluttuazione, $Y(t)$, $T(t) = m(t) + Y(t)$, con la funzione media corrispondente al trend lineare nella scala del logaritmo del tempo, $m(t) = a + b \ln t$.

Una funzione interessante, derivata dal modello FA, è il valore atteso degli incrementi $D(t, h)$ [4]. Se la media è lineare nella scala del logaritmo del tempo $m(t)$, anche la deriva ha un comportamento lineare, a partire dall'origine, con la stessa pendenza b ; ma nel piano D (Eq.11):

$$D(t, h) = m(t+h) - m(t) = b (\ln(t+h) - \ln(t)) = b \delta = D(\delta)$$

Eq. 11

Sperimentalmente la media probabilistica è sostituita

¹ Anche chiamata residuo o rumore.

dalla media statistica degli n_c , cioè degli incrementi con la stessa dimensione logaritmica δ (Equazione 12).

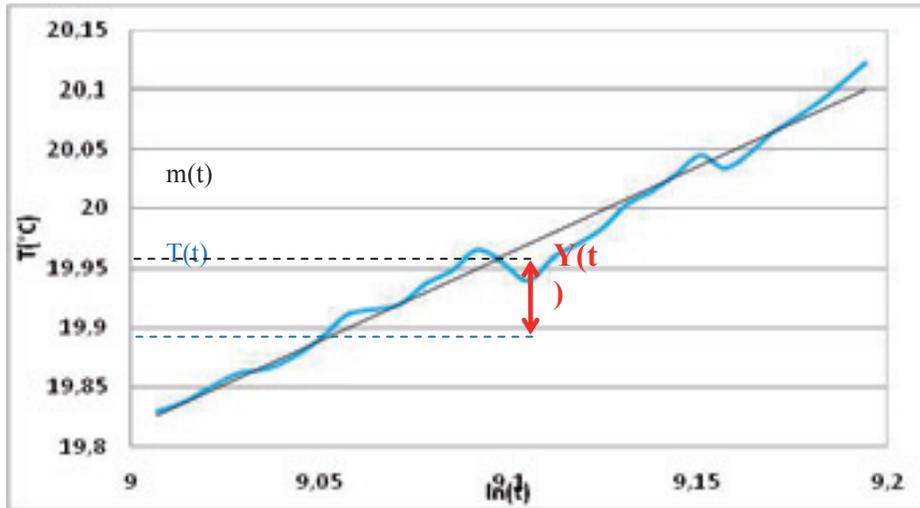


Figura 7. Evoluzione di T_f in $\ln(t)$ e le sue fluttuazioni $Y(t)$.
 Figure 7. Evolution of T_f in $\ln(t)$ and his fluctuations $Y(t)$.

$$D(\delta) \cong D^*(\delta) = \frac{\sum_{i=1}^{nc(\delta)} [T(\ln t_i + \delta) - T(\ln t_i)]}{nc(\delta)} \quad \text{Eq. 12}$$

Date le coppie sperimentali $\{D^*(\delta), \delta\}$, la regressione dei minimi quadrati può essere applicata per calcolare il coefficiente b . E' da notare che questa regressione è fatta solo su un coefficiente, b appunto, perché la deriva ha un'intercetta nulla. Intuitivamente è chiaro che questo fatto permette una stima migliore della pendenza.

Il metodo della deriva in pratica

Una regressione necessita un'informazione uniforme, cioè valori sperimentali equivalenti dal punto di vista qualitativo, e disponibili per multipli dello stesso passo elementare, $\delta = n\delta_0$. Nella pratica comune le temperature sono registrate a intervalli di tempo costanti $t_{i+1} = t_i + h$, dove il passo del tempo h può essere, per esempio, di 60 secondi. Questo significa che nella scala del logaritmo del tempo c'è una densità di dati differenti, bassa all'inizio e alta alla fine.

Tale variabilità della densità è rilevante e può influenzare negativamente la stima della deriva perché genera pesi diversi in relazione alla coordinata $\ln(t)$. La soluzione è un *declustering* dei dati nella scala del logaritmo del tempo, assolutamente compatibile dato il numero molto elevato di dati ricadenti in un intervallo mobile di lunghezza fissata (Figura 8). Questo numero è stato definito in accordo con il numero minimo di dati ricadenti nella finestra mobile, in pratica il primo intervallo.

Dopo il *declustering*, si fa assumere alla deriva sperimentale la t_0 trovata dal metodo tradizionale (Figura 9).

I passi successivi coincidono con il metodo tradizionale: la pendenza è stimata con una regressione lineare e

la conduttività termica del terreno è dedotta con

$$\lambda^* = \frac{Q}{4\pi b^* H}$$

Per calcolare la resistenza termica del foro è necessaria l'intercetta della media nella scala del logaritmo del tempo. Quindi si esegue una nuova regressione lineare monoparametrica nel classico spazio $T_f - \ln(t)$ usando la pendenza trovata con il calcolo della deriva (Figura 8).

Comparazione tra i metodi diversi

Un criterio oggettivo è necessario per comparare i due metodi per la stima della conduttività termica del terreno. La proposta esaminata in questo articolo si basa sul fatto che si sta facendo una stima, la stima della pendenza. La qualità del risultato è fortemente caratterizzata dalla varianza di stima, $\sigma_b^2 = \text{var}\{b^* - b\}$. L'approccio probabilistico permette di calcolare la varianza in ambedue i casi, sia con il metodo tradizionale, che con quello nuovo proposto:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}\{T(t+h) - T(t)\} = \frac{1}{2} E\left[\left(Y(t+h) - Y(t)\right)^2\right] \quad \text{Eq. 13}$$

Una volta noto il modello del variogramma, la varianza di stima è immediatamente dedotta. Nel caso di stimatore lineare (Eq. 14) (come la regressione lineare), si ottiene la varianza di stima tramite i pesi di una combinazione lineare e la relativa posizione dei dati

$$h_{\alpha\beta} = |t_\alpha - t_\beta| \quad \text{(Equazione 15)}$$

$$b^* = \sum_{i=1}^{nd} v_\alpha T(t_\alpha) \quad \text{Eq. 14}$$

$$\sigma_e^2 = \text{var}\{b^* - b\} = - \sum_{\alpha=1}^{nd} \sum_{\beta=1}^{nd} v_{\alpha} v_{\beta} \gamma(\ln t_{\alpha} - \ln t_{\beta}) \quad \text{Eq. 15}$$

gramma sperimentale dei residui;
 - il variogramma modello delle fluttuazioni, nel caso di studio proposto nell'articolo, è un variogramma annidato, pepita+ sferico+ gaussiano (Figura 11).

In pratica:

- i pesi v_{α} sono definiti dalla regressione lineare;
- il modello di variogramma è identificato dal vario-

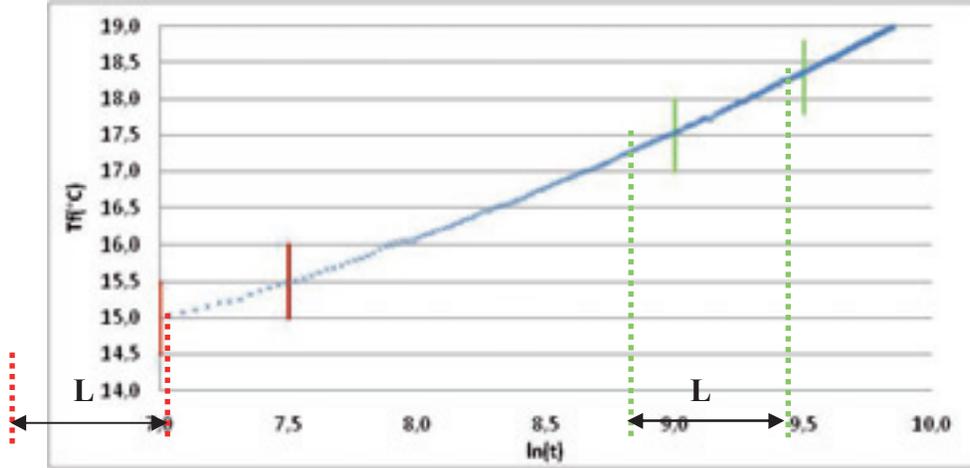


Figura 8. Evoluzione della temperatura nella scala del logaritmo del tempo. Gli intervalli rossi e verdi hanno la stessa lunghezza L, ma differente densità di dati (molto maggiore nell'intervallo verde).
 Figure 8. Temperature evolution in time_log scale. Red and green intervals have the same length L, but different density of data.

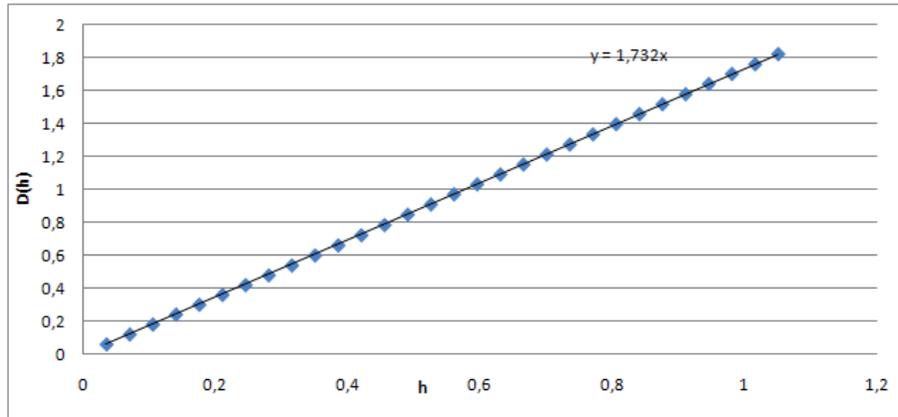


Figura 9. Valori sperimentali della deriva (pallini blu) e rispettiva regressione lineare (linea nera)-
 Figure 9. Plot of experimental values of Drift versus time_log lag (blue dots) and the resulting regression (black line)

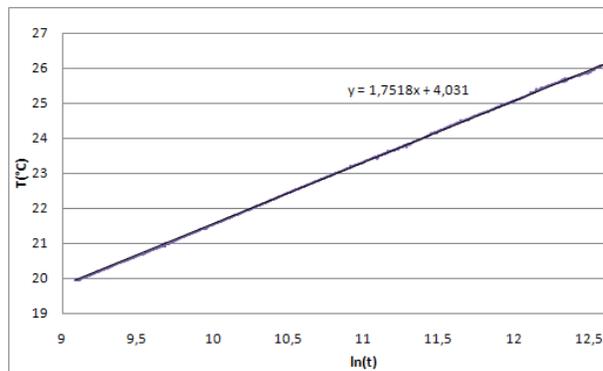


Fig. 10. Regressione lineare.
Figure 10. Linear regression.

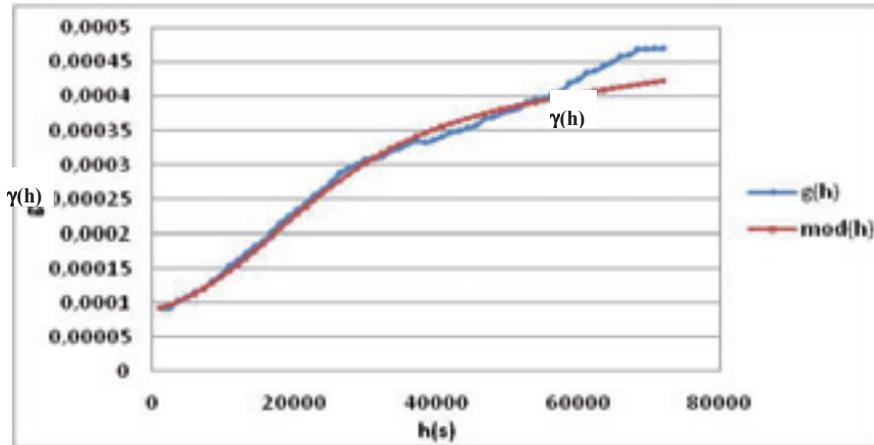


Figura 11. Variogramma delle fluttuazioni Y, in blu lo sperimentale e in rosso il modello.
Figure 11. Variogram of fluctuations Y, experimental (blue) and model (red)

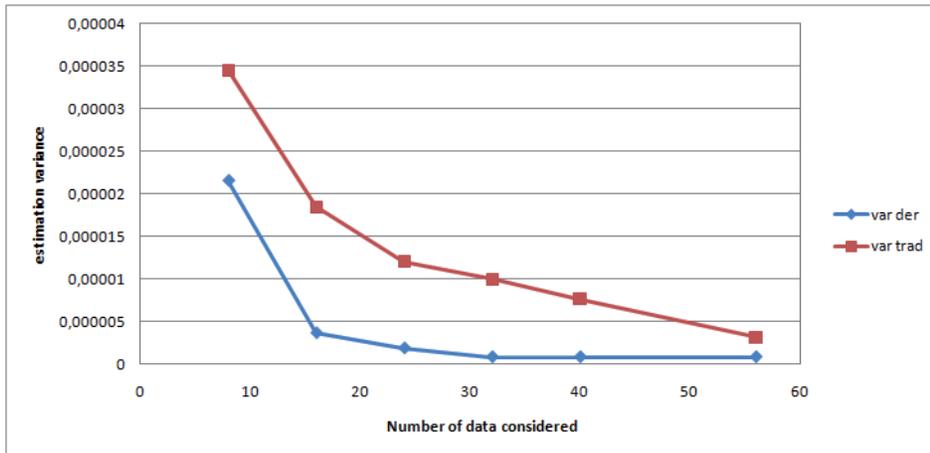


Figura12. Evoluzione della varianza di stima nel caso di metodo della deriva (blu) e nel caso del metodo tradizionale (rosso).
Figure 12. Evolution of estimation variance in case of drift method (blue) and of traditional method (red).

Entrambe le metodologie portano a valori stimati della pendenza b molto simili, ma è possibile vedere che il calcolo mediante la deriva è più preciso, assicurando una varianza di stima più bassa rispetto al metodo tradizionale (Figura 12).

In casi reali, quando il numero di dati è molto elevato, le differenze nella precisione diventano comunque trascurabili.

La relazione condizionante fra ρC e R_b

Introduzione

Una volta calcolata la conduttività termica del terreno, il passo successivo consiste nel calcolare la resistenza termica del foro. La procedura normale prevede prima la scelta di una capacità termica volumetrica specifica $c = \rho C$ per il tipo di terreno e quindi, tramite l'equazione, viene effettuato il calcolo della resistenza termica del fo-

ro, tramite l'equazione 7.

Tale calcolo è realizzato in via deterministica, imponendo un valore di capacità termica volumetrica che viene scelto come una media dei valori degli strati incontrati nel sottosuolo considerato.

Ma nella realtà la capacità termica volumetrica del terreno, c , può variare all'interno di un range di variabilità definito, per esempio, dalle tabelle delle norme tecniche VDI; è possibile perciò supporre di avere una distribuzione simmetrica della probabilità a priori (es. gaussiana), con una media, m_c , coincidente con il valore medio dei valori tabellari. E' possibile anche considerare che la dimensione di tale semi intervallo sia corrispondente a $2\sigma_c$.

La resistenza termica del foro, R_b , ha un range di variabilità i cui estremi, R_{max} e R_{min} sono calcolati numericamente sulla base dell'esperienza, come variazioni ri-

spetto ad un valore medio, m_R , che corrisponde ad un foro ipoteticamente perfetto (di cui si conoscono le caratteristiche geometriche e termiche).

L'attribuzione di una distribuzione di probabilità alla resistenza termica del foro richiede alcune ipotesi: viene supposta una distribuzione uniforme di tale variabile, con media, m_R , uguale al valore centrale e varianza pari a

$$\sigma_R^2 = \frac{\Delta R^2}{12}$$

Distribuzione bivariata di probabilità'

Realisticamente le due variabili (resistenza termica del foro e capacità termica volumetrica del terreno) sono indipendenti, considerato che la capacità termica volumetrica del terreno è una grandezza naturalmente variabile, mentre la resistenza del foro è una variabile artificiale, che dipende da un'azione umana (la perforazione, l'installazione del geoscambiatore e l'iniezione della miscela cementizia). La distribuzione di probabilità congiunta è pertanto il prodotto di due distribuzioni monovariate:

$$f(c, R_b) = f_c(c) f_{R_b}(R_b) \tag{Eq. 17}$$

Distribuzione condizionale bivariata

Il criterio di ottimalità, cioè la scelta della coppia di valori ottimali, (c_o, R_o) , può fare riferimento ad un classico quadro di stima: scelgo uno stimatore corretto che minimizza la varianza di stima. In realtà non si tratta di un problema bivariato, ma monovariato, in quanto la relazione teorica lineare consente di eliminare una delle due variabili:

$$\omega_1 \ln(c) + \omega_2 R_b + \omega_3 = 0 \tag{Eq. 18}$$

L'ottimalità di uno dei parametri implica l'ottimalità dell'altro. Per tale motivo è sufficiente considerare una variabile che vari lungo la retta condizionante, perché ciò equivale a considerare la coppia di parametri condizionati dalla relazione lineare.

Data una variabile aleatoria, di cui si conosce la distribuzione di cui si vuole stimare il valore vero della realizzazione non campionata, il valore ottimale coincide con la media, perché garantisce la correttezza della stima e la minimizzazione della varianza. L'errore di stima è dato dalla differenza fra valore vero X e valore stimato x_o :

$$e = x_o - X \tag{Eq. 19}$$

Il valore vero non noto è una variabile aleatoria, quindi anche l'errore è una variabile aleatoria. Se classicamente si chiede allo stimatore di essere corretto e ottimale il valore atteso dell'errore deve essere nullo e la varianza di stima deve essere minimizzata:

$$E[e] = E[x_o - X] = 0 \Rightarrow E[X] = m_x$$

$$E[e^2] = \min \Rightarrow \frac{\partial E[(x_o - X)^2]}{\partial x_o} = 0 \Rightarrow E[-2(x_o - X)] = 0 \Rightarrow x_o = E[X] \tag{Eq. 20}$$

Pertanto il problema è risolto se si conosce la distri-

buzione di probabilità della variabile che descrive la relazione lineare fra i due parametri di interesse.

La relazione condizionante riduce di una dimensione il dominio di variabilità della legge bivariata, ed identifica un sottodominio di esistenza della coppia di valori possibili dei parametri sulla base del TRT. I nuovi estremi, $c_{Lmax}, c_{Lmin}, R_{Lmax}, R_{Lmin}$, sono ovviamente inclusi negli intervalli di esistenza originali:

$$(c_{Lmax}, c_{Lmin}) \subseteq (c_{max}, c_{min})$$

$$(R_{Lmin}, R_{Lmax}) \subseteq (R_{max}, R_{min})$$

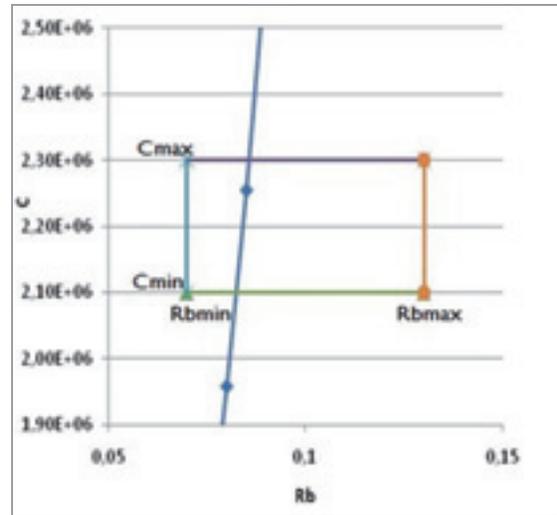


Figura 13. Area di validità della curva R_b -c: tramite l'intersezione si ottiene un campo ancora più circoscritto di validità.

Figure 13. Curve validity area: through the intersection between the curve and the domain we obtain a smaller validity area.

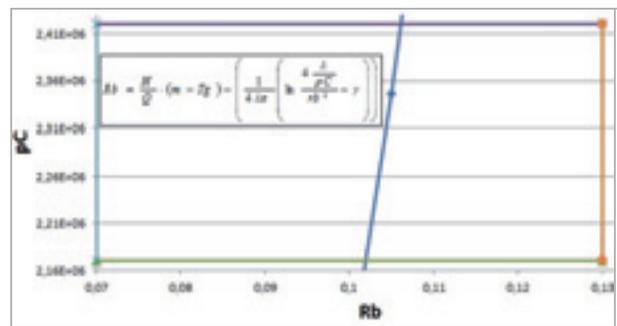


Figura 14. Zoom sull'area di validità della curva R_b -c e equazione della R_b .

Figure 14. Zoom on the validity area of R_b -c curve and R_b equation.

Il sottodominio, che deriva dalla relazione lineare condizionante, identifica una distribuzione di probabilità condizionale. Chiamiamo L il sottodominio definito dalla condizione lineare condizionante. La distribuzione condizionale si scrive:

$$f(c, R | c, R \in L) = \frac{f(c, R)}{F(c, R \in L)} = \frac{f_c(c) f_R(R)}{[F_C(c_{Lmax}) - F_C(c_{Lmin})][F_R(R_{Lmax}) - F_R(R_{Lmin})]}$$

Ove la legge bivariata rispetta gli assiomi delle probabilità. In pratica:

$$F(c_{max}, R_{max}) \cong 1 \quad F(c_{Lmin}, R_{Lmin}) \cong 0 \quad \text{Eq. 22}$$

Il valore ottimale risulta pertanto: (Equazione 23)

$$c_o = E[c | c, R \in L] = \int_{c_{Lmin}}^{c_{Lmax}} c f(c, R | c, R \in L) dc \quad \text{Eq.23}$$

Sostituendo R:

$$a_1 c + a_2 R + a_3 = 0 \quad \rightarrow \quad R = \frac{-a_1 c - a_3}{a_2}$$

$$c_o = \int_{c_{Lmin}}^{c_{Lmax}} c f(c, R | c, R \in L) dc = \frac{\int_{c_{Lmin}}^{c_{Lmax}} c f_c(c) f_R\left(\frac{-a_1 c - a_3}{a_2}\right) dc}{[F_C(c_{Lmax}) - F_C(c_{Lmin})][F_R(R_{Lmax}) - F_R(R_{Lmin})]} \quad \text{Eq. 24}$$

In alternativa si può risolvere tutto in R:

$$R_o = \int_{R_{Lmin}}^{R_{Lmax}} R f(c, R | c, R \in L) dR = \frac{\int_{R_{Lmin}}^{R_{Lmax}} R f_C\left(\frac{-a_2 R - a_3}{a_1}\right) f_R(R) dR}{[F_C(c_{Lmax}) - F_C(c_{Lmin})][F_R(R_{Lmax}) - F_R(R_{Lmin})]} \quad \text{Eq. 25}$$

Conclusioni

Questo lavoro ha introdotto i risultati che si ottengono utilizzando un approccio probabilistico nell'analisi del TRT, precisamente adottando un punto di vista geostatistico.

In generale, molti aspetti dell'analisi dei dati possono essere valutati, interpretati, risolti tramite la caratterizzazione delle fluttuazioni attorno al comportamento medio della temperatura del fluido, come rappresentato dalla teoria della sorgente lineare. Le fluttuazioni possono spiegare fisicamente quello che succede durante il test. Infatti, a partire dalle fluttuazioni, tramite la loro funzione di autocorrelazione (il variogramma) è possibile calcolare la varianza di stima dei parametri di interesse, i quali sono utili per l'identificazione delle proprietà termiche del sottosuolo.

In particolare, sono stati proposti due metodi basati sulla caratterizzazione geostatistica del TRT i quali permettono il calcolo di: i) conduttività termica del terreno e ii) capacità termica volumetrica del terreno e resistenza termica del foro.

- i) Il metodo della deriva garantisce una stima migliore della conduttività, comparato con il metodo tradizionale. In termini numerici la precisione è simile per test con migliaia di misure. Cionondimeno è interessante e immediato il raffronto fra i valori ottenuti con i diversi approcci.
- ii) L'approccio condizionante riguarda il calcolo accoppiato di capacità termica volumetrica del terreno e resistenza termica del foro che permette di ottenere una coppia di valori più attendibile e legata al test reale.

Bibliografia

- | | | |
|---|---|---|
| <p>[1] Bruno, R., Focaccia, S., Tinti, F. (2009) – “La caractérisation d'un réservoir géothermique superficiel” – Journées de Géostatistique, Fontainebleau - Paris (Francia)</p> <p>[2] Bruno, R., Focaccia, S., Tinti, F. (2010) – “Geostatistical modelling of shallow geothermal reservoirs”- Geothermal PhD day, Potsdam - Berlino (Germania)</p> <p>[3] Bruno R., Tinti F., Focaccia S., Mantar S. (2009) - “Recent developments of Thermal Response Test” Geotherm Expo, Ferrara Fiere</p> | <p>[4] Bruno, R., Focaccia, S., Tinti, F. (2010) – “New evaluation method of TRT's data” – Annex 21, DICAM - Università di Bologna (Italia)</p> <p>[5] Eskilson, P. (1987) – “Thermal analysis of heat extraction boreholes” – PhD Thesis, Lund University (Svezia)</p> <p>[6] Gehlin, S. (2002) – “Thermal response test. Method, development and evaluation” Phd Thesis, Lulea University (Svezia)</p> <p>[7] Matheron G. (1978) - “Estimer et choisir: essai sur la pratique des probabilités”, École des Mines de Paris</p> | <p>[8] Tinti, F. (2008) – “Geotermia per la climatizzazione – Dario Flaccovio Editore , Palermo (Italia)</p> <p>[9] Witte, H., Van Gelder, G., Spittler, J. (2002) – “In situ measurements of ground thermal conductivity: the dutch perspective” – ASH-RAE Transactions, Vol. 108, No. 1</p> |
|---|---|---|

Le aree carsiche della Liguria: un esempio di metodologia per la valorizzazione e la tutela della geodiversità

Francesco Faccini¹, Luigi Perasso², Flavio Poggi³, Alessandro Vernassa²

¹Università di Genova – DISAM (Sezione di Scienze Geografico-Ambientali), faccini@unige.it

²Delegazione Speleologica Ligure, gigi.per@libero.it, speleoalex@gmail.com

³Regione Liguria, Settore Assetto del Territorio e Controllo Tecnico, flavio.poggi@regione.liguria.it

The Ligurian karstic areas: an example of methodology due to geodiversity development and safeguard

ABSTRACT: The Regional Law No 14/1990 fundamentally contributed to the understanding, enhancement as well as protection of the karstic ecosystem. Furthermore it allowed the identification of regional karstic areas as well as the drawing of the related rules concerning land planning and management. The new Regional Law No 39/2009 concerning geodiversity attached importance to the karst aquifers protection: an updating of the existing karst areas is required to this purpose; these areas will represent an essential level of the Water Protection Master Plan. Besides providing a summary of the results that have been obtained more than two decades after the issuing of the regional rules regarding speleology, the purpose of this work is to provide a methodology for redefining the karst areas. The starting point is represented by information concerning caves register; the first step towards a new redefinition of karst areas can be obtained through the introduction of information levels concerning karst-prone rock formations that can be provided by the regional data bank. This redefinition will be divided into a first level according to the Hydrogeological Tectonic Units and a second level according to its geographical location. This level will be further divided according to geomorphology into recharge areas – both scattered or concentrated – and karstic spring areas.

Key terms: Environmental Geology, Karstic areas, Geodiversity

Termini chiave: Geologia ambientale, Aree carsiche, Geodiversità

Riassunto

La Legge Regionale n. 14/1990 ha contribuito in modo sostanziale alla conoscenza, alla valorizzazione e alla protezione dell'ecosistema carsico e ha permesso l'individuazione delle aree carsiche regionali e la definizione della normativa connessa in tema di pianificazione e gestione del territorio.

Con l'emanazione della nuova Legge Regionale n. 39/2009 in tema di geodiversità è data importanza alla tutela degli acquiferi carsici: a tal fine si rende necessario l'aggiornamento delle aree carsiche esistenti, anche perché le stesse andranno a costituire un livello fondamentale nel Piano di Tutela delle acque.

Lo scopo del presente lavoro, oltre ad illustrare un quadro sintetico dei risultati ottenuti a più di vent'anni dall'emanazione della normativa regionale in tema di speleologia, è quello di fornire una base metodologica per la ridefinizione delle aree carsiche attuali.

La base di partenza è infatti rappresentata dalle informazioni relative al catasto delle cavità censite; con la successiva introduzione dei livelli informativi relativi alle formazioni suscettibili di modellamento carsico derivati dalla banca-dati regionale si può ottenere una prima base per una nuova ripermimetrazione delle aree carsiche, la

quale prevedibilmente sarà articolata su un primo livello distinto per Unità Tettonico-Idrogeologiche e un secondo livello determinato su base geografico-fisica. Quest'ultimo sarà suddiviso su base geomorfologica e idrogeologica in aree di ricarica, diffusa o concentrata, e aree sorgive.

Introduzione

L'importanza delle grotte e delle zone carsiche in generale è ormai riconosciuta; oltre alla necessità di conservare le relative forme e paesaggi nell'ambito di una strategia globale di salvaguardia della geodiversità, in un'area carsica sono generalmente presenti significative componenti che rivestono valore economico, culturale e scientifico (IUCN World Commission for Protected Areas, 1997). Agricoltura e silvicoltura, gestione della risorsa idrica, attività estrattive nei calcari, nelle dolomie e nei gessi, turismo, sono in genere le più importanti forme di attività economica nelle aree carsiche (Faccini et al., 2005; 2007; Brandolini et al., 2008). Un'ampia varietà di valori scientifici coesistono in questo ambiente: solo in termini di scienze della terra ci sono interessi di natura paleontologica, stratigrafica, tettonica, geomorfologica, climatica e idrogeologica. Inoltre, molte zone carsiche sono impor-

tanti per ragioni naturalistiche, biologiche, archeologiche, paleontologiche, spirituali, religiose, estetiche, ricreative e didattiche.

Un ecosistema carsico si presenta particolarmente vulnerabile, probabilmente più di qualunque altro ambiente terrestre. Si ritiene fondamentale il suo riconoscimento, quale sistema da salvaguardare e proteggere, ma non solo per le sue caratteristiche naturali di alto valore scientifico o paesaggistico: in molti casi la protezione è di interesse molto superiore per le implicazioni ambientali, che a loro volta possono determinare rilevanti impatti economici. Le aree carsiche, infatti, sovente sottendono importanti acquiferi. La risorsa idrica sotterranea in ambiente carsico può risultare estremamente vulnerabile all'inquinamento (Vigna, 2001). Per questo motivo, in particolare, una corretta gestione dell'ambiente carsico è un elemento essenziale per la gestione delle risorse idriche in esso presenti.

Da vent'anni la Liguria, attraverso la Legge Regionale n. 14 del 3 aprile 1990, in considerazione del pubblico interesse legato a valori estetico-culturali, idrogeologici, turistici, ricreativi, paleontologici del patrimonio speleologico e delle aree carsiche esistenti nel territorio, promuove iniziative volte alla sua conoscenza, conservazione e valorizzazione.

L'emanazione della L.R. n. 14/1990 ha comportato l'individuazione delle aree carsiche regionali e la definizione della normativa connessa in tema di pianificazione e gestione del territorio; la legge ha inoltre costituito ufficialmente il catasto regionale delle grotte, la cui gestione e il periodico aggiornamento sono stati affidati alla Delegazione Speleologica Ligure.

Con l'emanazione della Legge Regionale n. 39 del 7 ottobre 2009, che ha abrogato la precedente n. 14/1990, la Liguria, traguardando l'obiettivo dello sviluppo sostenibile attraverso la cura del territorio e la tutela delle

risorse naturali, riconosce il pubblico interesse per la tutela, gestione, valorizzazione della geodiversità, il valore strategico e il pubblico interesse alla tutela degli acquiferi carsici, la specificità delle aree carsiche e la funzione scientifico-culturale della Delegazione Speleologica Ligure, come associazione federativa dei gruppi speleologici operanti sul territorio regionale.

A seguito dei progressi ottenuti in campo speleologico, che hanno portato a un consistente incremento del numero di grotte esplorate in Liguria, alla migliore georeferenziazione delle stesse e all'avanzamento del Progetto CARG (CARTografia Geologica), relativo all'elaborazione della cartografia geologica nazionale alla scala 1 : 50.000, sono previsti l'aggiornamento e la nuova perimetrazione delle aree carsiche.

L'aggiornamento delle aree carsiche consentirà di ottenere una cartografia di sintesi che costituirà un livello fondamentale nel Piano di Tutela delle acque, come stabilito dal Testo Unico Ambientale (D. Lgs. n. 152 del 3 aprile 2006).

Lo scopo del presente lavoro, oltre illustrare un quadro sintetico dei risultati ottenuti a oltre vent'anni dalla pubblicazione della normativa regionale in tema di speleologia, è quello di fornire una base metodologica per la ridefinizione delle aree carsiche attuali.

Le aree carsiche della Liguria

Le aree carsiche della Liguria sono state definite con la Legge Regionale n. 14/1990, intendendo come tali quelle zone in cui si osservano morfologie e fenomeni carsici superficiali, o comunque in cui esista un collegamento fisico, idrogeologico e funzionale con fenomeni carsici ipogei. Per grotta è intesa una cavità sotterranea naturale con sviluppo superiore a 5 m.

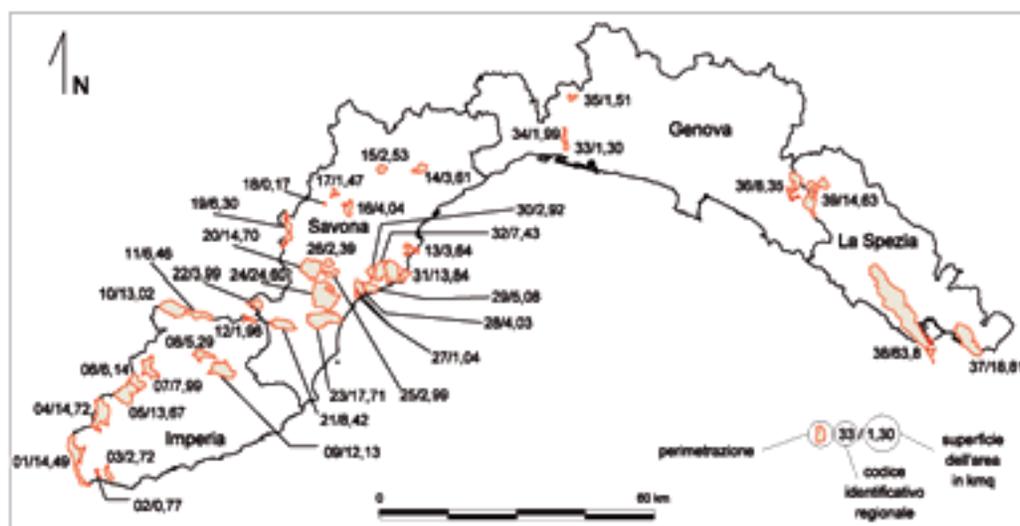


Figura 1 - Le 39 aree carsiche della Liguria individuate ai sensi della L.R. 14/1990.

Figure 1 - The 39 Ligurian karstic areas.

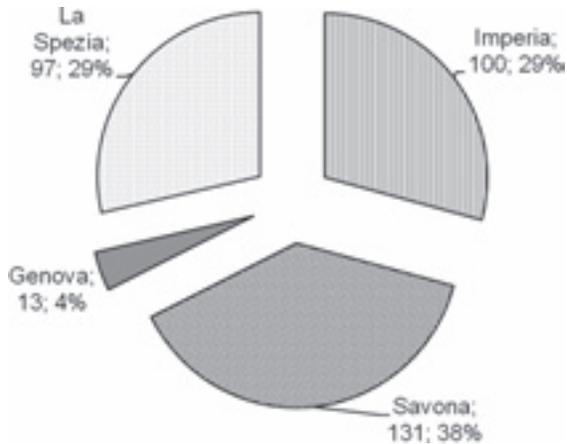


Figura 2 – Distribuzione geografica delle aree carsiche liguri espressa in km² e valore percentuale.

Figure 2 - Geographic distribution of ligurian karstic areas.

L'individuazione cartografica, approvata con D.G.R. n. 665 del 23.09.1994 (Figura 1), è stata redatta su carta tecnica regionale alla scala 1:25.000, in cui sono state riportate 39 aree aventi importanza idrogeologica, ambientale e paesaggistica; complessivamente presentano una superficie di circa 350 km², pari a poco più del 6% del territorio regionale, con superficie simile nelle province di La Spezia, Savona, Imperia e inferiore in quella di Genova (Figura 2).

Le tavole sono segnate da una numerazione progressiva generale e per provincia; la cartografia è corredata da schede descrittive riportanti l'individuazione geografica (provincia, comune, comunità montana, bacino imbrifero, superficie), la descrizione dell'area (caratteristiche geologiche, geomorfologiche, speleologiche, copertura vegetale, ecc.), i principali motivi d'interesse (idrogeologico, paesaggistico, storico-culturale, biologico, ecc.), i principali acquiferi carsici (grado di vulnerabilità qualitativo, uso, ecc.), le cave e le discariche eventualmente presenti, una bibliografia di riferimento e le norme di tutela (parchi, aree protette, L. 1497/39 e 431/85, vincolo idrogeologico, ecc.).

Con l'individuazione e la perimetrazione delle aree carsiche è stato possibile conseguire alcuni importanti obiettivi: a) tutelare le zone aventi particolare rilevanza idrogeologica e geomorfologica, garantendo la stabilità degli ecosistemi attraverso norme specifiche, con particolare riguardo alle previsioni urbanistiche e alla localizzazione di cave e discariche; b) realizzare un catasto regionale delle grotte e delle aree carsiche attraverso l'attività dei gruppi speleologici (AA.VV., 2006); c) programmare interventi e attività di fruizione delle grotte e delle aree carsiche, di studio geologico, geografico, idrogeologico, chimico, fisico, biologico, paleontologico e storico dei sistemi ipogei e di esplorazione speleologica nonché l'organizzazione di corsi di speleologia omologati dalla Società Speleologica Italiana o dal Club Alpino Italiano.

Le aree carsiche sono state riportate, con relativa simbologia a tratteggio, sulle tavole dell'assetto insediativo del Piano Territoriale di Coordinamento Paesistico della Regione Liguria (adottato nel 1986 e approvato con D.C.R. n. 6 del 25 febbraio 1990).

Attraverso l'elaborazione dei dati contenuti nelle schede relative alle aree carsiche è possibile riassumere che (Figura 3): a) presentano una superficie media di 8-10 km², fatta eccezione per la Lama della Spezia, che mostra superficie superiore a 60 km²; b) il numero medio di grotte per area carsica è di circa 35, anche se sono presenti zone con oltre 100 cavità (Pietravecchia, Bardineto, Monte Carmo di Loano e Lama della Spezia); c) lo sviluppo medio complessivo delle cavità per ciascuna area è di circa 1,5 km, anche se le aree di Pietravecchia, Bardineto (Gruppo Speleologico Savonese, 2006) e Monte Carmo mostrano sviluppi ipogei complessivi superiori a 5 km; d) adottando il rapporto tra sviluppo medio delle cavità e numero delle stesse per area, si ottiene una lunghezza media per cavità che risulta pari a circa 60 m, con un massimo per il Bric Tampa che presenta uno sviluppo medio per cavità di quasi 0,5 km; e) le unità geologiche prevalenti sono la Falda Toscana (oltre 80 km²), l'unità Delfinese-Provenziale (quasi 60 km²) e l'Unità M. Carmo-Rialto (oltre 50 km²); f) alcune aree ricadono in formazioni geologiche all'interno delle quali le morfologie carsiche sono determinate da fenomeni pseudocarsici e paracarsici (Argille e Conglomerati Pliocenici delle aree Magliocca e Roverino, Formazione di Molare per la Valle dei Tre Re); g) in termini di bacini idrografici prevalgono le aree nella Val di Vara, nella Liguria orientale (quasi 100 km²), del T. Centa e del T. Bormida nel savonese (circa 50 km²).

Proposte per una revisione delle aree carsiche

Le aree carsiche individuate con la L.R. n. 14/1990 rappresentano un indispensabile punto di partenza che, a vent'anni dalla loro prima perimetrazione, ha contribuito a mantenere l'integrità di queste zone nel contesto del peculiare paesaggio ligure (Faccini et al., 2009).

Descrizione della metodologia

Sulla base delle conoscenze raggiunte attraverso l'incessante attività dei gruppi speleologici e dei risultati scientifici ottenuti nel campo, si rileva l'opportunità di evidenziare alcuni aspetti che meritano un nuovo approfondimento: 1) i limiti geografici delle aree carsiche attuali; 2) la natura e le caratteristiche idrogeologiche delle aree carsiche; 3) la presenza di grotte esterne alla perimetrazione esistente; 4) la nuova normativa regionale, specificamente rivolta alla vulnerabilità degli acquiferi carsici. In merito al primo punto si evidenzia che le zone attuali non appaiono sempre omogenee in termini di estensione: queste sembrano definite su un criterio genericamente geografico, non mostrando uniformità a scala regionale.

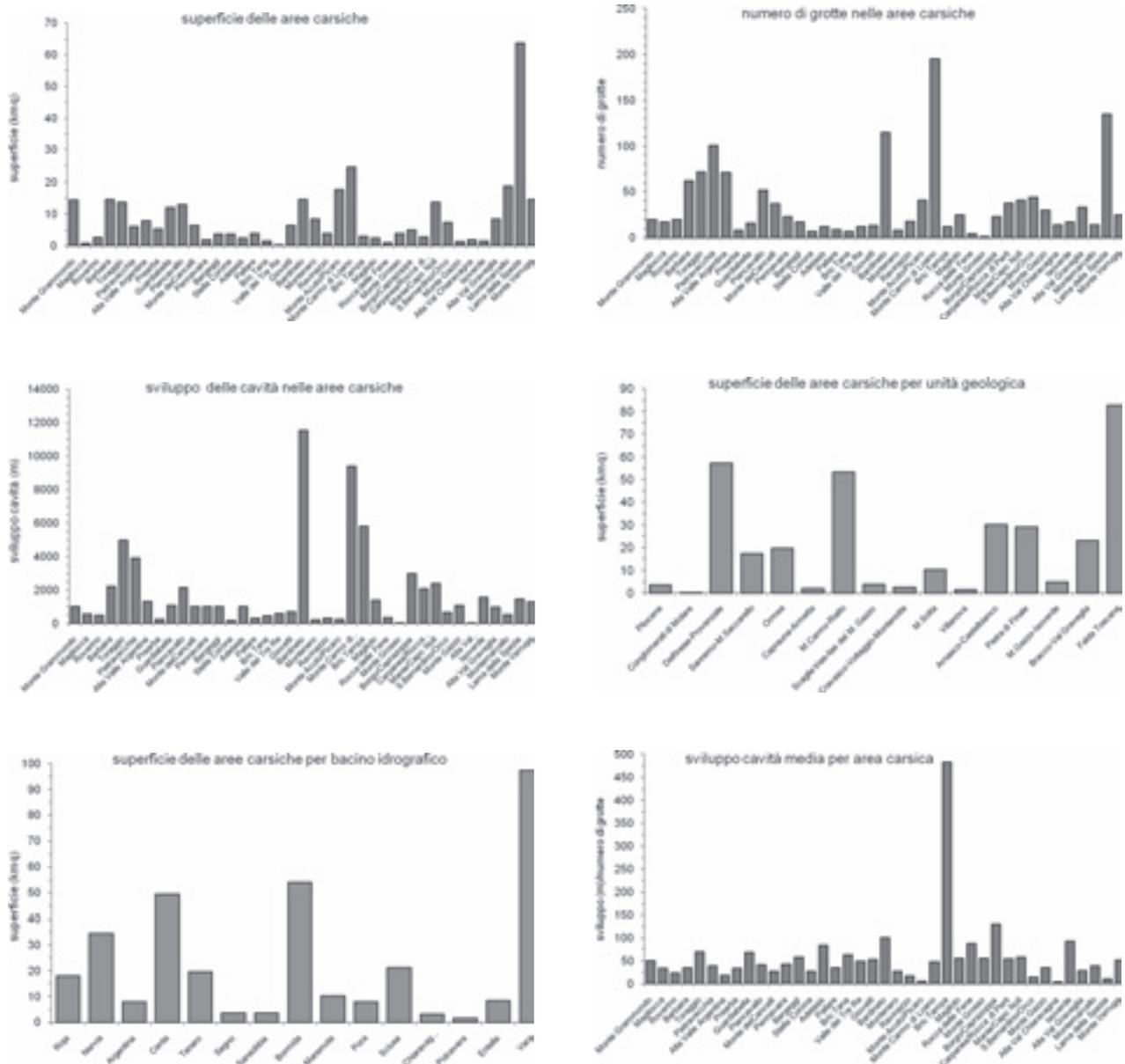


Figura 3 – Caratteristiche delle aree carsiche liguri.
 Figure 3 - Ligurian karstic areas features.

A titolo d'esempio si riporta l'articolazione delle aree GE33 (M. Gazzo) e GE34 (Alta Val Chiaravagna), contigue e nell'ambito della stessa Unità Tettonica M. Gazzo-Isoverde (Formazioni di Torbi, Lencisa e Gallaneto, Dolomie di M. Gazzo), per complessivi 3,5 km², a fronte dell'area SP38 (Lama della Spezia), che mostra estensione di oltre 60 km² nell'Unità Tettonica della Falda Toscana, comprendendo un'area orientata NO-SE tra M. Castellaro (vicino a Borghetto Vara) e l'arcipelago della Palmaria.

Il secondo aspetto riguarda i tipi litologici delle aree carsiche: la sovrapposizione tra le 39 zone perimetrare e le Unità Tettoniche della Liguria (con le relative

litologie) evidenzia che le aree IM2 (Magliocca) e IM3 (Roverino) insistono su successioni marine neogene (conglomerati di Monte Villa, argille di Ortovero), mentre l'area SV18 (Valle dei Tre Re) ricade in depositi tardo e post-orogeni del Bacino Terziario Piemontese (formazione di Molare). Le prime due aree sono caratterizzate da fenomeni paracarsici (Calandri, 1978; Marini, 2002) mentre, nel caso della SV18, si è in presenza di fenomeni carsici s.s. che si sviluppano in litotipi carbonatici sepolti sotto pochi metri di conglomerati, nei quali si sono sviluppate morfologie epigee (doline) connesse all'evoluzione delle strutture carsiche ipogee (Gruppo Speleologico Savonese, 1993;

2004).

Un terzo spunto di riflessione riguarda tutte le cavità censite nel catasto speleologico che non ricadono in nessuna area oggi definita: è il caso, ad esempio, delle grotte nei conglomerati del Promontorio di Portofino e dell'alta Valle Scrivia (Pastorino e Pedemonte, 1974; Brancucci et al., 1998), nei calcari a Calpionelle della Val Frascaiese, nei calcari marnosi dell'anfiteatro storico di Genova e della fascia costiera tra Genova e Chiavari. Queste ultime mostrano caratteristiche analoghe a quelle di Prearba (IM8) e Guardiabella (IM9) ubicate nell'Unità S.Remo-M.Saccarello (Gruppo Speleologico Imperiese CAI, 2005), evidenziando, quindi, un'apparente disomogeneità di approccio per areali con caratteri affini.

L'ultimo aspetto riguarda la disciplina prevista nelle aree carsiche in funzione della nuova normativa, che richiede una differenziazione tra aree di ricarica (soggette a infiltrazione diffusa o concentrata) e aree sorgive, legata alla necessità di tutela degli acquiferi.

Sulla base di questi punti è possibile proporre una metodologia di lavoro per l'aggiornamento e la ridefinizione delle aree carsiche liguri; le attività dovranno essere condotte attraverso una piattaforma GIS adottando la base cartografica regionale in scala 1:10.000; la cartografia di uscita potrà essere ridotta per ragioni pratiche in scala 1:25.000.

Il primo passo fondamentale è l'acquisizione dello strato informativo relativo al catasto delle cavità censite, mentre il secondo è l'introduzione dei livelli informativi relativi alle formazioni suscettibili di modellamento carsico (calcari, dolomie, gessi, ecc.) derivati dalla banca dati regionale relativa alla cartografia geologica. La sovrapposizione di queste due informazioni dovrebbe fornire una prima base per una nuova perimetrazione delle aree carsiche, la quale prevedibilmente sarà articolata su due distinti livelli: a) aree principali distinte per Unità Tettoniche e Idrogeologiche; b) sub-aree interne alle precedenti determinate su base geografico-fisica.

Dalla preliminare sovrapposizione tra le aree carsiche attualmente cartografate e le Unità tettoniche liguri (Giammarino et al., 2002) si ottengono le zone carsiche principali ("Unità Idrogeologiche") risultanti dagli accorpamenti delle aree corrispondenti alle Unità: 1) Delfinese-Provenzale, 2) San Remo-M. Saccarello, 3) Ormea, 4) Caprauna-Armetta, 5) M. Carmo-Rialto, 6) Scaglie di Trias-Lias associate al Gruppo di Voltri, 7) Cravasco-Voltaggio-Montenotte, 8) M. Sotta, 9) Arnasco-Castelbianco, 10) Villanova, 11) M. Gazzo-Isoverde, 12) Bracco-Val Graveglia, 13) Falda Toscana e 14) lembi connessi alla Pietra di Finale Ligure.

Tali aree potranno essere ulteriormente suddivise su base geografico-fisica e geomorfologica: queste "Zone carsiche", che in larga parte grossomodo ricalcheranno quelle attuali, saranno quindi oggetto di ulteriore articolazione specifica, differenziando le aree di ricarica

da quelle di risorgive, perenni o stagionali. Le prime saranno suddivise a seconda se soggette a infiltrazione diffusa (territorio caratterizzato dall'affioramento di rocce carsificabili coperte da suolo o depositi detritici) o a infiltrazione concentrata (territorio caratterizzato dall'affioramento di rocce carsificabili denudate o con macroforme superficiali che possono condizionarne il deflusso come doline, inghiottitoi, polje, valli cieche e asciutte).

Questi differenti ambiti sono collegati a regimi normativi modulati in funzione della diversa vulnerabilità, al fine di assicurare idonee forme di tutela delle aree carsiche e dei relativi acquiferi, garantendo in particolare le aree di ricarica della falda e le sue emergenze naturali (art. 12 L.R. 39/2009).

Le aree caratterizzate da cavità con uno sviluppo superiore 5 m o di particolare interesse storico-culturale modellate in tipi litologici non suscettibili di carsismo s.s. saranno delimitate a parte come zone para- o pseudo-carsiche. E' il caso delle numerose grotte nei conglomerati, nelle ofioliti, nelle marne, ecc., spesso indizi morfologici riconducibili a grandi movimenti di massa e deformazioni gravitative profonde di versante (Brancucci et al., 1982).

Applicazione alle aree carsiche del genovesato

Nel genovesato i fenomeni carsici non sono particolarmente diffusi, almeno in confronto alle forme presenti nelle altre aree regionali e sono localizzati quasi esclusivamente nella successione triassico-liassica di M. Gazzo-Isoverde (Figura 4), rappresentata da argilloscisti, calcari, calcari marnosi, calcari selciferi, dolomie e calcari dolomitici, scisti porfiritici (Cortesogno e Haccard, 1984). All'interno di questa Unità sono presenti fenomeni carsici significativi, discretamente conosciuti (Sanfilippo, 1950; Arena e Marzio, 1974; Maifredi, 1986), che sono stati utilizzati per la definizione delle tre aree carsiche del genovesato, M. Gazzo (GE33), Alta Val Chiaravagna (GE34) e Isoverde (GE35).

La perimetrazione attuale presenta le aree GE33-34 adiacenti e sviluppate lungo lo spartiacque tra le valli Chiaravagna a E e Varena a O, per un tratto complessivo di quasi 5 km di estensione longitudinale; l'area GE35 dista circa 6 km dalle precedenti e comprende una porzione di territorio tra le località Isoverde e Cravasco, in alta Val Polcevera.

Le grotte conosciute all'interno del M. Gazzo, spesso intercettate durante i lavori di coltivazione delle cave, presentano un andamento variabile; si alternano pozzi e gallerie, impostate preferenzialmente lungo la direzione N-S, in subordine E-O, in funzione delle lineazioni presenti nell'Unità tettonica (Capponi e Crispini, 2008). In questo massiccio carsico non sono conosciuti reticoli ipogei importanti e le acque drenate dal sistema fuoriescono probabilmente lungo il Rio Bianchetta.

In alta Val Chiaravagna il sistema carsico si sviluppa lungo uno stretto affioramento dolomitico confinato dalle

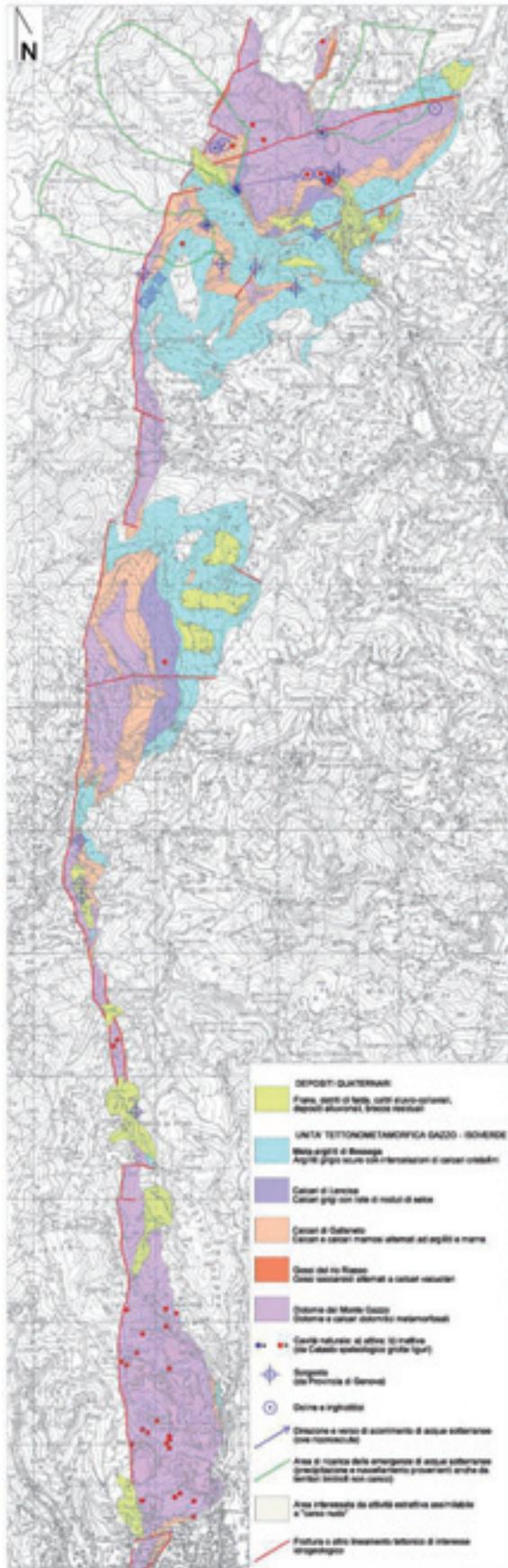


Figura 4 – Schema dell’Unità Geologica di Gazzo-Isoverde (modificato da CARG 1:50.000 - Foglio 213 Genova). Depositi quaternari: 1) frane, detriti di falda, coltri eluvio-colluviali, depositi alluvionali, breccie residuali. Unità tettonometamorfica Gazzo-Isoverde: 2) meta-argilliti di Bessega; 3) calcari di Lencisa; 4) calcari di Gallaneto; 5) gessi del Rio Riasso; 6) dolomie del M. Gazzo. Elementi di idrogeologia carsica: 7) cavità naturale, a. attiva; b. inattiva (da Catasto speleologico grotte liguri); 8) sorgente (da Provincia di Genova); 9) dolina o inghiottitoio; 10) direzione e verso delle acque sotterranee (ove riconosciuta); 11) area di ricarica delle emergenze di acque sotterranee; 12) area interessata da attività estrattiva assimilabile a “carso nudo”; 13) frattura o altro elemento tettonico di interesse idrogeologico.

Figure 4 - Gazzo-Isoverde Geologic Unit. 1) quaternary deposits; 2) shales of Bessega; 3) limestones of Lencisa; 4) limestones of Gallaneto; 5) gypsum of Riasso stream; 6) dolomite of Mt. Gazzo; 7) cave: a. active; b. inactive; 8) spring; 9) doline; 10) underground water flow; 11) springs recharge area; 12) quarry activity area; 13) fracture or tectonic lineation.

meta-olfoliti; le cavità sono verticali, impostate sempre su lineazioni tettoniche (Maifredi e Ribaldone, 1959).

Il sistema carsico più importante del genovesato è quello dell'area di Isoverde che fa capo al M. Carmelo, i cui limiti del bacino idrogeologico non sono ancora ben definiti; l'area presenta il tipico clima mediterraneo, con una precipitazione media annua superiore a 1800 mm e una temperatura media dell'aria pari a 12,6 °C (Figura 5).

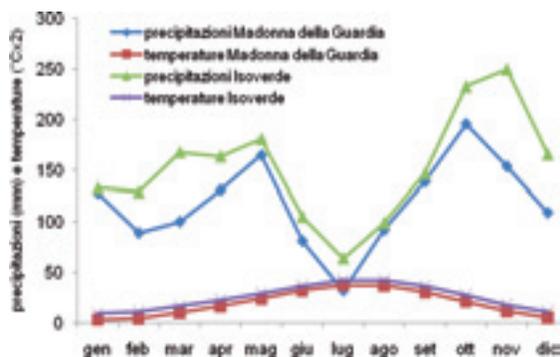


Figura 5 – Diagramma ombrotermico riferito alle stazioni termopluviometriche di Isoverde e Madonna della Guardia.

Figure 5 - Ombrothermic diagram of Madonna della Guardia e Isoverde weather stations.

Attualmente sono censite 12 grotte per uno sviluppo complessivo di circa 1 km, cui si devono aggiungere almeno altre 5 cavità obliterate dalle attività di cava. La più estesa grotta della provincia di Genova è la Grotta di Isoverde (LI 12), con uno sviluppo di circa 700 m, al cui interno scorrono due corsi d'acqua indipendenti con origine e portate differenti. Un ulteriore corso d'acqua caratterizza la Voragine del Buran, sviluppata al contatto tra i calcari di Gallaneto e le meta argilliti di Bessega. Anche l'Abisso Lidenbrook, sviluppato alle pendici del M. Carlo, è attraversato da un corso d'acqua che probabilmente confluisce nella Grotta di Isoverde. Il sistema carsico di Isoverde presenta un'importante risorgente ("I Buggi"), posta lungo il Rio di Iso a circa 220 m s.l.m. (Maifredi e Pastorino, 1974); anche in questo sistema è evidente l'impostazione delle cavità sulle lineazioni tettoniche, con una dominante direzione NE-SO, in subordine NO-SE.

Ci sono poi altre interessanti cavità e forme carsiche nella zona di Lencisa e Gallaneto, esterne alle attuali aree perimetrali; anche in questo settore si osserva un clima Mediterraneo, con una precipitazione media annua intorno a 1400 mm e una temperatura media dell'aria pari a circa 10 °C.

La Grotta del Verde rappresenta un esempio di traforo idrogeologico che drena le acque del Rio di Tinelle verso la valle del Rio Roncasci. La Tanna do Vento è rappresentata da una frattura lungo il versante del M. Torbi, estesa per oltre 50 m. Si segnala, infine, una risorgente (Rio Barbaggio) nella zona Torbi-Lencisa.

Un altro fenomeno interessante si sviluppa nei gessi del Rio Riasso, presso Isoverde. In passato sfruttati nell'attività estrattiva e coltivati in sotterraneo, i gessi sono interessati da fenomeni carsici che ne provocano una rapida dissoluzione, determinando localizzati problemi di stabilità per alcuni edifici e infrastrutture.

Il confronto tra perimetrazione esistente e geometria di superficie dell'Unità Gazzo-Isoverde mostra significative differenze, per la presenza di lembi calcareo-dolomiti tra Isoverde e M. Gazzo e per gli affioramenti nell'alta Val Chiaravagna, particolarmente stretti (Figura 6). La suddivisione proposta prevede un unico lungo affioramento orientato N-S di rocce carsificabili per oltre 12 km di estensione, tra Sestri Ponente a S e Cravasco a N, appartenente alla Zona Sestri-Voltaggio e ascrivibile all'Unità Trias-Lias "M. Gazzo-Isoverde", che rappresenta pertanto l'Unità Idrogeologica di riferimento.

La geometria superficiale dell'affioramento di calcari, calcari dolomiti, dolomie e gessi, mostra tre aree significative per estensione (Figure 4, 6): M.Gazzo-alta Val Chiaravagna, Torbi-Lencisa e Isoverde, che possono pertanto rappresentare tre zone carsiche distinte. La presenza di cavità naturali nella meta-argilliti di Bessega suggerisce la classificazione della formazione nelle zone para/pseudo carsiche.

La perimetrazione proposta e l'articolazione tra aree di ricarica (infiltrazione diffusa e concentrata) e aree sorgive è stata definita sulla base delle conoscenze di geomorfologia e idrogeologia carsica nell'area esaminata (Figura 7). In questo caso attraverso un'attenta foto-interpretazione e utilizzando informazioni provenienti dal Catasto Speleologico Ligure sono state dapprima individuate le sorgenti nelle zone carsiche e le rispettive aree al contorno. Successivamente sono stati individuate le macroforme superficiali che possono condizionare il deflusso come doline e inghiottitoi, perimetrati quindi come aree a infiltrazione concentrata.

Le restanti zone, comprendenti in generale depositi detritici di qualunque o con roccia o sub-affiorante su vaste aree, sono state classificate a infiltrazione diffusa.

Conclusioni

La perimetrazione delle aree carsiche liguri, a oltre quindici anni dalla loro approvazione, rappresenta non solo uno strumento fondamentale per la tutela di questo delicato ecosistema, ma anche un importante elemento conoscitivo strategico per la salvaguardia del peculiare paesaggio ligure, in ambito costiero, di entroterra e montano.

La nuova legge regionale, discendendo dal presupposto sia del progresso di conoscenze geologiche e speleologiche degli ultimi venti anni, sia del rinnovamento del quadro normativo in materia ambientale, riguarda la ridefinizione dei perimetri delle aree carsiche con l'obiettivo principale della tutela della risorsa idrica.



Figura 6 – Perimetrazione delle aree carsiche GE33, 34, 35 (linea nera) e proposta della nuova Unità Idrogeologico-tettonica del genovesato (linea rossa) e delle aree para/pseudo carsiche connesse (linea blu).

Figure 6 - GE33, 34, 35 karstic areas perimeter (black line) and proposal of the new Hydrogeological Unit of the Genoan areas (red line) and connected para/pseudokarstic areas (blue line).

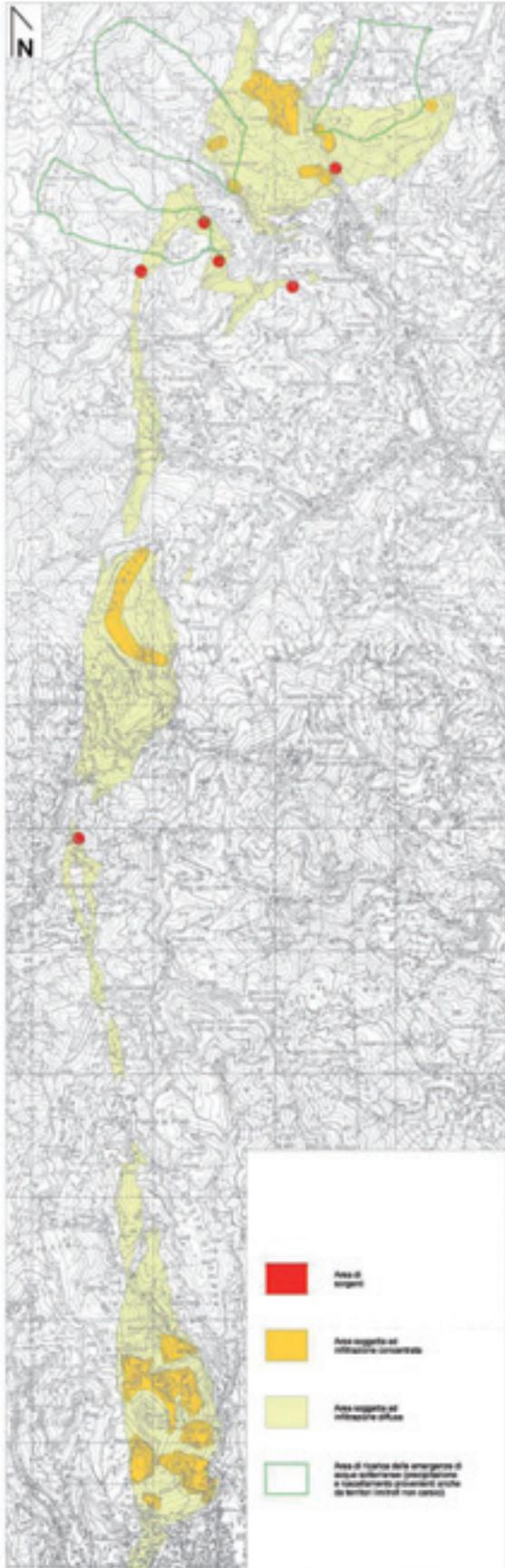


Figura 7 – Articolazione della nuova Unità Idrogeologico-tettonica del genovesato in area di risorgenti (1), aree soggette a infiltrazione concentrata (2) e aree soggette a infiltrazione diffusa (3).

Figure 7 - New Genoan karstic area division into karstic spring area (1) and infiltration areas (2= concentrated; 3= scattered).

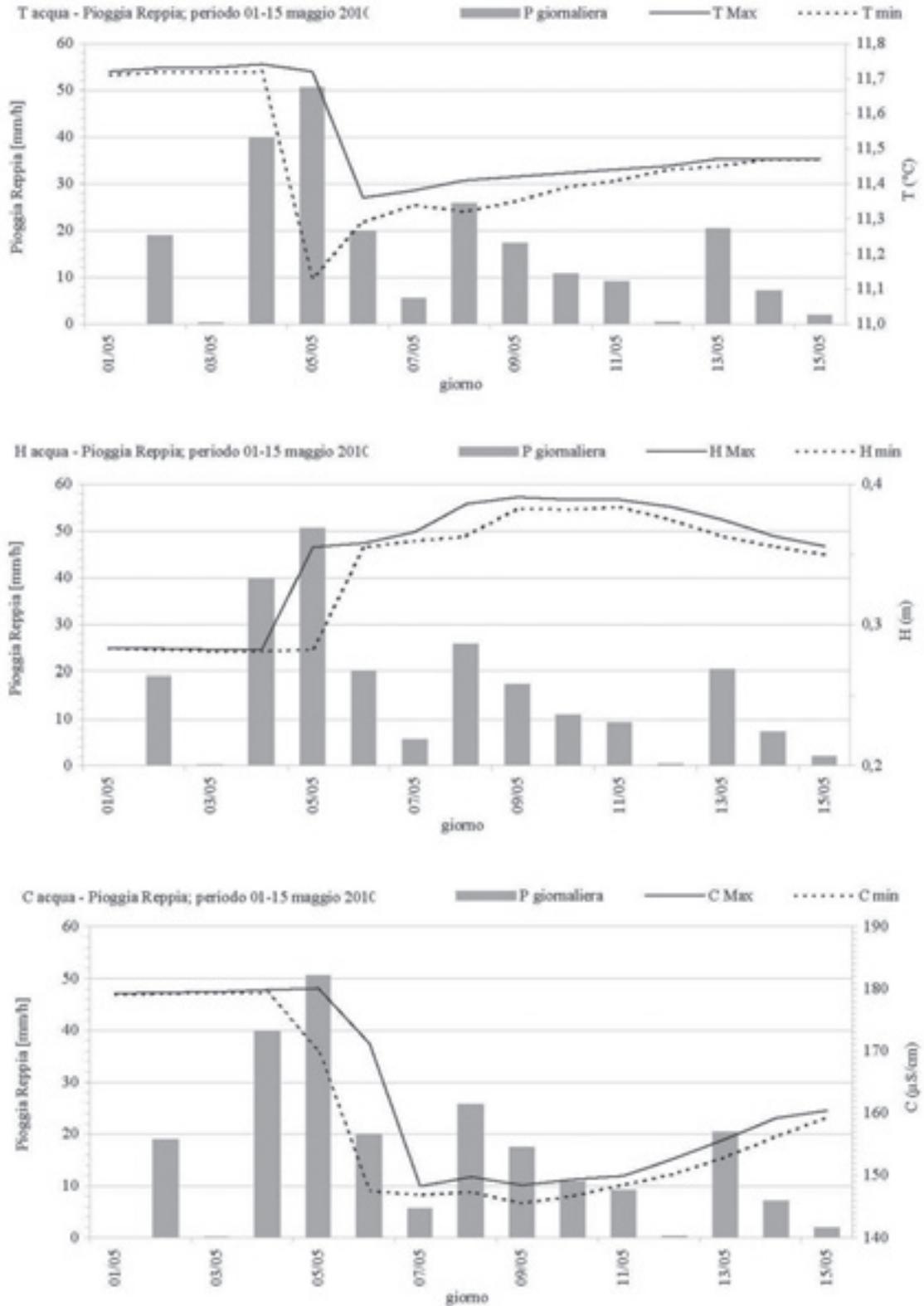


Figura 8 – Monitoraggio idrogeologico della grotta LI254 Cà Freghè: confronto tra precipitazioni esterne e portata, temperatura, conducibilità elettrica all'interno della cavità.

Figure 8 - Hydrogeological monitoring of the Cà Freghè Cave (LI254): comparative graphics between rainfall, water flow, temperature, conductivity.

Le nuove aree carsiche, oltre ad essere un importante strumento di salvaguardia del territorio che troverà la sua naturale collocazione nell'ambito del Piano di Tutela delle Acque, rappresenteranno, altresì, un elemento di stimolo per la prosecuzione delle attività dei gruppi speleologici e degli enti pubblici, inclusi gli istituti scientifici di ricerca, con evidenti ricadute di valenza applicativa.

A valle della ridefinizione delle aree carsiche e della messa a sistema delle informazioni esistenti relativamente agli aspetti idrogeologici, potranno, infatti, essere promossi ulteriori indagini ed approfondimenti. Fra le tipologie di ricerche ritenute prioritarie per gli importanti sviluppi del quadro conoscitivo attuale con le nuove aree carsiche si possono annoverare: a) la realizzazione di un atlante geologico, geomorfologico e idrogeologico delle aree carsiche liguri, articolato in schede monografiche per ciascuna "Zona carsica" individuata e corredato di

cartografia tematica in scala 1:10.000, adottando le relative legende del Servizio Geologico Nazionale (1992, 1995, 1997); b) il monitoraggio di importanti sistemi acquiferi carsici mediante installazione di apposite strumentazioni automatiche (Figura 8), finalizzate all'acquisizione in continuo di fondamentali parametri chimico-fisici, sull'esempio di quanto avviato con il progetto-pilota nella grotta di Isoverde (LI 12, GE35-Isoverde) intrapreso agli inizi degli anni '90 e i più recenti progetti nell'alta Val Graveglia (Faccini e Perasso, 2009) e in particolare presso la Grotta di Cà Fregghè (LI 254, GE36-Alta Val Graveglia); c) la definizione quali-quantitativa del grado di vulnerabilità degli acquiferi sulla base dei citati parametri (Cucchi et al., 2000; 2008; Zini et al., 2006), e quindi l'ulteriore suddivisione in unità carsiche idro-strutturali, così da caratterizzarne con maggiore dettaglio le aree in funzione della circolazione sotterranea.

Riferimenti bibliografici

- AA.VV. (2006) – *Bibliografia speleologica ligure* (A cura di C. Cavallo, R. Chiesa, R. Dall'Acqua, M. Jesu, E. Massa). Pubblicazione promossa da Regione Liguria, Delegazione Speleologica Ligure. Tipografia C.T.O., Vicenza, 224 pp.
- Arena P., Marzio C. (1974) – *Il M. Gazzo: una montagna ligure da salvare*. Rassegna Speleologica Italiana, Atti XI Congresso Nazionale di Speleologia, Genova 1972, 2, 151-154.
- Brancucci G., Burlando M., Pastorino M.V., Pedemonte S. (1998) – *Falsi inghiottitoi in Alta Valle Scrivia*. Atti del 18° Congresso Internazionale di Speleologia "Chiusa 98".
- Brancucci G., Canepa G., Maifredi P., Nosengo S. (1982) – *Le paleofrane della Val Bisagno*. Geol. Applicata e Idrogeologia, XVII, Bari, 35-51.
- Brandolini P., Faccini F., Renzi L., Robbiano A., Terranova R., Vercellotti D. – (2008) *Geodiversità della Val Graveglia (Appennino ligure). Proposte per la valorizzazione turistica e la realizzazione di un Geoparco*. Bollettino della Società Geografica Italiana, Serie XIII, vol. I (2008), 913-927.
- Calandri G. (1978) – *Caratteri del fenomeno carsico nella Provincia di Imperia*. Atti del XIII Congr. Nazionale Speleologia, Perugia 1978, Regione Umbria, GS CAI Perugia
- Capponi G., Crispini L. (2008) – *Note Illustrative del Foglio 213 - 230 "Genova" della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000*. FIRENZE, Apat - Regione Liguria – Selca.
- Cucchi F., Martinetti E., Massari G., Zini L. (2000) – *Carta della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero carsico triestino e isontino*. Le Grotte d'Italia, s. V, 1(2000), 21-31.
- Cucchi F., Franceschini G., Zini L., Aurighi M. (2008) – *Intrinsic vulnerability assessment of Sette Comuni Plateau aquifer (Veneto Region, Italy)*. Journal of Environmental Management, 88, 984-994.
- Cortesogno L. e Haccard D. (1984) – *Note illustrative alla carta geologica della zona Sestri-Voltaggio*. Mem. Soc. Geol. It., 28, 115-150.
- Faccini F., Benedettini A., Sivori L. (2007) – *Pericolosità geomorfologica, ambiente carsico e fruizione turistica: il caso della Tana di Cà Fregghè (alta Val Graveglia, Appennino ligure)*. In: "Clima e rischio geomorfologico in aree turistiche" (a cura di M. Piccazzo, P. Brandolini, M. Pelfini), Patron Ed., Bologna, 207-222.
- Faccini F., Brandolini P., Robbiano A., Terranova R. (2005) – *Valorizzazione turistica e salvaguardia ambientale dei siti d'interesse carsico nella val Graveglia (Appennino ligure)*. In: Terranova R., Brandolini, P., Firpo, M. (eds.) - *La valorizzazione turistica dello spazio fisico come via alla salvaguardia ambientale*, Patron Ed., Bologna, 160-188.
- Faccini F., Perasso L. (2009) – *Caratterizzazione geologico-ambientale e monitoraggio idrogeologico di alcune sorgenti carsiche dell'Alta Val Graveglia (Appennino ligure)*. Engineering, Hydro, Environmental Geology, 11, 45-61.
- Faccini F., Robbiano A., Roccati A. (2009) – *L'assetto geomorfologico del PTCP della Regione Liguria: proposta di nuovi indirizzi metodologici e operativi*. PG Professione Geologo, 1, 7-24
- Giammarino S., Giglia G., Capponi G., Crispini L., Piazza M. (2002) – *Carta geologica della Liguria*. Litografia Artistica Cartografica, Firenze.
- Gruppo Speleologico Imperiese CAI (2005) – *Il monte Guardiabella (Prealpi Liguri - IM)*, (a cura di G. Calandri), pp.50
- Gruppo Speleologico Savonese (1993) – *Grotte e Carsismo dell'alta Val Bormida - La Bormida di Bardineto*, (a cura di R. Massucco), pp. 180.
- Gruppo Speleologico Savonese (2004) – *Grotte e Carsismo dell'alta Val Bormida - La Bormida di Millesimo* (a cura di R. Massucco), pp. 208
- Gruppo Speleologico Savonese (2006) - *Dall'acqua alle grotte: alla scoperta del carsismo e delle grotte di Bardineto*, (a cura di R. Massucco), pp. 64
- IUCN World Commission for Protected Areas (1997) - *Guidelines for cave and karst protection*.
- Maifredi P. (1986) – *Le Grotte di Isoverde*. Studi e Ricerche, cultura del territorio, Museo di Paleontologia e Mineralogia del Comune di Campomorone, 3, 83-97.
- Maifredi P., Pastorino M.V. (1974) – *Indagine sulla possibilità di utilizzazione delle sorgenti carsiche della provincia di Genova*. Rassegna Speleologica Italiana, Atti XI Congresso Nazionale di Speleologia, Genova 1972, 1, 111-128.
- Maifredi P., Ribaldone G.B. (1959) – *Esplorazione di una nuova cavità a pozzo nei dintorni di Genova: il Buranco de Strie*. Rassegna Speleologica Italiana, SSI, Como, 4, 226-229.
- Marini M., (2002) – *Carta geologica del Pliocene ligure nell'areale di Ventimiglia-Bordighera (Alpi Marittime Liguri - Provincia di Imperia)*. SELCA, Firenze.
- Pastorino M.V., Pedemonte S. (1974) - *Nota preliminare sui fenomeni speleogenetici nei conglomerati di Valle Scrivia e Val Vobbia in Provincia di Genova*. Rassegna Speleologica Italiana, Atti XI Congresso Nazionale di Speleologia, Genova, 1972, SSI, Como, Anno XI, fasc. 2, 77-79.
- Sanfilippo N. (1950) – *Le Grotte della Provincia di Genova e la loro fauna*. Mem. Comit. Sc. Centr. CAI, Genova, 2, 1-92.
- Servizio Geologico Nazionale (1992) – *Carta geologica d'Italia (1:50.000)*. Guida al rilevamento, Quaderni SGN, s. III, n. 1, 95 pp.
- Servizio Geologico Nazionale (1995) – *Carta geomorfologica d'Italia - 1:50.000*. Guida al rilevamento a cura del Gruppo di Lavoro per la

cartografia geomorfologica. Quaderni del Servizio Geologico Nazionale, serie III, 4, 47 pp.

Servizio Geologico Nazionale (1995) – *Carta idrogeologica d'Italia* (1:50.000). Guida al rilevamento ed alla rappresentazione. Progetto

CARG, Quaderni SGN, s. III, 28 pp.

Vigna B. in collaborazione con Calandri G. (2001) – *Gli acquiferi carsici*. Quaderni didattici SSI, n. 12, ERGA editore, Genova.

Zini L., Forti P., Cucchi F. (2006) - La carta

della vulnerabilità intrinseca e integrata alla contaminazione per l'area carsica del Monte Covria (Friuli, Italia). *Ingegneria e Geologia degli Acquiferi*, n° 21, 19-26.

Utilizzo del sistema Google Earth™ per la definizione di un modello di suscettibilità da frana: un test in Sicilia centrale

Dario Costanzo*, Christian Conoscenti, Edoardo Rotigliano

Università degli Studi di Palermo, Dipartimento Di Geologia E Geodesia. conoscenti@unipa.it, dario.costanzo@unipa.it, rotigliano@unipa.it

*Corresponding author:

Exploiting Google Earth™ to assess a landslide susceptibility model: a test in central Sicily

ABSTRACT: A landslide susceptibility multivariate model, based on the conditional analysis approach, has been derived in the Tumarrano river basin (about 78 km²), by intersecting a GIS grid layer, expressing some selected geo-environmental conditions (outcropping lithology, steepness, plan curvature and topographic wetness index), and a landslide vector archive, produced by a Google Earth™ aided remote survey. The analysis of the Google Earth™ images dated at 2006, allowed to recognize 733 landslides (30 rotational slides and 703 flows), almost exclusively affecting clay and sandy clay rocks. Validation procedures produced largely satisfactory results, which were analyzed in the domain of the success and prediction rate curves. The research confirms the goodness of the susceptibility assessment method, as well as the powerful of Google Earth™ as a tool to manage the need of new, detailed and multi-temporal landslide archives.

Key Terms: Google Earth, Landslide susceptibility, Sicily
Termini chiave: Google Earth, Frane suscettibilità, Sicilia

Riassunto

Nell'ambito di un progetto, finalizzato alla messa a punto di una metodologia per la valutazione a scala regionale della pericolosità da frana, è stata condotta una ricerca, con lo scopo di valutare la consistenza dell'approccio basato sulla analisi condizionale e la possibilità di utilizzare il sistema Google Earth™ per la costruzione di archivi frane. L'area di applicazione, coincidente con il bacino idrografico del Torrente Tumarrano (78 km²), affluente del Fiume Platani (Sicilia Centro-Meridionale), presenta un assetto geologico caratterizzato in prevalenza dall'affioramento di terreni argillosi della Formazione Flysch Numidico, della Formazione Terravecchia e di argille che, in seguito anche agli esiti di uno studio paleontologico-stratigrafico delle microfaune presenti, sono state datate come argille del Serravalliano-Tortoniano.

Su una porzione rappresentativa (20 km²) del bacino è stato dapprima condotto un rilevamento delle frane utilizzando foto-immagini del 2007, il cui scenario (344 frane) è stato confrontato con quello prodotto sulla base di rilevamenti condotti sul terreno, nello stesso anno, alla scala 1:10.000. I due archivi mostrano una pressoché completa sovrapposibilità, ed hanno confortato il successivo utilizzo estensivo del sistema Google Earth™ per la costruzione di un archivio frane per tutta l'area.

Sulla scorta di questa verifica, si è infatti eseguito un

rilevamento remoto delle frane alla data del 2006, che è stato esteso a tutto il bacino del Torrente Tumarrano e che ha messo in luce la presenza di 703 frane di colamento e 30 di scorrimento rotazionale.

La funzione utilizzata quale funzione previsionale, per la costruzione del modello di suscettibilità, è la densità di frana, corrispondente alla probabilità spaziale di un evento franoso, sotto la condizione determinata da alcuni fattori di controllo.

I quattro parametri di controllo selezionati (litologia affiorante, pendenza, curvatura piana ed indice topografico di umidità) sono stati ricavati da carte geologiche disponibili e da un DEM a cella 40 m appositamente realizzato; i parametri sono stati combinati producendo un *layer informativo* di tipo GRID, le cui celle sono state raggruppate in unità di condizioni uniche (*UCU: Unique Conditions Units*), in funzione delle combinazioni specifiche ottenute.

Dall'intersezione tra il GRID delle *UCU* e dell'archivio frane del 2006 è stato ricavato il valore di densità di frana, per ciascuna delle combinazioni di fattori ottenuta.

La carta di suscettibilità da frana prodotta è stata poi sottoposta a validazione utilizzando una partizione spaziale *random*, per suddividere il *layer* delle *UCU* in un *sub-layer training* ed un *sub-layer test*. Sono state dunque

ricostruite le curve di validazione (*success e prediction rate curves*), le cui caratteristiche morfometriche hanno confermato la buona capacità previsionale del modello ottenuto e l'adeguatezza del metodo utilizzato, della scelta dei fattori e del metodo di riconoscimento delle frane.

È stata inoltre eseguita una validazione temporale del modello, sfruttando la disponibilità, all'interno della porzione rappresentativa, dell'archivio frane datato al 2007; questa ha fornito risultati altrettanto soddisfacenti, indicando anche una buona capacità previsionale rispetto ad una reale evoluzione temporale.

Introduzione

La pericolosità da frana di un'area rappresenta la probabilità che un evento franoso, di una data intensità, si verifichi al suo interno, in un determinato lasso di tempo (Varnes and IAEG, 1984). Dal momento che il fattore probabilistico temporale risulta spesso di difficile determinazione, nella pratica si ricorre spesso al concetto di *suscettibilità* da frana, il quale descrive (Brabb, 1984; Guzzetti *et alii*, 1999) in termini qualitativi o quantitativi la distribuzione spaziale delle frane che insistono e/o possono verificarsi in un'area (Fell *et alii*, 2008).

Una carta della suscettibilità da frana, quindi, descrive la distribuzione della probabilità spaziale (geografica), associata al verificarsi di una frana. Nel concetto di suscettibilità, ogni riferimento alla magnitudo dell'evento atteso è eventualmente affidato, in forma certamente qualitativa, alla caratterizzazione relativa alla tipologia di movimento, per la quale il modello è messo a punto, ed alle dimensioni medie dei volumi coinvolti negli eventi osservati.

Buona parte delle metodologie oggi utilizzate per la determinazione della suscettibilità da frana si basa sull'individuazione e sulla caratterizzazione spaziale di un set di fattori di controllo, e sulla quantificazione delle relazioni spaziali intercorrenti tra questi ed un archivio di frane pregresse, sfruttando l'assunto che le frane future si realizzeranno sotto le stesse condizioni di quelle del passato (Guzzetti *et alii*, 1999). Questo approccio trova una sua naturale applicazione nei metodi indiretti basati sull'utilizzo dei sistemi GIS (Fabbri & Chung, 2003), sia per la definizione di modelli parametrici di tipo euristico, sia per la messa a punto di veri e propri modelli stocastici (Carrara *et alii*, 1995; Chung & Fabbri, 1995; Conoscenti *et alii*, 2008a; Van Den Eeckhaut *et alii*, 2009).

Se, da una lato, sono oggi disponibili presso enti di ricerca e di gestione del territorio, corpose e sempre più dettagliate anche dati relativamente a fattori geologici, climatici, pedologici e topografici (DEM), per di più, spesso, in formato già digitale e georiferito, un forte problema nasce per le banche dati relative alle forme di dissesto.

Varie esperienze sono state condotte in quest'ambito (progetti AVI, SCAI, IFFI e PAI), le quali tuttavia

forniscono tipicamente un grado di affidabilità, precisione e, soprattutto, omogeneità temporale dell'archivio che, di fatto, suggerisce come necessaria, per scopi previsionali, l'esecuzione di nuovi rilevamenti (remoti e sul terreno) *ad hoc* per le aree di interesse.

In questo senso, diventa necessario contemperare la necessità di costruire archivi delle frane sufficientemente attendibili e cronologicamente omogenei con gli elevati costi di tempo e denaro derivanti dalla realizzazione di rilevamenti sistematici sul terreno.

Il presente lavoro mostra gli esiti di una ricerca condotta nel territorio siciliano, finalizzata a verificare la possibilità di definire le condizioni di suscettibilità da frana all'interno di un bacino idrografico campione, sfruttando il sistema (*software* e banca dati di foto-immagini satellitari) Google Earth™; questo sembra infatti fornire un supporto di sicuro interesse in ambito previsionale, grazie alla estrema rapidità di accesso alle informazioni, alla versatilità di gestione ed analisi delle immagini 3D, alla immediata connessione con i sistemi GIS ed alla possibilità di selezionare per una stessa area più epoche di rilievo.

In particolare, di seguito, verrà illustrata una procedura per la definizione di un modello di suscettibilità da frana basato su unità di condizioni uniche (UCU), ricavate combinando quattro fattori di controllo (litologia affiorante, pendenza, curvatura piana ed indice topografico di umidità) e che sfrutta un archivio delle frane ricostruito analizzando immagini del 2006.

Il modello è sottoposto a validazione: sfruttando una partizione spaziale random delle UCU, nei confronti dell'archivio delle frane rilevate al 2006 (Conoscenti *et alii*, 2008b); utilizzando una partizione temporale pura delle frane, utilizzando un archivio delle frane rilevate al 2007, all'interno di un'area campione. In quest'ultima, nel 2007, è stato anche eseguito un rilevamento delle frane diretto sul terreno alla scala 1:10.000, la cui distribuzione è stata preliminarmente confrontata con quella ricavata da Google Earth™, per verificare l'attendibilità di quest'ultimo e, dunque, dell'archivio totale del 2006.

Materiali e metodi

Inquadramento dell'area

L'area di applicazione è costituita dal bacino idrografico del Torrente Tumarrano, che si estende per circa 78 km² in Sicilia centro-meridionale (Figura 1a).

Il bacino del Torrente Tumarrano è caratterizzato dall'affioramento (Figura 1b) di terreni in prevalenza argillosi e sabbiosi del Flysch Numidico (Oligocene superiore - Miocene inferiore), presenti estesamente nel bacino, a luoghi anche in forma di banchi quarzarenitici di spessore metrico.

Seguono stratigraficamente terreni costituiti in prevalenza da brecce argillose di colore brunastro con

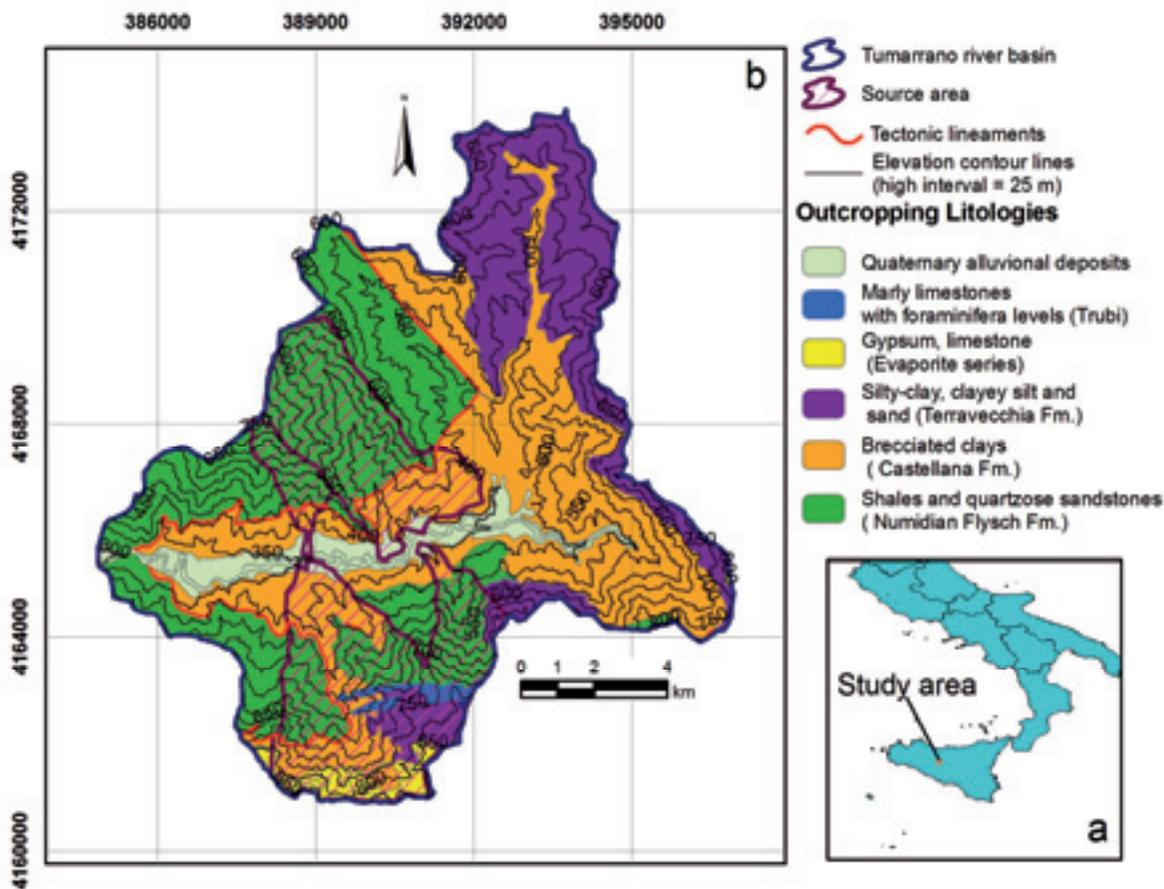


Figura 1. a) Bacino del fiume Platani e ubicazione della zona di studio; b) il quadro geologico del bacino Tumarrano
 Figure 1 a) Platani River Basin and location of the study area; b) geological framework of Tumarrano basin

inclusi litoidi di varia età, dimensione e natura, con aspetto caotico e caratterizzati da brusche variazioni di spessore (Argille del Serravalliano), e quindi depositi terrigeni appartenenti alla Formazione Terravecchia (Tortoniano), che affiorano prevalentemente nella porzione settentrionale, sotto forma di un complesso giallastro sabbioso-arenaceo, separato da livelli marnosi.

Al di sopra della Formazione Terravecchia, nell'estremo settore meridionale del bacino, si trovano i depositi Evaporitici del Messiniano. La sequenza evaporitica è chiusa, in discordanza, dai Trubi che sigillano le sequenze sottostanti. In successione, si trovano poi i depositi olocenici e i depositi alluvionali attuali e recenti, affioranti in prevalenza nelle aree adiacenti al letto del Torrente Tumarrano.

Archivio delle frane

Per avere un quadro dei dissesti aggiornato, con un dettaglio adeguato e per il quale fosse garantita l'omogeneità temporale, si è costruito un database dei dissesti dell'intero bacino, utilizzando un applicativo GIS ed una banca dati di immagini satellitari, che permette l'osservazione remota del territorio, con una buona riso-

luzione e con la possibilità di selezionare epoche di osservazione differenti: il sistema Google Earth™ (di seguito GE).

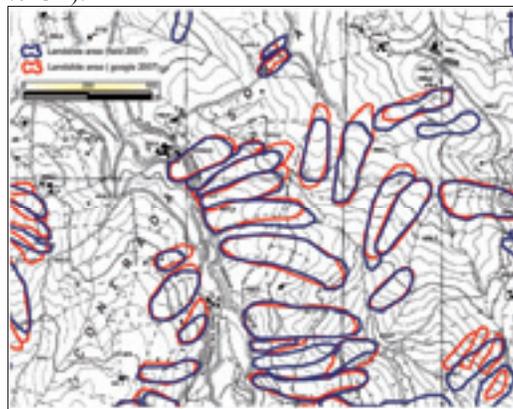


Figura 2. Confronto tra l'archivio frane (2007) ottenuto dal rilevamento di campagna e l'archivio frane realizzato con rilevamento remoto, in un'area campione.
 Figure 2. Comparison between the landslides archive (2007) obtained from field-survey and landslides archive made with remote analysis, in test area.

Utilizzando questo sistema di analisi del territorio, si è

dapprima realizzato un archivio delle frane, limitato solo ad un suo settore rappresentativo, datato al 2007 e che ha messo in evidenza la presenza di 344 frane (318 colamenti e 26 scorrimenti rotazionali; Cruden & Varnes, 1996).

Questo archivio è stato sottoposto a verifica, confrontandolo con quello ricavato da indagini condotte sul campo, nello stesso anno, alla scala 1:10.000.

Il confronto delle carte inventario (Figura 2) ha messo in evidenza la buona attendibilità del rilevamento remoto, confortando il passo successivo, nel quale si è invece eseguita la mappatura dei dissesti su tutto il bacino.

L'archivio frane esteso a tutta l'area del bacino è stato ricavato dall'analisi di foto-immagini dell'Agosto del 2006 ed ha messo in luce la presenza di un numero totale di frane pari a 733.

In Figura 3, vengono mostrati i dissesti riconosciuti per il bacino del Torrente Tumarrano dalla copertura fotografica del 2006. Il rilevamento condotto ha messo in luce come le 733 frane riconosciute all'interno del bacino, siano suddivise in 703 colamenti e 30 scorrimenti rotazionali; il materiale coinvolto rientra sempre nelle tipologie terra o, subordinatamente, detrito. Le caratteristiche medie delle frane mappate mettono in luce una estensione dell'area in frana pari a circa 4.7 km² e 0.96 km², con valori singoli massimi pari 143.468 m² e 90.508 m², per i colamenti e gli scorrimenti rotazionali rispettivamente. Alla luce del rilevamento, dunque, l'area è caratterizzata da una densità di frana pari, rispettivamente, a 8.97% e 1.02%.

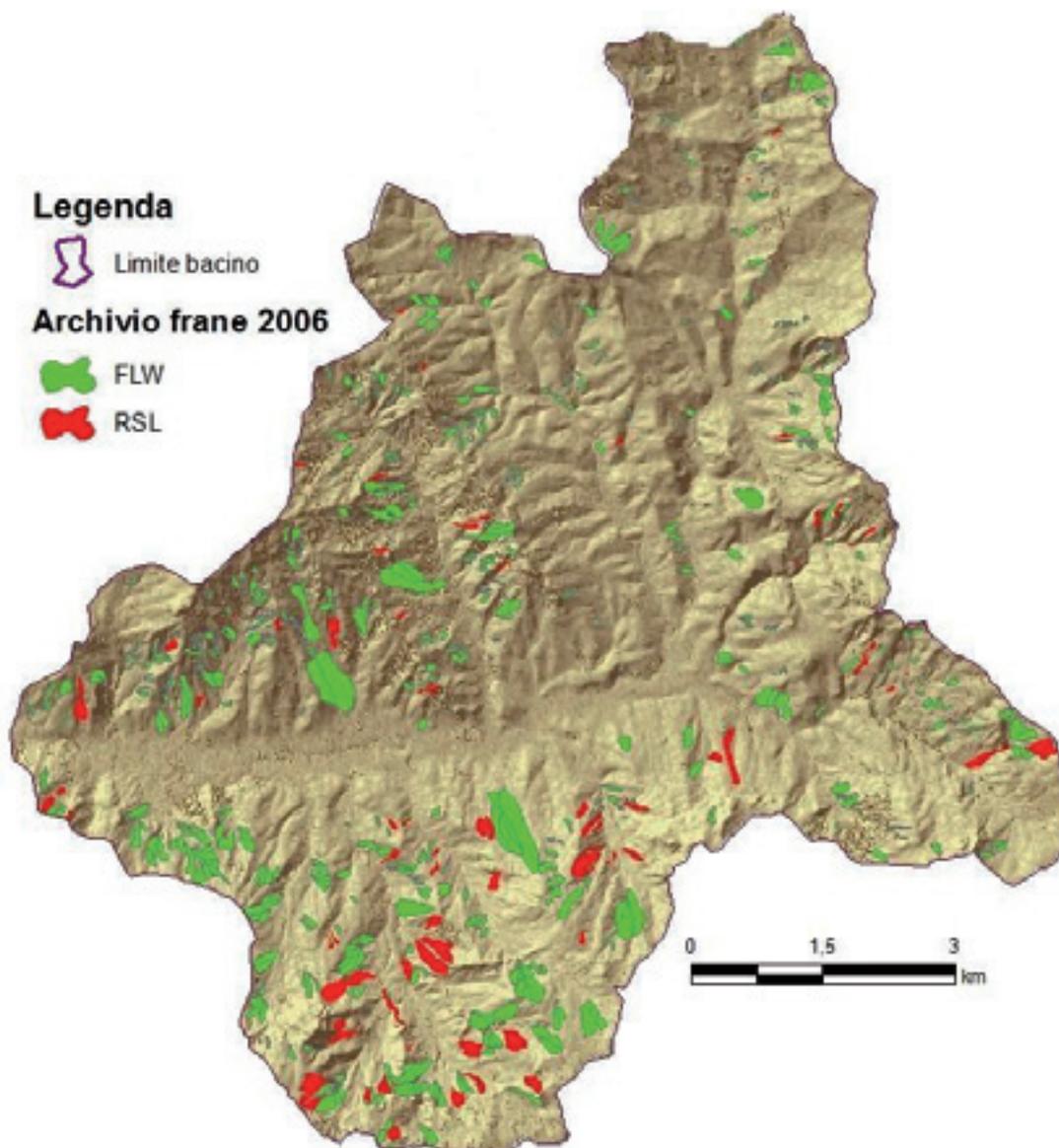


Figura 3. Distribuzione spaziale e frequenza delle forme di dissesto gravitativo.
Figure 3. Spatial distribution and frequency of the gravitative instability landforms.

Dal punto di vista delle litologie interessate, il 41% delle frane di colamento interessa i termini argillosi del Flysch Numidico, il 30%, le argille Serravalliane ed il 18% le argille siltose della Formazione Terravecchia. Le frane di scorrimento rotazionale risultano invece concentrarsi (67%) sui termini argillosi del Flysch Numidico e, subordinatamente, sui termini argillosi sottoposti alla Formazione Terravecchia (20%).

Nell'area sono anche stati osservati accumuli prodotti da fenomeni di crollo, i quali, tuttavia, non sono stati inclusi nel modello di suscettibilità, data la specificità dei fattori di controllo da prendere in considerazione (dati strutturali e definizione delle traiettorie possibili dei blocchi etc.).

Fattori di controllo

Nella definizione del modello di suscettibilità è necessario trovare un compromesso tra il numero di fattori presi in considerazione, e di classi con le quali ciascuno dei fattori è rappresentato, ed il numero di unità statistiche (UCU) prodotte. Se da un lato un numero elevato di fattori e di classi di riclassificazione sembrerebbe garantire al modello il massimo della risoluzione, un approccio basato sull'analisi condizionale richiede che le combinazioni di fattori ottenute abbiano aree totali sufficienti da poterne "osservare" il comportamento su un numero di casi (celle) il più possibile ampio. Attraverso procedure di calibrazione per prova ed errore, è necessario individuare un numero di fattori e di classi di riclassificazione minimo, ma certamente in grado di produrre UCU sufficientemente discriminate in termini di condizioni di franosità; in questo modo si determina una maggiore estensione media delle UCU e, dunque, una maggiore probabilità per le stesse UCU di essere "ben allenate" dal modello.

Nel bacino del Torrente Tumarrano, sulla base delle tipologie di movimento per le quali è stato progettato il modello, i parametri selezionati quali indici dei fattori di controllo delle condizioni di stabilità dei versanti sono: la pendenza (SLO); l'indice topografico di umidità (TWI); la curvatura piana (CUR); il comportamento litotecnico atteso (LIT). I parametri SLO, TWI e CUR sono calcolati direttamente a partire da un modello digitale di terreno a cella quadrata di lato 40m, ricavato digitalizzando isoipse e punti quotati, a partire dalla copertura georiferita delle carte tecniche regionali in scala 1:10.000, prodotte dall'Assessorato al Territorio e all'Ambiente della Regione Siciliana. Il fattore LIT è stato invece ricavato dalla carta dei litotipi affioranti nell'area, messa a punto utilizzando carte e dati di letteratura e rilievi geologici appositamente eseguiti sul terreno.

In Figura 4 viene mostrato l'andamento dei quattro parametri di controllo nell'area. Il parametro SLO costituisce il parametro più largamente utilizzato in letteratura per la valutazione della suscettibilità da frana: infatti, questo è indirettamente legato all'inclinazione dei possibili piani o orizzonti di rottura e, dunque, risulta normalmente correlato con la distribuzione delle frane.

Il *layer* della pendenza è espresso in formato GRID ed è stato ri-classificato secondo i seguenti intervalli: 0° - 5°; 5° - 10°; 10° - 20°; 20° - 30°; 30° - 45°.

Il parametro TWI (*Topographic Wetness Index*, esprime sulla base delle condizioni topografiche del pendio, le quali controllano la geometria del ruscellamento, la quantità d'acqua che può infiltrarsi e saturare le rocce affioranti, differenziando dunque le celle nelle quali è suddiviso il versante, in funzione del grado di umidità o saturazione potenziale. La presenza di acqua influenza direttamente la stabilità dei terreni, poiché da una parte ne aumenta il peso di volume, dall'altra modifica significativamente le resistenze disponibili su terreni a comportamento pseudo-coerente.

Il calcolo del TWI è realizzato in maniera automatizzata a partire dal DEM (Wilson & Gallant, 2000) utilizzando la relazione:

$$TWI = \ln (Ca / \tan \beta),$$

dove *Ca*, indica l'area tributaria (*contributing area*) di ogni cella, e β indica l'angolo di pendenza della cella considerata.

L'andamento del TWI è naturalmente marcato dalla presenza delle linee di drenaggio superficiale, le quali hanno a loro disposizione estese aree di alimentazione e, allo stesso tempo, presentano valori di pendenza tanto più modesti, quanto maggiore è il loro ordine gerarchico. Ciò nondimeno, le variazioni del parametro di maggiore interesse in questa sede sono quelle che caratterizzano i versanti nei quali possono osservarsi valori da bassi a medio – bassi a medio – alti.

Il parametro CUR, calcolato come derivata dell'esposizione del versante, ha consentito di discriminare versanti concavi, piani e convessi. Il parametro è stato calcolato utilizzando una relazione alle differenze finite che produce valori negativi per le porzioni convesse e valori positivi per i tratti di versante concavi. Si tratta di un parametro largamente utilizzato in letteratura (Wilson & Gallant, 2000; Ohlmacher, 2007), dal momento che consente di caratterizzare le condizioni di suscettibilità in un punto di un versante, in dipendenza delle caratteristiche topografiche, analizzate ad una scala più generale.

Per quanto riguarda la caratterizzazione della litologia affiorante, è stata operata un accorpamento in complessi litotecnici, in funzione della risposta o comportamento meccanico atteso. In questo modo è stato possibile ridurre notevolmente il numero di classi, semplificando ed irrobustendo l'analisi geostatistica. Sono così state individuate le seguenti 4 classi: pseudocoerente, incoerente, semicoerente, coerente.

Dalla Figura 4 osserviamo che la classe litotecnica predominante è quella costituita dai terreni a comportamento pseudocoerente. Fanno parte di questa classe tutti i termini nei quali è presente una frazione argillosa abbondante: argille del Tortoniano, della Formazione Terravecchia e del Flysch Numidico.

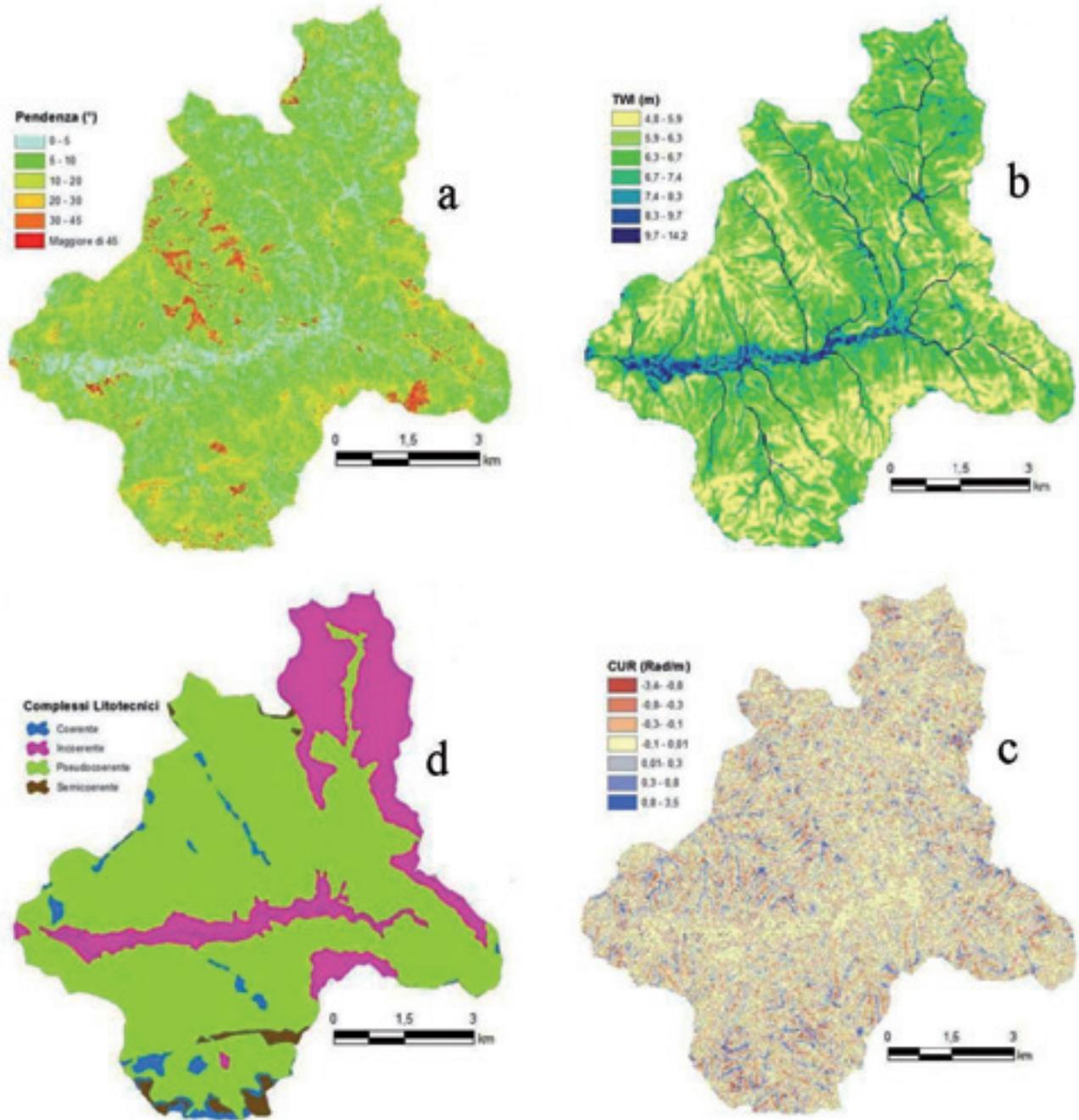


Figura 4. Distribuzione spaziale e la frequenza (tab. 1): a) il parametro SLO; b) il parametro TWI, c) il parametro CUR; d) il parametro LITO.

Figure 4. Spatial distribution and frequency (tab. 1) of: a) the SLO parameter; b) the TWI parameter; c) the CUR parameter; d) the LITO parameter.

Per questa unità, l'elemento caratterizzante del comportamento meccanico è costituito dall'estrema variabilità della coesione e della resistenza al taglio, in funzione del contenuto in acqua. Al complesso coerente afferiscono i termini litologici costituiti dal calcare di base e dai banconi quarzo-arenitici, al complesso incoerente afferiscono i termini sabbiosi della

Formazione Terravecchia e i depositi attuali e recenti, mentre ai termini semicoerenti afferiscono i calcari-marnosi della Formazione Trubi.

Una volta definiti i *layers* in formato GRID dei quattro fattori, si è proceduto alla loro combinazione in un unico strato informativo, il quale è costituito da un GRID le cui celle sono caratterizzate in funzione del tipo

di combinazione dei fattori ottenuta (Carrara *et alii*, 1995; Clerici *et alii*, 2002; Irigaray *et alii*, 2007). Si tratta dunque di un GRID rappresentante la distribuzione spaziale di unità di condizioni uniche (UCU).

Tabella 1. Le combinazioni delle Ucus più diffuse.
Table 1. Most frequent (diffused) UCU values.

VALUE	N° Cells (Rastri)	CUR (rad/m)	Tilt (°)	SUD (°)	LIT
121	2097	0.8-3.5	6.3-6.7	10-20	Pseudo-coerente
115	2074	0.3-0.8	6.3-6.7	10-20	Pseudo-coerente
99	2259	0.8-3.5	6.7-7.4	10-20	Pseudo-coerente
96	2182	0.3-0.8	6.7-7.4	10-20	Pseudo-coerente
119	1664	-0.1-0.01	6.3-6.7	10-20	Pseudo-coerente
97	1313	0.01-0.03	6.3-6.7	10-20	Pseudo-coerente
91	1464	0.03-0.03	6.7-7.4	10-20	Pseudo-coerente
130	1497	-0.1-0.01	8.3-9.7	5-10	Pseudo-coerente
123	1729	0.8-3.5	8.3-9.7	5-10	Pseudo-coerente
116	1320	0.01-0.03	6.7-7.4	10-20	Pseudo-coerente
106	951	0.8-3.5	6.3-6.7	10-20	Pseudo-coerente
105	676	-0.1-0.01	6.3-6.7	10-20	Pseudo-coerente
180	532	-0.1-0.01	6.7-7.4	10-20	Pseudo-coerente

La rappresentazione combinata delle caratteristiche fisico-ambientali consente di fatto di condurre l'analisi della suscettibilità e di pervenire ad una caratterizzazione della stessa, secondo un approccio multivariato, che mette al riparo la capacità previsionale del modello rispetto ad effetti di correlazione incrociata tra i fattori stessi.

La combinazione dei quattro fattori in singole UCU ha prodotto un numero molto elevato di domini omogenei (525 classi di combinazioni), ma assai inferiore al numero totale delle 1344 possibili combinazioni; tale circostanza costituisce una conferma della mutua dipendenza tra fattori e, dunque, della necessità di affrontare secondo un approccio multivariato il problema.

In Tabella 1 vengono riportate le caratteristiche delle UCU più diffuse nel bacino, aventi una frequenza pari almeno a 500 celle (0.8 km²). La tabella mostra come le UCU più diffuse siano caratterizzate tutte da litologie argillose e quindi a comportamento pseudo-coerente, quasi completamente ricadenti nella classe di pendenza con valori da 10° ai 20°.

Valutazione della suscettibilità da frana

In accordo con l'approccio utilizzato, il valore di suscettibilità da frana associato a ciascuna area, in funzione delle sue caratteristiche fisico-ambientali, è stato ricavato mettendo in relazioni spaziale gli strati informativi dei fattori combinati e delle frane. Intersecando i due layer (UCU e frane), è infatti possibile calcolare la densità di area in

frana δ_{UCU}^{sd} , come rapporto tra l'estensione dell'area in frana A_{UCU}^{sd} e quella dell'area totale A, di ciascuna i-esima UCU:
 $\delta_{UCU}^{sd} = A_{UCU}^{sd} / A_{UCU}$.

Dal punto di vista probabilistico, si dimostra come la densità di frana corrisponda al valore della probabilità di riscontrare un'area in frana, condizionata ad una determinata combinazione di fattori di controllo. La funzione $\delta_{UCU}^{sd} = f(UCU)$ costituisce dunque la funzione probabilistica scelta per rappresentare le condizioni di suscettibilità da frana.

Per poter validare il modello di suscettibilità è possibile seguire un approccio largamente utilizzato in letteratura (Chung and Fabbri, 2003; Irigaray *et alii*, 2007; Cososcenti *et alii*, 2008a, 2008b); questo prevede, in generale, l'analisi della coerenza tra lo scenario di franosità previsto (*prediction image*), il quale costituisce la proiezione nello spazio del modello, e quello costituito dalla distribuzione delle frane incognite (*unknown target pattern*). I vari metodi di validazione si differenziano per le modalità con le quali vengono introdotte e/o simulate le immagini, prevista e reale, della distribuzione delle frane. È infatti possibile procedere secondo l'approccio più direttamente legato all'aspetto previsionale, solo quando siano disponibili archivi temporali dei dissesti; questi ultimi, infatti, consentono di utilizzare un set di frane, rilevate in una data epoca, per costruire il modello (calcolando le densità di frana corrispondenti a ciascuna UCU) e di confrontare l'immagine previsionale prodotta con la distribuzione spaziale delle frane ad un epoca differente.

Una condizione assai diffusa è invece rappresentata dalla mancanza di un archivio delle frane che sia definito almeno per due epoche differenti. Chung & Fabbri (2003) individuano in questo caso due possibili tecniche: una suddivisione *random* dell'archivio delle frane in due archivi separati, ciascuno dei quali simuli un'epoca differente (*random partition*): si tratta di un espediente che consente di ottenere un set di "eventi *training*", con i quali si costruisce il modello, ed un set di "eventi *test*", la cui distribuzione spaziale ci si propone di riprodurre. Alternativo a questo metodo è quello invece basato sulla suddivisione dell'area indagata in due settori (*spatial partition*), utilizzando assi di simmetria eventualmente riconosciuti (limiti che separino, all'interno dell'area indagata, due settori aventi caratteristiche simili); in questo caso il modello costruito in un "settore *training*" viene esportato in un "settore *test*", in modo da poter confrontare, in quest'ultimo, l'immagine previsionale prodotta con la distribuzione delle frane osservate.

Cososcenti *et alii* (2008b) propongono una strategia di validazione che opera invece una suddivisione *random* delle celle di ciascuna delle UCU (*spatial random partition*) in un gruppo *training* ed uno *test*, numericamente bilanciati. Questo approccio garantisce un perfetto bilanciamento tra il numero di celle presenti nell'area *training* e nell'area *test*, per ciascun valore di

UCU, consentendo di lavorare secondo una partizione spaziale oggettiva (in quanto *random*) e perfettamente simmetrica dal punto di vista geostatistico, che produce due sub-aree realmente gemelle. Le partizioni basate su suddivisione *random* delle frane o su individuazione di assi di simmetria geologica dell'area sono invece fortemente esposte a variazioni spaziali dei fattori di controllo (sia che siano inclusi nel modello, sia che siano ignorati), che potrebbero limitare la capacità previsionale del *dominio training* nei confronti del *dominio test*.

A ciascuna UCU viene dunque assegnato un valore di suscettibilità da frana in funzione della densità di area in frana riscontrata nelle celle *training* (densità *training*). Tracciando in un grafico a dispersione la porzione cumulata di celle *training* in frana in funzione della porzione cumulata delle celle *training* totali, ordinate secondo densità *training* decrescenti, è possibile valutare la qualità dell'adattamento del modello (*model fit*) in funzione delle caratteristiche geometriche della curva che si ottiene: la *success rate curve*.

Analogamente, dalla *prediction rate curve*, che si ottiene tracciando la porzione cumulata di celle *test* in frana in funzione della porzione cumulata delle celle *test* totali, fermo restando il criterio ordinario desunto dalla densità *training*, è possibile valutare la abilità previsionale del modello (*prediction skill*). Se, nel *dominio test*, la suscettibilità delle UCU è correttamente classificata (dunque, se il modello definito nel *dominio training* è effettivamente corretto), allora, tenendo conto della rappresentazione in forma cumulata, le curve di validazione mostreranno in generale forti gradienti nel tratto iniziale (la percentuale di area in frana prevista sarà maggiore per le classi a suscettibilità maggiore) e un andamento linearmente decrescente via via che si prendono in considerazione le risposte delle UCU meno suscettibili. Un andamento secondo una retta a 45° indicherebbe in questo grafico che la porzione di area in frana è costante per ciascuna area analizzata, senza che la scala di suscettibilità secondo la quale le UCU vengono disposte lungo l'asse delle ascisse ne moduli minimamente l'andamento: questo andamento costituisce dunque il limite prestazionale inferiore dei modelli previsionali, corrispondente ad una previsione completamente *random*. Allo stesso tempo, il confronto tra l'andamento delle due curve di validazione (*success* e *prediction*) costituisce un importante criterio della qualità della validazione stessa. Infatti, se è possibile che due domini, quale che sia la procedura utilizzata per generarli, producano per caso *success rate curve* con andamenti che rispondono ai requisiti di sopra esposti, soltanto quando il modello previsionale è correttamente strutturato (i fattori di controllo selezionati sono sufficienti a descrivere il fenomeno) e la suscettibilità delle UCU è correttamente definita (l'archivio frane è completo e correttamente rappresentato) la *prediction rate curve* sarà simile (in un modello perfetto, coincidente).

Un ulteriore criterio nella valutazione della prestazione previsionale del modello è dunque il grado di coincidenza delle curve di validazione: ogni scostamento corrisponde infatti ad una sovra- o sotto-stima della suscettibilità delle UCU corrispondenti lungo l'asse delle ascisse.

Risultati e validazione dei modelli

Al fine di calcolare il valore di densità di frana per ciascuna delle combinazioni rappresentate dal *layer* delle UCU, è stata realizzata l'intersezione di quest'ultimo con il *layer* vettoriale delle frane del 2006. In questo modo a ciascuna delle combinazioni ottenute è stato associato un valore di suscettibilità da frana atteso, il quale corrisponde alla probabilità spaziale di incontrare una frana, condizionata alla circostanza di "interrogare" celle appartenenti ad una determinata UCU. In Figura 5 vengono mostrate le carte della suscettibilità da frana ottenuta per le due tipologie di movimento, nella quale i valori di densità sono stati riclassificati secondo il criterio delle aree uguali, in modo che ciascuna delle classi risulti "sostenuta" da un ugual numero di osservazioni (numero di celle). La carta mostra naturalmente valori di suscettibilità indipendenti dalla sovrapposizione di frane, dal momento che il valore di densità di frana di una UCU viene associato a tutte le celle che la rappresentano.

Per sottoporre a validazione il modello di suscettibilità ottenuto, la cui proiezione spaziale (geografica) costituisce le carte di Figura 5 si è proceduto alla partizione spaziale *random* del *layer* delle UCU (Conoscenti et al. 2008NARO), generando due *grid* perfettamente gemelli, che vengono chiamati UCU^{TRN} (*training*) e UCU^{TST} (*test*). Intersecando il *grid* UCU^{TRN} con il *layer* delle frane, si ricalcolano, per ciascuna delle UCU, dei valori di densità di frana dipendenti solo dalle celle in frana, ricadenti all'interno delle celle *training*. Questi valori vengono allora trasferiti alle corrispondenti celle del *layer* UCU^{TST} (appartenenti alla stessa UCU), definendone la densità di frana attesa, la cui distribuzione spaziale fornisce l'immagine previsionale (*prediction image*) del *dominio test*. Questa può dunque essere confrontata con la distribuzione reale delle frane (*unknown target pattern*), costituita dalle celle in frana appartenenti al solo *dominio test*.

In Figura 6a,b vengono mostrati i grafici di validazione ricavati per il bacino del Torrente Tumarrano, i quali mettono in evidenza un andamento di entrambe le curve di validazione largamente soddisfacente, con gradiente molto elevato in corrispondenza delle classi più suscettibili e linearmente decrescente fino alle UCU meno suscettibili. Il grado di sovrapposizione tra *success* e *prediction rate curves* è molto elevato per le frane di colamento e meno marcato nel caso degli scorrimenti rotazionali.

Sfruttando la disponibilità, per l'area rappresentativa,

di un archivio delle frane definito anche al 2007, al fine di verificare la stabilità del modello rispetto ad una migrazione temporale, pur limitata ad una sola stagione idrologica, il modello di suscettibilità è stato sottoposto ad una validazione temporale.

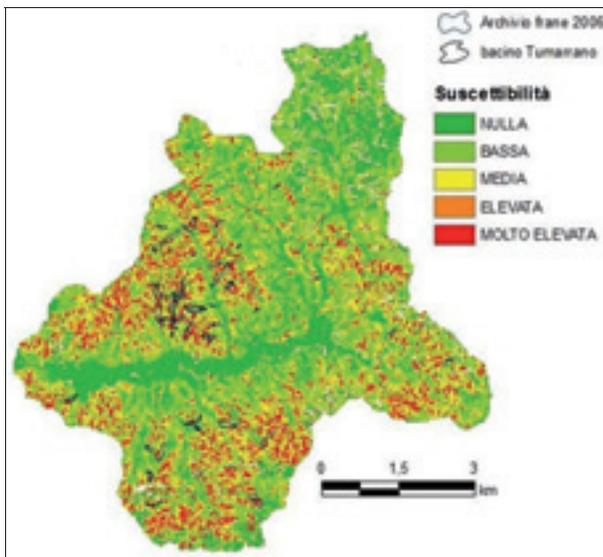
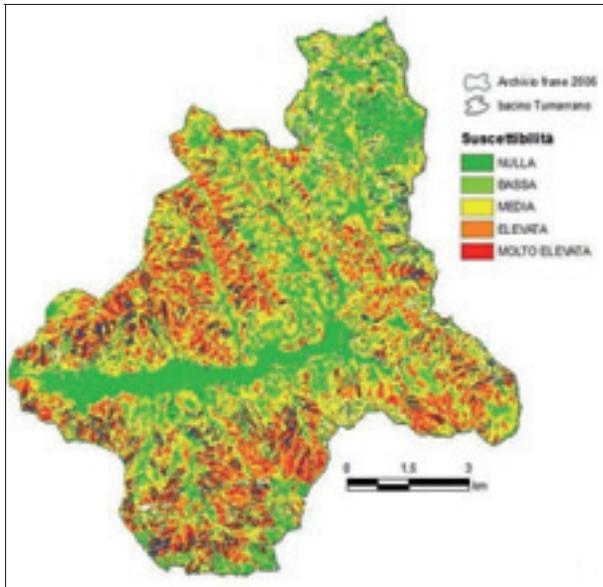


Figura 5. Carta della suscettibilità da FLW (5a) e da RSL (5b), derivata dall'intero archivio frane.

Figura 5. Susceptibility maps for the FLW (5a) and RSL (5b) datasets, derived from the entire instability landforms set.

Il layer delle UCU è stato dunque ritagliato utilizzando i limiti dei sottobacini campione, assegnando a ciascuna combinazione il valore di suscettibilità da frana osservato sull'intero bacino, ricavato dalle frane 2006 (Figura 5). In Figura 7 vengono mostrate le carte della suscettibilità ottenute per importazione dentro l'area campione del modello totale, con la sovrapposizione delle

frane 2007. Tutte le UCU individuate all'interno del bacino del Torrente Tumarrano sono presenti anche all'interno dell'area di verifica, pur con frequenze (numero di celle) in alcuni casi estremamente limitate.

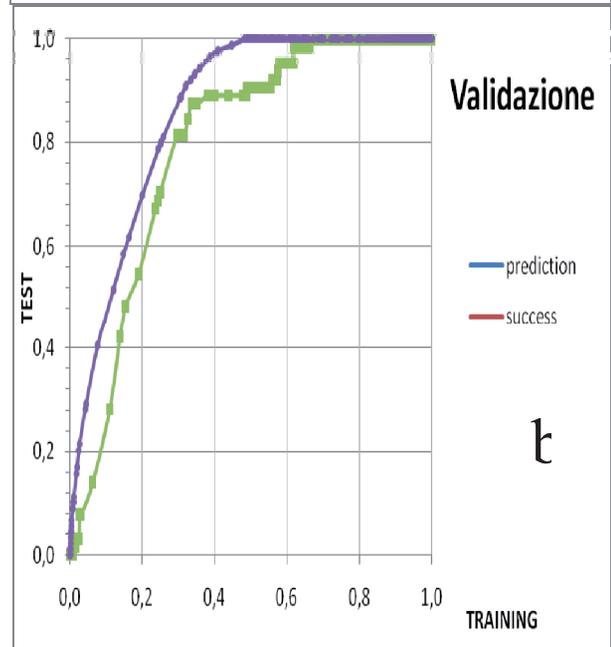
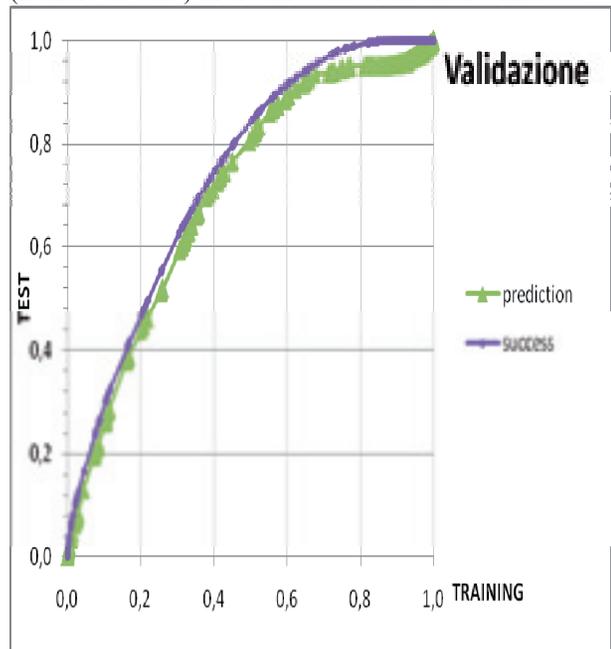


Figura 6a,b. Curve di validazione per FLW e RSL.

Figure 6a,b. Prediction and success rate curves for the FLW and RSL datasets.

In Figura 8a,b vengono mostrate le curve di validazione ottenute, le quali confermano la buona capacità previsionale del modello per i colamenti, anche quando questo viene sottoposto a migrazione temporale. Dalle curve di validazione è possibile osservare come il 50% dell'area prevista come più suscettibile giustifica il

25% delle frane incognite.

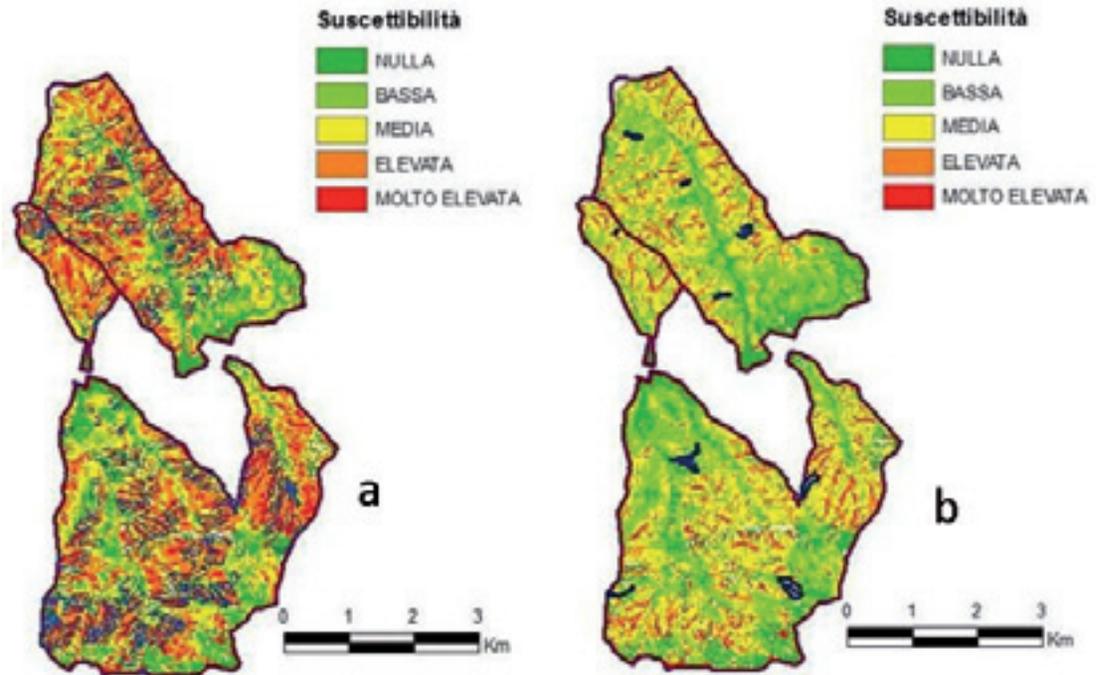


Figura 7a. carta della suscettibilità da FLW importata dentro l'area campione con sovrapposizione delle frane 2007. Figura 7b – carta della suscettibilità da RSL importata dentro l'area campione con sovrapposizione delle frane 2007.

Figure 7a. map of susceptibility FLW imported into the sampling area with overlapping landslides 2007. Figure 7b - a map of susceptibility RSL imported into the sampling area with overlapping landslides 2007.

Sebbene non si sia proceduto ad una riclassificazione delle classi di suscettibilità, sulle curve di validazione sono presenti pochi effetti ad alta frequenza, per lo più riconducibili a singole UCU che hanno “lavorato” diversamente nei domini *training* e nel *test*. Le curve di validazione del modello per gli scorrimenti rotazionali mettono in evidenza una incapacità del modello importato, allenato sulle frane 2006 al di fuori dell'area campione, di riprodurre le frane 2007.

Nelle Figure 9a e 9b vengono mostrate le curve di validazione ottenute per autovalidazione di un modello costruito esclusivamente all'interno dell'area campione. Quest'ultimo dovrebbe fornire una prestazione previsionale ottimale, in quanto priva di effetti legati ad UCU presenti all'esterno di questa. Il confronto delle curve di validazione ottenute in questo caso mette in evidenza una pressoché equivalente prestazione previsionale per il modello delle frane di colamento, mentre una prestazione nettamente migliore si riscontra per le frane di scorrimento rotazionale.

Il modello di suscettibilità e la carta derivata (Figura 5) costituiscono dunque una rappresentazione delle condizioni di suscettibilità dell'area studiata, che soddisfa i requisiti di stabilità temporale e spaziale delle distribuzioni di frana attese.

Discussione e considerazioni conclusive

La ricerca condotta ha messo in evidenza una buona capacità previsionale per un modello basato su un numero ridotto di parametri combinati in Unità di Condizioni Uniche, che è stata verificata attraverso una validazione sia spaziale, per tutto il bacino, che, per una sua parte rappresentativa, temporale.

Le curve di validazione prodotte dal modello di suscettibilità relativo all'intero bacino attestano una buona capacità previsionale e stabilità del modello. La minore qualità delle curve di validazione per le frane di scorrimento rotazionale potrebbe essere legata ad una minore capacità di spiegare questa tipologia di frana da parte dei fattori di controllo selezionati, oppure per una ambiguità delle forme utilizzate per rappresentare gli eventi pregressi. Infatti, è vero che, per quanto riguarda le frane di colamento, l'intera area in frana presenta una buona omogeneità e specificità, mentre le aree coinvolte in scorrimenti rotazionali più facilmente presentano forti variabilità, soprattutto nelle caratteristiche topografiche, delle aree ricadenti all'interno della cosiddetta area in frana, la quale include sia la zona di distacco che quella di accumulo.

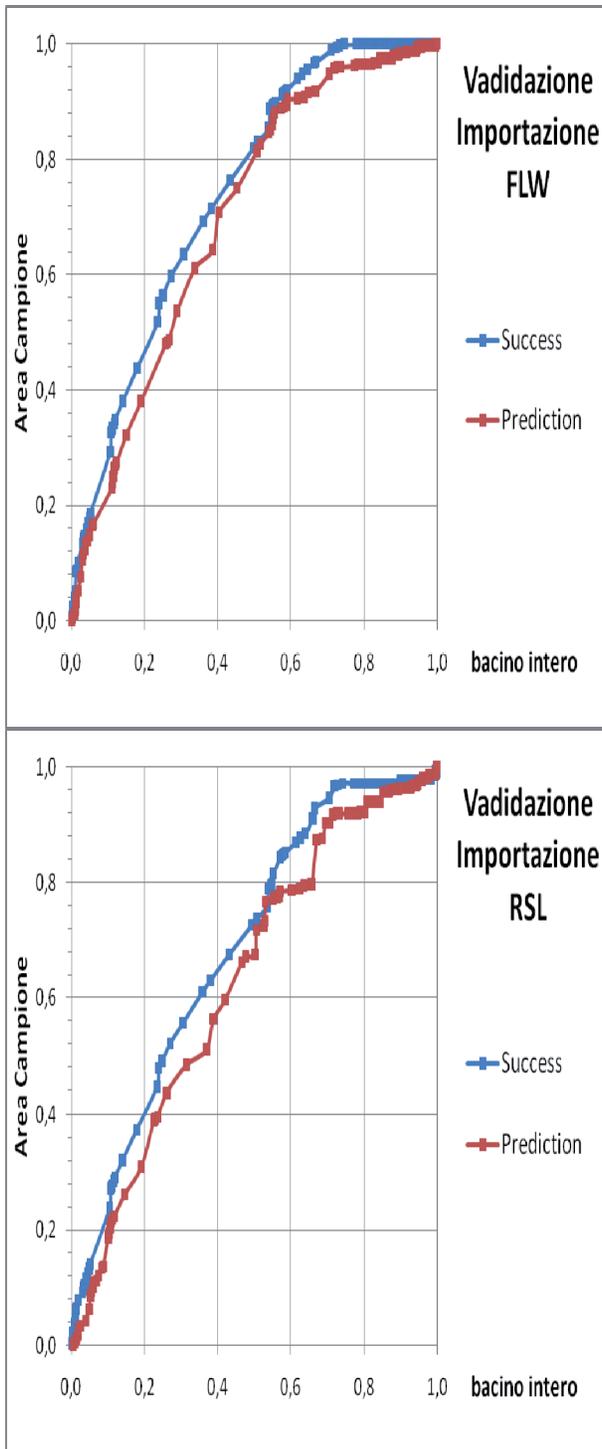


Figura 8. Validazione del modello di importazione a) FLW;b) RSL

Figura 8. Validation of the import model) FLW b) RSL

Per quanto riguarda la validazione temporale delle frane, questa fornisce risultati molto più soddisfacenti per le frane di colamento, dal momento che le due epoche di rilevamento si discostano per un solo anno; questo intervallo è infatti sufficiente per questa tipologia di

movimento a riprodurre in modo completo uno scenario di attivazioni simile a quello con il quale è stata prodotta la carta di suscettibilità.

La procedura utilizzata sembra comunque costituire un metodo robusto per la valutazione della suscettibilità da frana. Il largo e diffuso utilizzo che i metodi geostatistici conoscono già da almeno tre decenni negli studi della pericolosità da frana non elimina tuttavia alcuni nodi concettuali ed operativi che ne rendono a tutt'oggi solo sporadica l'applicazione da parte delle amministrazioni che in Italia studiano il rischio da frana.

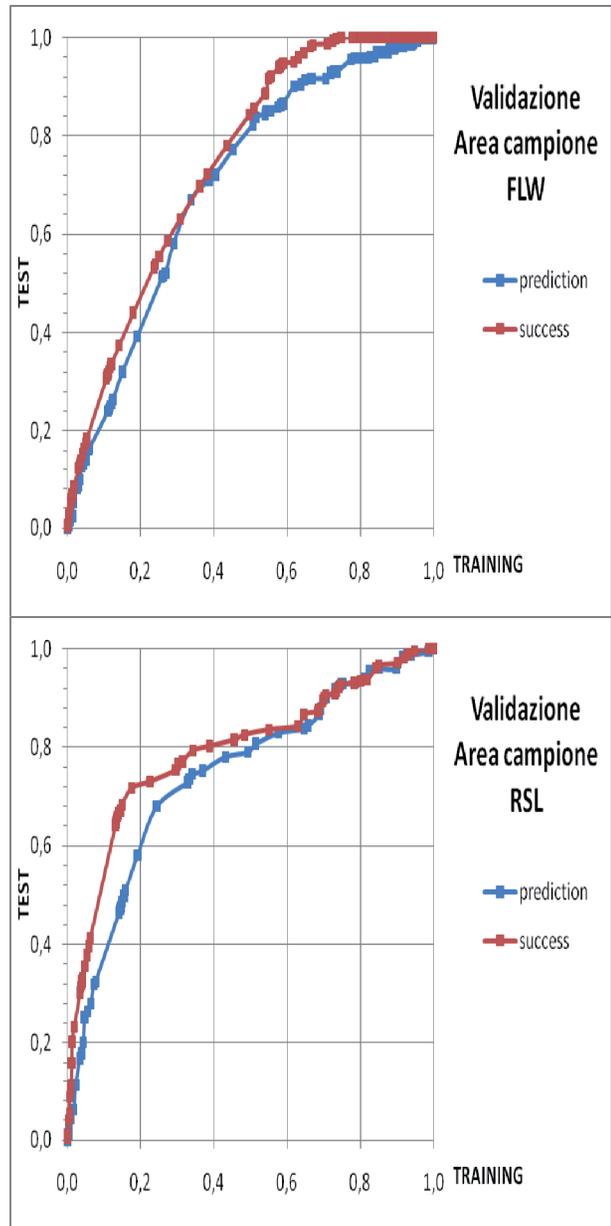


Figura 9. Auto-Validazione del modello a) FLW;b) RSL.

Figura 9. Auto-Validation of the model a) FLW b) RSL.

Lo studio condotto nel bacino del Torrente Tumarrano

vuole costituire un contributo nell'ambito delle ricerche finalizzate allo sviluppo di metodi di valutazione delle condizioni di pericolosità da frana, applicabili alla scala regionale. In questo senso, un forte moltiplicatore di costi è la necessità di ricostruire archivi dei dissesti con buon grado di risoluzione e per più epoche di osservazione, su aree aventi estensioni dell'ordine delle migliaia di chilometri quadrati. Nel presente lavoro, si è verificata la possibilità di procedere ad un rilevamento delle frane utilizzando il sistema Google Earth™, i cui risultati sono stati, per controllo, confrontati con quelli prodotti dal rilevamento di campagna; questo confronto ha evidenziato differenze del tutto trascurabili e, soprattutto, che non attestano univocamente una migliore qualità dei dati di terreno (i quali soffrono di un punto di vista spesso troppo ravvicinato).

L'utilizzo del sistema Google Earth™ può dunque costituire un elemento di fondamentale importanza per lo sviluppo futuro dei metodi di valutazione della pericolosità da frana: sia per la velocità di rilevamento, il quale risulta al tempo stesso agile e dettagliato, sia per la possibilità di accedere in modo immediato e con sovrapposizione spaziale delle foto-immagini controllata a coperture multitemporali. Quest'ultimo passo apre la possibilità di procedere a validazioni temporali dei modelli ed all'analisi dei tempi di ritorno degli eventi di attivazione, ponendo le basi per valutare la pericolosità piuttosto che la suscettibilità da frana.

Riferimenti bibliografici

Brabb, E.E., 1984. Innovative approaches to landslide hazard mapping. Proceedings 4th International Symposium on Landslides, Toronto, 1: 307-324.

Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P., 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A., Guzzetti, F. Eds., Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175.

Chung C. & Fabbri F., 1995. Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: Carrara, A., Guzzetti, F. Eds., Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. Kluwer Academic

Publisher, Dordrecht, The Netherlands, pp. 107-142.

Chung, C. F., Fabbri, A. (2003) Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards* 30, pp. 107-142.

Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P., 2002. A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48, 349-364.

Conoscenti C., Di Maggio C., Rotigliano E., 2008a. GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy). *Geomorphology*, 94, 325-339.

Conoscenti C., Di Maggio C., Rotigliano E., 2008b. Soil erosion susceptibility assessment and validation using a geostatistical multivariate approach: a test in Southern Sicily. *Natural Hazards*, 46, 287-305.

Cruden D.M. & Varnes D.J., 1996. Landslides Types and Processes. In: Turner A.K. & Schuster R.L. (Eds.) *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press, WA, 36-75.

Fabbri A.G. & Chung C.J., 2003. Is prediction of future landslides possible with a GIS? In: Chacon J., Corominas J. (eds) Special issue on Landslides and GIS. *Nat. Hazards* 30(3), 487-499.

Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Eric L., Savage W.Z., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning (on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes). *Engineering Geology*, 102, 85-98.

Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31, 181-216.

Irigaray C., Fernández T., El Hamdouni R., Chacòn J., 2007. Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Natural Hazards*, 41, 61-79.

Ohlmacher G., 2007. Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. *Engineering Geology*, 91, 117-134.

Van Den Eeckhaut M., Reichenbach P., Guzzetti F., Rossi M., Poesen J., 2009. Combined landslide inventory and susceptibility assessment based on different mapping units: an example from the Flemish Ardennes, Belgium. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 507-521.

Varnes, D.J. & IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements, 1984. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. The UNESCO Press, Paris, 63 p.

Wilson J.P. & Gallant J.C., 2000. *Terrain analysis: principles and applications*. Wiley & Sons, Inc., Canada.

Indici analitici

Key therms index

<p>Aquifer 11 Apulia 55 Basin planning 25 Borehole thermal resistance 61 Calabria 37 Clayey soil 49 Conditional probability Distribution function 61 Drift 61 Environmental Geol-</p>	<p>ogy 71 Environmental implications 3 Estimation variance 61 Geodiversity 71 Geostatistics 61 GIS 37, 55 Google Earth 83 Ground response test 61 Ground thermal conductivity 61</p>	<p>Ground volumetric heat capacity 61 Hydrogeology 25 Karstic areas 71 Laboratory tests 49 Landslide susceptibility 37, 83 Lime stabilization 49 Mechanical behaviour 49 Mine tailings 3 Mineralogy 3 Planning 11</p>	<p>Quarries 55 Rambla 3 Runoff on a physiographic basis 25 Sicily 83 Southern Italy 55 Statistical analysis 37 Territory 11 Transport 3 Vulnerability 11 Water balance 25 Weathering 3</p>
---	--	---	--

Indice dei termini chiave

<p>Acquifero 11 Alterazione 3 Aree carsiche 71 Bilancio idrico 25 Calabria 37 Capacità termica volumetrica del terreno 61 Cave 55 Comportamento meccanico 49 Conduttività termica del terreno 61</p>	<p>Deflusso su basi fisiografiche 25 Deriva 61 Discariche minerarie 3 Frane suscettibilità 83 Funzione di distribuzione di probabilità condizionale 61 G.I.S 37, 55 Geodiversità 71 Geologia ambientale 71 Geostatistica 61</p>	<p>Google Earth 83 Idrogeologia 25 Impatto ambientale 3 Italia meridionale 55 Mineralogia 3 Pianificazione 11 Piano di Bacino 25 Prove di laboratorio 49 Puglia 55 Rambla 3 Resistenza termica del foro Sicilia 83</p>	<p>Stabilizzazione con calce 49 Statistica bivariata 37 Suscettibilità da frana 37 Terreno argilloso 49 Territorio 11 test di risposta termica 61 Trasporto torrentizio 3 Varianza di stima 61 Vulnerabilità 11</p>
--	---	--	---

Indice degli Autori

<p>Barazzuoli P. 11,25 Bruno R. 61 Calderòn García A.A. 3 Capacci F. 11,25 Carbone M. 37 Cherubini C. 55 Conforti C. 37</p>	<p>Conoscenti C. 83 Costanzo D. 83 Critelli S. 37 Faccini F. 71 Focaccia S. 61 Giammatteo M. 3 Magaldi D. 3</p>	<p>Manteca Martínez J.I. 3 Migliorini J. 11,25 Muto F. 37 Orazi M. 49 Orazi U.S. 49 Perasso L. 71 Poggi F. 71</p>	<p>Reina A. 55 Rigati R. 11,25 Rotigliano E. 83 Sollitto D. 55 Tinti T. 61 Vernassa A. 71 Visicchio F. 55</p>
---	---	---	---

Note per gli autori

Lingua. Le lingue della rivista sono l'Italiano e l'Inglese, ma sono benvenuti anche lavori nelle altre lingue più diffuse della Unione Europea (Francese, Spagnolo, Tedesco). Tutti gli articoli devono essere preceduti da un riassunto in Inglese (Abstract), a sua volta preceduto dal titolo dell'articolo tradotto in Inglese. Le didascalie delle Figure e delle Tabelle, nella lingua originale dell'articolo, devono avere anche la traduzione in Inglese. Dopo l'Abstract in Inglese, ogni articolo in lingua diversa dall'Inglese inizierà con un riassunto nella lingua dell'articolo.

Invio del manoscritto. Ogni manoscritto proposto per la stampa dovrà essere inviato al seguente indirizzo di posta elettronica: giornale@geoitalia.org. I manoscritti saranno revisionati da almeno due revisori. Gli autori sono invitati a segnalare i nomi di studiosi che potrebbero revisionare il manoscritto, senza che questo costituisca un impegno per la rivista. La politica della rivista per la revisione dei manoscritti prevede che il nome dei revisori non sia segreto, salvo il caso di specifica richiesta da parte dei revisori stessi. L'invio di un manoscritto alla rivista significa che lo stesso rappresenta un'opera di ingegno originale degli autori, che il manoscritto non è stato pubblicato in precedenza e che non è stato inviato contemporaneamente ad altre riviste.

Preparazione del manoscritto. Il manoscritto deve essere preparato con un word processor, con interlinea doppia, in una sola colonna e con ampi margini. L'Abstract in Inglese non deve superare le 150 parole, deve essere formato da un unico paragrafo, non deve contenere citazioni bibliografiche e neppure riferimenti al testo. L'Abstract deve essere considerato come un testo autosufficiente, che può essere diffuso anche separatamente dall'articolo. Il riassunto nella lingua originale dell'articolo può essere più lungo, senza tuttavia superare le 500 parole.

Gli autori sono invitati ad utilizzare la terminologia della IUGS e le unità di misura S.I.

La prima pagina dovrà contenere il titolo dell'articolo il nome (per esteso) ed il cognome degli autori, il nome dell'Istituzione di appartenenza e l'indirizzo e-mail di ogni autore, l'Abstract in Inglese. Dovrà essere inoltre indicato a quale degli autori deve essere inviata la corrispondenza relativa all'articolo (autore corrispondente) e, per quest'ultimo dovrà essere indicato anche l'indirizzo postale e il numero del Fax. Dalla seconda pagina in poi troverà posto il riassunto nella lingua dell'articolo ed il testo dell'articolo. Non utilizzare per il titolo del lavoro il carattere tutto maiuscolo.

Le didascalie delle Figure e delle Tabelle e la Bibliografia dovranno trovare posto in pagine separate da quelle del testo.

Citazioni bibliografiche. Nel testo, le citazioni bibliografiche possono avere due forme: (a) tra parentesi rotonda il cognome (o i cognomi) dell'autore, seguito da una virgola e dall'anno di pubblicazione dell'articolo, (b) il cognome dell'autore (o degli autori) seguito dall'anno di pubblicazione tra parentesi rotonda. Non utilizzare per le citazioni nel testo il maiuscolo o il carattere tutto maiuscolo. L'espressione *et alii* è preferita a quella *et al.* Tutte le citazioni nel testo devono trovare corrispondenza nella Bibliografia e viceversa.

Tabelle. Le Tabelle devono essere compilate in fogli separati e devono essere numerate secondo la loro successione nel testo. Le Tabelle potranno essere accompagnate da una didascalia esplicativa del contenuto. Nel testo si dovranno trovare riferimenti a tutte le Tabelle, nella forma: Tabella 1, Tabella 2 ecc.

Figure. Tutte le Figure devono essere numerate secondo la loro posizione nel testo, nel quale si devono trovare riferimenti a tutte le Figure, nella forma: Figura 1, Figura 2 ecc.

Le scritte presenti nei disegni devono avere dimensioni adeguate, e comunque devono essere leggibili anche dopo l'eventuale riduzione della dimensione del disegno. Nel preparare i disegni sarà necessario tenere conto del formato della pagina di stampa.

Le fotografie devono essere di buona qualità, in modo da essere leggibili anche nella stampa.

Gli autori che rivogliono indietro gli originali delle Figure devono comunicarlo al momento dell'invio del lavoro o, al più tardi, quando restituiscono le bozze.

Bibliografia. I riferimenti bibliografici devono essere riportati in ordine alfabetico, utilizzando il carattere normale, cioè senza maiuscoletto, tutto maiuscolo, corsivo o grassetto. La forma deve essere la seguente: "Cognome, N., 2005. Titolo dell'articolo per esteso. Nome della rivista 24 (2), 234-251". Gli ultimi numeri rappresentano: il numero del volume, (il numero del fascicolo, se è necessario), le pagine iniziale e finale dell'articolo.

Testo finale per la stampa. Completato il processo di revisione, gli autori dovranno redigere il testo finale per la stampa in forma elettronica e con le seguenti modalità. Il manoscritto dovrà essere suddiviso in differenti files, contenenti rispettivamente: (a) Titolo, Autori, Titolo in Inglese ed Abstract; (b) Riassunto e Testo; (c) Didascalie delle Figure e delle Tabelle; (d) Bibliografia; (e) Tabelle; (f) Figure (eventualmente). Ogni file deve avere un nome che permetta di riconoscere facilmente il contenuto del file.

Il testo deve essere in una sola colonna, con interlinea singola, non giustificato a destra, senza spaziatura alla fine dei paragrafi e con il minimo di formattazione automatica.

Bozze. Sarà predisposta una sola serie di bozze, che saranno inviate all'autore corrispondente per essere controllate prima della stampa. E' necessario che gli autori non facciano sulle bozze correzioni che consistono in una modifica del testo accettato per la stampa.

Estratti. Di ogni articolo saranno predisposti 25 estratti gratuiti. Ulteriori copie degli estratti devono essere ordinate, a pagamento, in occasione della restituzione delle bozze.

Contributo per la stampa. L'Aiga richiede agli autori un contributo per la stampa pari a 18 Euro per ogni facciata del lavoro.

