

APPLICAZIONI DELLA MATEMATICA *FUZZY* PER LA SELEZIONE DEI PROGETTI CONSERVATIVI NEI SITI ARCHEOLOGICI

1. PREMESSA

L'Archeologia è una disciplina di grande fascino ed una fonte di continui stimoli e di occasioni di confronto tra la cultura umanistica e quella scientifico-tecnologica. Numerosi sono i metodi ed i procedimenti derivanti dai moderni sviluppi di quest'ultima che sono stati proposti e sperimentati per (tentare di) rispondere a tematiche archeologiche generali e specifiche. Non tutti si sono rivelati efficaci, o immediatamente tali, per difetto intrinseco o per incomprendimento, ma certamente taluni sono oramai insostituibili, ad esempio alcune procedure di datazione o di caratterizzazione (CILIBERTO, SPOTO 2000). Ma anche alcuni metodi matematici e soprattutto statistici, superati gli eccessi scienziati di parte della cosiddetta Archeologia Quantitativa (TERRENATO 2000), trovano ora alcuni utili impieghi (BAXTER, BUCK 2000; DJINDJIAN, MOSCATI 2002).

Questa nota si propone di illustrare una applicazione della matematica *fuzzy* nella definizione di una procedura finalizzata alla selezione del miglior progetto conservativo dei siti archeologici. La matematica *fuzzy* è in sviluppo da circa quarant'anni (anche se le sue lontane premesse possono farsi risalire ad alcuni temi della filosofia di Eraclito, Parmenide e Platone) e presenta degli aspetti di base che, dopo una opportuna fase di adeguamento e sperimentazione, potrebbero renderla un utile strumento decisionale (a fini classificatori) in Archeologia (BIETTI SESTIERI 2000; HERMON, NICCOLUCCI 2002; NICCOLUCCI, HERMON 2003; D'ANDREA 2004). Sono numerosi i settori della tecnologia in cui la logica *fuzzy* viene correntemente impiegata in qualche forma e diverse sono le applicazioni anche in dispositivi di utilizzo quotidiano (elettrodomestici, automobili, fotocopiatori, fotocamere, etc.). L'impiego in altri campi deve però essere sviluppato criticamente e deve esserne verificato il vantaggio rispetto agli altri approcci, sia tradizionali che di nuovo sviluppo.

Il progetto conservativo di un sito archeologico è una vera e propria scelta strategica. Infatti, la valutazione delle possibili tipologie di intervento è sempre caratterizzata dalla complessità e dall'incertezza, derivanti la prima dalla necessità di prendere in considerazione congiuntamente fattori differenti (dalla conservazione dei materiali alla stabilità delle strutture, dall'impatto paesaggistico a quello economico, dalle caratteristiche ambientali alla funzione culturale e sociale) e la seconda dalla difficoltà di prevedere il modo in cui essi evolveranno nel futuro (VIGNOLA 2003; POPPER, LEMPERT, BANKES 2005).

La complessità in questo settore deriva perciò dal fatto che i dati da considerare per il confronto tra le alternative nascono dall'analisi delle informazioni attualmente disponibili (talvolta incomplete e ambigue) che in alcuni casi sono dati quantitativi (per esempio quelli derivanti dai test di laboratorio), mentre più spesso sono esprimibili efficacemente attraverso attributi linguistici, dal fatto che non è possibile costruire un modello matematico che risponda realisticamente al problema, e dalla necessità di considerare la soggettiva (ma non arbitraria e anzi spesso efficace) esperienza dei vari Esperti (archeologi, architetti, conservatori, etc.).

Quando la decisione da prendere comporta notevoli difficoltà, come nel caso di quelle di tipo strategico, può essere opportuno ricorrere ad un sistema di supporto alla decisione (*Decision Support System*, DSS) su base *fuzzy*, il quale utilizza l'informatizzazione e l'elaborazione di tutti i tipi di dati a disposizione per la creazione di una gerarchia tra i progetti in esame (*rating*). Un DSS non ha lo scopo di sostituirsi al Decisore ma di affiancarlo, contribuendo spesso in modo significativo alla qualità della scelta finale (VIGNOLA 2003).

2. ELEMENTI DI MATEMATICA FUZZY

Il fascino e l'interesse operativo della *fuzzy logic* derivano dal fatto che essa è in grado di codificare l'incertezza propria di alcuni dati e di alcuni aspetti del ragionamento umano. Il risultato consiste quindi nell'applicazione della matematica a concetti imprecisi, o meglio "elastici", allo scopo di renderli anche intelligibili e gestibili dai computer (HÁJEK 1998; SANGALLI 2000; COX 2005).

Dato un insieme universale U , un suo sottoinsieme \tilde{A} è *fuzzy* se gli elementi $x \in U$ che lo compongono gli appartengono in un certo "grado", $\mu(x)$, esprimibile con un numero compreso in $[0, 1]$; se l'appartenenza è completa sarà $\mu(x) = 1$, se è nulla sarà $\mu(x) = 0$, ma in generale sarà $0 < \mu(x) < 1$ (ZADEH 1965; 1975).

Ne consegue perciò che ciascun elemento x potrà appartenere a diversi (anche escludentisi come definizione) insiemi *fuzzy*, con un grado di appartenenza generalmente diverso per ognuno degli insiemi in analisi (ad esempio potrà appartenere, con grado differente, sia all'insieme "moderato" che a quello "elevato", a quello "ragazzo" ed a quello "adulto", etc.).

Il grado di appartenenza viene valutato soggettivamente (ma non casualmente o arbitrariamente) in base alle personali conoscenze, alle esperienze, ai dati di laboratorio e di letteratura a disposizione, alle conoscenze teoriche dei fenomeni chimico-fisici, etc. Esso esprime quindi un giudizio, fondato su un complesso di dati, ma esprime anche in modo esplicito il grado di incertezza e ambiguità che si attribuisce all'appartenenza.

Con il termine "numero *fuzzy*" si intende un numero caratterizzato da una certa funzione di appartenenza (distribuzione di possibilità). Esso è quindi un particolare sotto-insieme *fuzzy* dell'insieme dei numeri reali, o dell'insieme

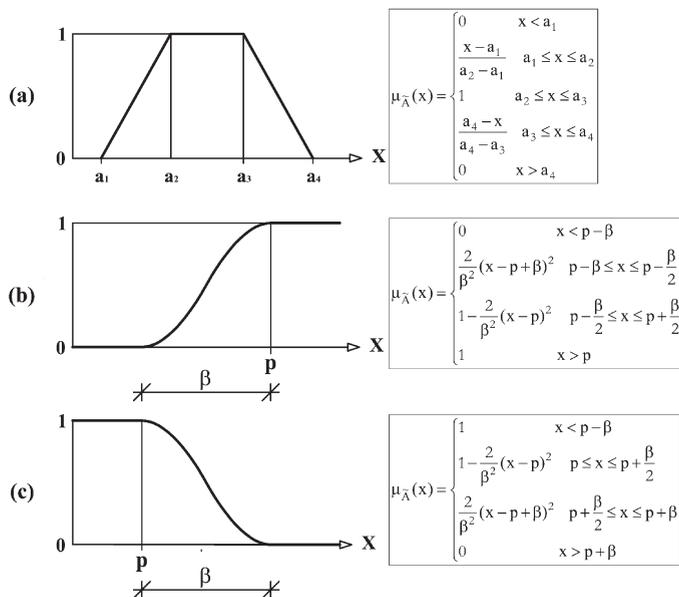


Fig. 1 – Illustrazione delle funzioni di appartenenza (*membership functions*) di numero *fuzzy*. a) numero *fuzzy* trapezoidale; b) numero *fuzzy* “s”; c) numero *fuzzy* “z”.

dei numeri interi, etc. Un numero *fuzzy* può essere per esempio definito con un’espressione linguistica del tipo «molto più grande di 1» oppure «approssimativamente 4»; in quest’ultimo caso è intuitivamente chiaro che si intende un insieme *fuzzy* \tilde{A} con una funzione di appartenenza che può avere un massimo pari a 1 per $x = 4$, ma prevede che anche i numeri prossimi a 4 abbiano un certo grado di aderenza (appartenenza) alla definizione (KANDEL 1986; COX 2005).

Esistono diversi tipi di numeri *fuzzy*, a seconda della funzione che ne definisce il grado di appartenenza; si hanno perciò i numeri *fuzzy* triangolari, trapezoidali, “s”, “z”, “s-z”, “z-s”, etc. La Fig. 1 mostra alcune delle rappresentazioni di numero *fuzzy* più comunemente utilizzate.

Un numero *fuzzy* trapezoidale è rappresentato da una quaterna (a_1, a_2, a_3, a_4) ; un numero *fuzzy* triangolare è un caso particolare in cui risulta $a_2 \equiv a_3$ (IRION 1998).

La larghezza del numero *fuzzy* è detta *expectancy*; essa è misurata dal centro del numero *fuzzy* e costituisce una misura dell’“elasticità” del numero.

Può essere comodo che la funzione di appartenenza sia costituita da tratti lineari come nel caso dei numeri *fuzzy* triangolari e trapezoidali; in altre situazioni tuttavia i numeri “z” o “s” si mostrano più efficaci per rappresentare concetti o voti fortemente non lineari.

Non necessariamente la funzione di appartenenza di un numero *fuzzy* è simmetrica; l'eventuale asimmetria rende conto dell'esistenza di limiti fisici su un estremo, o comunque esprime l'apprezzamento di una differente confidenza o possibilità sui due estremi.

Tra i numeri *fuzzy* possono condursi alcune operazioni aritmetiche. Supponiamo di considerare due numeri *fuzzy* \tilde{A} e \tilde{B} (tali che siano > 0) e indichiamo con $*$ una generica operazione aritmetica. In base al cosiddetto "principio di estensione" (ZADEH 1965), la funzione di appartenenza di $\tilde{A} * \tilde{B}$ può essere espressa come:

$$\mu_{\tilde{A} * \tilde{B}}(w) = \vee_{x,y} (\mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(y)), w = x * y \mid x, y, w \in (-\infty, \infty)$$

in cui $\vee_{x,y}$ indica l'estremo superiore e \wedge il minimo (KANDEL 1986).

L'addizione, la sottrazione, la moltiplicazione e la media tra due numeri *fuzzy* trapezoidali, delle quali si farà uso successivamente, sono quindi definite dalle relazioni (IRION 1998):

$$\tilde{A}(+) \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3, a_4)(+)(b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3, a_4 + b_4)$$

$$\tilde{A}(-) \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3, a_4)(-)(b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 - b_4, a_2 - b_3, a_3 - b_2, a_4 - b_1)$$

$$\tilde{A}(\cdot) \tilde{B} = (a_1, a_2, a_3, a_4)(\cdot)(b_1, b_2, b_3, b_4) = (a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3, a_4 b_4)$$

$$\text{Media di } n \tilde{A}_i = \left(\frac{1}{n} \sum a_{1i}, \frac{1}{n} \sum a_{2i}, \frac{1}{n} \sum a_{3i}, \frac{1}{n} \sum a_{4i} \right).$$

Analogamente, le operazioni sui numeri *fuzzy* "s" o "z" si effettuano utilizzando i parametri p e β (KANDEL 1986).

3. IMPIEGO DEI NUMERI FUZZY COME VOTI PER TERMINI E FATTORI

Per quanto concerne la conservazione di un sito archeologico allo stato di rudere, si pongono generalmente differenti possibilità di intervento, che si traducono in altrettanti progetti ed il Decisore è chiamato a stabilire una gerarchia tra essi, valutando i differenti contributi per ciascuna delle soluzioni prospettate. In altri casi il problema del Decisore potrebbe essere quello di stabilire un criterio mediante il quale distribuire al meglio le risorse disponibili tra i vari siti archeologici di un territorio, oppure verificare l'impatto di un moderno utilizzo sulla conservazione.

Queste operazioni sono ordinariamente condotte da archeologi e architetti, particolarmente da quelli addetti alla gestione conservativa del patrimonio pubblico, dopo avere acquisito (nella misura in cui le risorse disponibili lo consentono) dati ed elementi specifici, riguardo ad esempio alle caratteristiche

di durevolezza dei materiali, di stabilità delle strutture, degli effetti dell'inquinamento, dell'azione biologica, etc. Talvolta, però, non è chiaro all'opinione pubblica, alle comunità locali direttamente coinvolte ed agli studiosi quali siano i fattori considerati e che peso è stato ad essi attribuito dal Decisore.

In questa nota si propone che le scelte decisionali vengano inquadrate in una procedura formale che consideri in maniera esplicita tutti i termini della complessa materia; ciò consentirebbe probabilmente di migliorare la qualità del processo decisionale, garantirne la maggiore trasparenza, facilitarne il controllo pubblico, fornire il contesto per il continuo aggiornamento dei dati e quindi per le future correzioni ed integrazioni.

I fattori da considerare per selezionare la "migliore" soluzione conservativa sono numerosi: *materiali e strutture* (caratteristiche dei materiali in opera, della loro relazione con l'ambiente, degli aspetti statico-strutturali, etc.), *paesaggio* (valore attribuito, entità e reversibilità della modifica, etc.), *sviluppo culturale* (valore attribuito al sito dalla comunità in relazione alla sua peculiarità ed unicità, possibilità di ampliamento dello studio, etc.), *economia* (costo della modifica, di mantenimento e di esercizio del sito, ritorno economico, etc.).

Data la diversa natura dei fattori e dei termini loro costituenti è pressoché impossibile giungere ad una valutazione quantitativa senza avere prima adottato una comune "unità di misura". Il metodo che sarà qui utilizzato è quello dei voti, o punteggi. Si può stabilire che ad ogni termine di ogni fattore sia assegnato un voto sotto forma di numero, compreso in un certo intervallo. In un recente lavoro (ATZENI, SANNA, SPANU c.s.) si sono adottati come voti $\{1, 2, 3, 4, 5\}$, attribuendo i valori alti a situazioni con connotazione positiva e quelli bassi a condizioni assunte come negative (o meno favorevoli); al voto/punteggio 3, intermedio, è quindi associata una condizione di neutralità, e pertanto nei casi in cui si intende "costringere" il valutatore/Esperto ad un voto sempre "decisivo" può essere opportuno utilizzare come campo di valutazione quello più ristretto $\{1, 2, 3, 4\}$.

Nel caso citato il voto è stato rigidamente definito; in questo lavoro, invece, i voti verranno interpretati come numeri *fuzzy*, cioè si assumerà che ogni voto espresso dal valutatore/Esperto non sia rigido ma possieda dei confini sfumati che possano esprimere le sottigliezze di un giudizio che la complessità dei termini non consente di valutare in modo assoluto e incondizionato. È questa una scelta che può definirsi prudente e ragionevole e che può significativamente migliorare la qualità del processo decisionale nella sua globalità.

Si utilizzeranno come voti i numeri *fuzzy* trapezoidali (triangolari come caso limite) nell'insieme $\{1, 2, \dots, 10\}$ (VIGNOLA 2003). In pratica il valutatore/Esperto assegna un voto, ad esempio 6 con $\mu_{(6)} = 1$ ad uno dei termini che gli sono sottoposti, ma in riconoscimento del carattere sfumato delle conoscenze, deve anche valutare un contributo per i voti adiacenti, ad esempio 7 potrebbe ancora avere $\mu_{(7)} = 1$ mentre 5 e 8 potrebbero avere $\mu_{(5 \text{ e } 8)} = 0.5$,

e tutti gli altri $\mu_{(1, 2, 3, 4, 9 \text{ e } 10)} = 0$. Ogni fase della procedura può essere resa *fuzzy* (in ATZENI, SANNA, SPANU c.s. è mostrato come trattare *fuzzy* un termine del fattore *durevolezza dei materiali*).

La valutazione che eventualmente più Esperti possono dare dello stesso termine, ciascuno come voto e grado di appartenenza del voto, può quindi essere calcolata con la formula di media vista precedentemente, ad esempio attivando una procedura ciclica di progressivi aggiustamenti/compromessi tra le n stime, nota in letteratura come *fuzzy Delphi* (KAUFMANN 1988; ANDERSON, SWEENEY, WILLIAMS 1998). Tale procedura consiste essenzialmente in 3 fasi:

1. Ognuno degli n Esperti, in maniera indipendente, fornisce il suo giudizio per ciascuno dei termini in valutazione, sotto forma di numero *fuzzy*; alla fine di tale step si avranno n numeri *fuzzy* $\hat{A}_1, \hat{A}_2, \dots, \hat{A}_n$;
2. Si calcola il valore medio e la differenza del voto assegnato rispetto alla media per ciascuno dei termini considerati. Tali risultati vengono poi rinviati agli Esperti per un riesame;
3. Ogni Esperto presenta quindi una nuova valutazione in base alle informazioni avute; si ripete la fase 2 fino a che le medie calcolate sono “sufficientemente vicine” tra loro (eventualmente il Decisore può definire una distanza d tra i numeri *fuzzy* tale che il ciclo si interrompa, ad esempio per $d \leq 0.2$).

Avendo a disposizione tutti i voti con i rispettivi gradi di appartenenza è necessario quindi effettuare la loro aggregazione per ottenere voto e grado di appartenenza del fattore, per ognuno dei progetti in valutazione. L'operazione può essere quella di somma ed eventualmente ogni fattore può essere “pesato” moltiplicandolo per un numero *fuzzy* compreso tra 0 e 1, qualora il Decisore intendesse affermare che i fattori non debbano “pesare” in eguale misura; ad esempio il fattore *materiali e strutture* potrebbe essere quello assunto *a priori* come predominante sull'intera procedura. Viene quindi stabilita una gerarchia tra i progetti in esame e la scelta del Decisore dovrebbe ricadere su quello caratterizzato dal valore più alto della somma dei voti.

Una volta effettuata la selezione, e realizzato l'intervento, si può procedere, dopo un adeguato lasso di tempo e sulla base dell'esperienza acquisita, al riesame del *rating*, realizzando un bilancio della procedura adottata, aggiornandola e affinandola ulteriormente.

4. ESEMPIO DI APPLICAZIONE: IL CASO DELLE “TERME A MARE” DI NORA (SARDEGNA)

L'edificio termale ora noto con la dizione “a mare” nel sito archeologico di Nora (Tav. II, b) nella Sardegna meridionale è stato realizzato nel II secolo d.C. Il crollo delle volte, avvenuto in concomitanza di un incendio, è datato tra il VII e l'VIII secolo. Successivamente il rudere venne depredata dei materiali riutilizzabili (marmi, mattoni, etc.) e risultò progressivamente

sempre più esposto all'azione diretta, fisica e chimica, del mare sul lato ovest, a seguito della subsidenza dell'area.

Il sito è interessato da indagini archeologiche sistematiche da circa cinquanta anni (PESCE 1972; TRONCHETTI 1986). Circa trenta anni fa, completato lo scavo dell'edificio, venne realizzato un rudimentale frangiflutti utilizzando parte degli stessi blocchi di crollo e venne applicata una "verniciatura" a fini protettivi delle strutture, con materiali dei quali non è stata possibile definire la natura sulla base della documentazione esistente. Dodici anni fa venne condotta una caratterizzazione dei materiali in opera (*opus testaceum*, *opus caementicium*, massetti in cocciopesto, residui di intonaci a calce o a gesso) ed una valutazione complessiva dello stato di conservazione e della cinetica del degrado (per confronto tra fotografie prese nel corso degli anni) (ATZENI *et al.* 1996; ATZENI, MASSIDA, SANNA 1997). Per quanto riguarda la stima degli interventi conservativi del passato si constatava che della "verniciatura" non restavano che rari brandelli polimerici, mentre il frangiflutti manteneva la sua efficacia per impedire che le onde continuassero la demolizione del rudere.

Supponiamo, utilizzando come banca dati il complesso delle acquisizioni disponibili sul rudere e sul suo ambiente, di sottoporre a valutazione cinque progetti conservativi che prevedano: controllo della frequentazione antropica e della vegetazione e interventi di anastilosi con impiego di leganti a base di calci (A), costituzione di una moderna barriera frangiflutti a tetrapodi (B), realizzazione di barriere verticali vegetali in funzione antiaerosol (C), realizzazione di un sistema di tettoie trasparenti a copertura delle parti sommitali delle strutture (D), reinterro progettato, compresa una protezione "a mare" (E) (AMENDOLEA 1995; RANELLUCCI 1996; MELUCCO VACCARO 2000).

Procediamo quindi, a titolo esemplificativo, all'espressione dei termini e dei fattori tramite voti *fuzzy*. Il fattore *materiali e strutture* deriva dal concorso dei termini *dilavamento per azione delle acque meteoriche*, *crystallizzazione di sali di origine marina* (Fig. 2), *crescita di vegetazione infestante*, *azione meccanica delle onde e frequentazione turistica*, ciascuno espresso come voto/numero *fuzzy*. Andrà quindi valutata la somma di questi termini per ciascuno dei progetti. La Tab. 1 e la Fig. 3 riportano i dati e le elaborazioni relativi al fattore *materiali e strutture*.

PROGETTO	Dilavamento	Cristallizzazione salina	Vegetazione	Usura antropica	Azione onde	SOMMA
A	1, 2, 2, 3	1, 2, 3, 4	6, 7, 8, 9	7, 8, 8, 10	1, 2, 3, 4	16, 21, 24, 30
B	2, 3, 3, 4	1, 2, 3, 4	2, 3, 4, 5	1, 2, 3, 4	8, 9, 9, 10	14, 19, 22, 27
C	2, 3, 3, 4	4, 5, 5, 6	2, 3, 4, 5	2, 3, 4, 5	2, 3, 3, 5	12, 17, 19, 25
D	7, 8, 9, 10	3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4	6, 7, 7, 8	2, 3, 4, 4	19, 24, 28, 32
E	8, 9, 9, 10	8, 9, 9, 10	8, 9, 9, 10	8, 9, 9, 10	7, 8, 9, 10	39, 44, 45, 50

Tab. 1 – Voti *fuzzy* per i vari termini del fattore *materiali e strutture*.



Fig. 2 – Manifestazione dei termini “dilavamento” e “salinità” sui materiali in opera (a sinistra *opus caementicium*, a destra *opus testaceum*).

Dal (solo) punto di vista del fattore *materiali e strutture* il progetto E (reinterro progettato) risulterebbe quindi la soluzione nettamente migliore.

Prendiamo ora in considerazione anche gli altri fattori: *paesaggio, sviluppo culturale, economia*. Il valore paesaggistico del sito è certamente notevolissimo trattandosi di un ampio centro urbano inserito in un contesto di lagune, spiagge, entroterra boscoso (Tavv. II, b e III, a). Termini per la valutazione dei progetti sono quindi l’incidenza dei loro impianti, la stagionalità e la reversibilità delle modificazioni apportate, etc.

Il fattore definito *sviluppo culturale* prevede termini concernenti l’impatto dei progetti in valutazione riguardo alla accessibilità del rudere e delle aree contigue per l’avanzamento delle ricerche e la salvaguardia del contenuto documentale del sottosuolo (la città è fortemente stratificata, e prima di essere Romana è stata un centro nuragico, fenicio e punico), la compatibilità dei nuovi materiali e delle nuove strutture con le manifestazioni originarie della cultura materiale e con l’immagine affermata del sito, etc.

Il fattore *economia* considera termini quali i costi di studio e di progettazione, di realizzazione e di gestione, il ritorno economico conseguente alla nuova sistemazione (Nora è uno dei siti archeologici maggiormente noti e frequentati della Sardegna, sede di manifestazioni culturali estive e parte del comprensorio turistico della parte occidentale del golfo di Cagliari), etc.

Ciascuno dei termini considerati andrà valutato secondo le procedure ordinarie e/o innovative proprie di ciascun settore disciplinare ed infine il risultato andrà tradotto in termini di voto *fuzzy*. Naturalmente, considerato che per la valutazione di ciascun termine e fattore ci si confronta sempre con situazioni caratterizzate da complessità ed aleatorietà è certamente possibile un approccio interamente *fuzzy* (tramite *Fuzzy Cognitive Maps FCM* o il *Fuzzy Approximation Theorem FAT*, KOSKO 1994).



Fig. 3 – Il rudere nel suo contesto paesaggistico.

La Tab. 2 riporta i valori assunti dai fattori in questo esempio, mentre la Fig. 4 illustra graficamente la loro somma per i diversi progetti (a parità di “peso” dei fattori), o *rating*.

PROGETTO	Materiali e strutture	Paesaggio	Sviluppo culturale	Economia	SOMMA
A	16, 21, 24, 30	38, 43, 47, 49	39, 42, 46, 50	36, 40, 43, 47	129, 146, 160, 176
B	14, 19, 22, 27	27, 32, 35, 40	42, 46, 48, 50	28, 33, 37, 42	111, 130, 142, 159
C	12, 17, 19, 25	40, 45, 45, 48	30, 35, 39, 43	31, 36, 39, 45	113, 133, 142, 161
D	19, 24, 28, 32	25, 30, 35, 38	35, 41, 45, 48	25, 31, 34, 40	104, 126, 142, 158
E	39, 44, 45, 50	21, 26, 30, 32	41, 45, 48, 50	20, 25, 28, 33	121, 140, 151, 165

Tab. 2 – Esempio di voti *fuzzy* per tutti i fattori e i progetti in analisi.

Il progetto conservativo A è da considerarsi il “migliore” tra quelli in analisi, ma anche E è assumibile come una valida opzione.

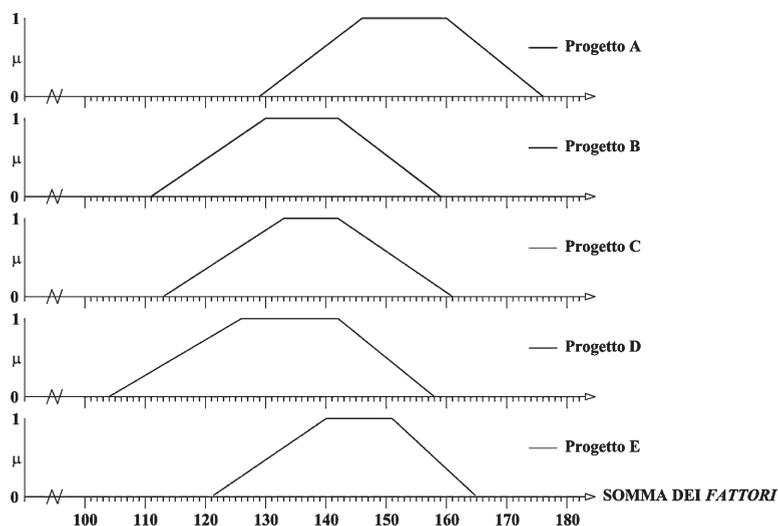


Fig. 4 – Rappresentazione grafica della gerarchia (*rating*) tra diversi progetti.

5. CONCLUSIONI

La qualità, la trasparenza, la pubblica intelligibilità delle scelte conservative sui siti archeologici guadagnerebbero moltissimo dall'adozione di una procedura decisionale formalmente definita.

La scelta tra i differenti progetti conservativi ha un carattere di tipo strategico. I fattori da considerare, in maniera globale/integrata/olistica, sono di diversa natura, talvolta definibili solo in termini imprecisi tramite espressioni linguistiche, talaltra, anche se derivanti da considerazioni chimico-fisiche o da esperimenti di laboratorio, sono così complessi che dopo decenni di studi non ne esiste ancora una realistica modellazione matematica "ordinaria".

La *fuzzy logic* è, potenzialmente, capace di codificare e informatizzare espressioni linguistiche caratterizzate da vaghezza e incertezza, dati quantitativi, elementi di conoscenza parziale e persino la soggettività derivante dall'esperienza dei singoli Esperti. Questa caratteristica si presta generalmente bene per l'applicazione nell'ambito delle decisioni strategiche come quelle concernenti la selezione del "miglior" progetto di conservazione o di valorizzazione di un sito archeologico.

CIRILLO ATZENI, ULRICO SANNA, NANNINA SPANU
Dipartimento di Ingegneria Chimica e Materiali
Università degli Studi di Cagliari

BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON D.R., SWEENEY D.J., WILLIAMS T.A. 1998, *Quantitative Methods for Business*, 7th ed., Ohio, International Thomson Publishing.
- AMENDOLEA B. (ed.) 1995, *I siti archeologici. Un problema di musealizzazione all'aperto*, Roma, Gruppo Editoriale Internazionale.
- ATZENI C., SANNA U., SPANU N. c.s., *A standardized framework for conservative management of archaeological sites*, «Conservation and Management of Archaeological Sites» (in corso di stampa).
- ATZENI C., MASSIDDA L., SANNA U., TRONCHETTI C. 1996, *Problemi di conservazione del rudere di un edificio termale romano-imperiale di Nora (Sardegna)*, in *Atti del Convegno Dal sito archeologico alla archeologia del costruito. Conoscenza, progetto e conservazione, (Bressanone 1996)*, Padova, Arcadia Ricerche, 165-175.
- ATZENI C., MASSIDDA L., SANNA U. 1997, *Roman bricks in a marine environment*, «Materials and Structures», 30, 196, 120-125.
- BAXTER M.J., BUCK C.E. 2000, *Data handling and statistical analysis*, in CILIBERTO, SPOTO 2000, 681-746.
- BIETTI SESTIERI A.M. 2000, *Classificazione e tipologia*, in R. FRANCOVICH, D. MANACORDA (eds.), *Dizionario di Archeologia. Temi, Concetti e Metodi*, Bari, Laterza, 61-65.
- CILIBERTO E., SPOTO G. (eds.) 2000, *Modern Analytical Methods in Art and Archaeology*, New York, Wiley.
- COX E. 2005, *Fuzzy Modeling and Genetic Algorithms for Data Mining and Exploration*, Amsterdam, Elsevier.
- D'ANDREA A. 2004, *L'entropia dell'archeologia computazionale ovvero dall'ordine al disordine*, in P. MOSCATI (ed.), *Nuove frontiere della ricerca archeologica. Linguaggi, comunicazione, informatica*/New Frontiers of Archaeological Research. Languages, Communication, Information Technology, «Archeologia e Calcolatori», 15, 219-238.
- DJINDJIAN F., MOSCATI P. (eds.) 2002, *Data Management and Mathematical Methods in Archaeology. Proceedings of Commission IV Symposia, XIV Congress of the International Union of Prehistoric and Protohistoric Sciences (Liège 2001)*, «Archeologia e Calcolatori», 13.
- HÁJEK P. 1998, *Methamathematics of Fuzzy Logic*, Dordrecht, Kluwer Academic Publisher.
- HERMON S., NICCOLUCCI F. 2002, *Estimating subjectivity of typologists and typological classification with fuzzy logic*, in DJINDJIAN, MOSCATI 2002, 217-232.
- IRION A. 1998, *Fuzzy rules and fuzzy functions: A combination of logic and arithmetic operations for fuzzy numbers*, «Fuzzy Sets and Systems», 99, 49-56.
- KANDEL A. 1986, *Fuzzy Mathematical Techniques with Applications*, Reading, Addison-Wesley.
- KOSKO B. 1994, *Fuzzy Thinking*, London, Flamingo.
- KAUFMANN A., GUPTA M.M. 1988, *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*, Amsterdam, Elsevier.
- MELUCCO VACCARO A. 2000, *Archeologia e restauro*, Roma, Viella.
- NICCOLUCCI F., HERMON S. 2003, *La logica fuzzy e le sue applicazioni alla ricerca archeologica*, «Archeologia e Calcolatori», 14, 97-110.
- PESCE G. 1972, *Nora. Guida agli scavi*, Cagliari, Fossataro Editore.
- POPPER S.W., LEMPERT R.J., BANKES S.C. 2005, *La forma del futuro*, «Le Scienze», 442, 50-56.
- RANELLUCCI S. 1996, *Strutture protettive e conservazione dei siti archeologici*, Pescara, Carsa Edizioni.
- SANGALLI A. 2000, *L'importanza di essere fuzzy. Matematica e computer*, Torino, Bollati Boringhieri.
- TERRENATO N. 2000, *Quantitativa (archeologia)*, in R. FRANCOVICH, D. MANACORDA (eds.), *Dizionario di Archeologia. Temi, Concetti e Metodi*, Bari, Laterza, 237-240.

TRONCHETTI C. 1986, *Nora*, Sassari, Carlo Delfino Editore.

VIGNOLA M. 2003, *Il processo decisionale manageriale. Un'applicazione del sistema esperto fuzzy*, Milano, FrancoAngeli, 74-158.

ZADEH L.A. 1965, *Fuzzy sets*, «Information and Control», 8, 338-353.

ZADEH L.A. 1975, *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I, II, III*, «Information Science», 8, 199-245, 301-357; 9, 43-80.

ABSTRACT

The Authors deal with the problem of a standardised but clear and easily understood framework for the strategic decisions involved in the selection among the diverse projects for the conservation and cultural and economic enhancement of archaeological sites. The aim of the paper is to explore the possibility of the use of fuzzy logic to create a hierarchy among the different projects. We propose the use of fuzzy numbers mathematics for the joint treatment of technical, landscape impact, economic and humanistic aspects in selecting the best conservation projects. The basic elements for the definition and the arithmetic of fuzzy numbers are given and a procedure based on the ordering is implemented. Finally, an application relating to an archaeological site on the Mediterranean Sea (Nora, Sardinia) is presented.