

G. Massei, L. Rocchi,
L. Paolotti, A. Boggia

*Dipartimento di Scienze Economico-
Estimative e degli Alimenti – Univer-
sità degli studi di Perugia*

E-mail: lucia.rocchi@unipg.it

*Keywords: MCDA, Decision
Support Systems, GIS, spatial decision
systems.*

*Parole chiave: MCDA, Sistemi di
supporto alle decisioni, GIS, analisi
multicriteriali spaziali*

Sviluppo di moduli multicriteri per la valutazione ambientale in GRASS GIS

Dealing with spatial decision problems means very often to face a GIS and a multi-criteria decision analysis based problem at the same time. GIS and Multi-criteria Decision Analysis are two well defined research areas, but both can benefit one from each other. In the last twenty years several researches have paid attention to MCDA-GIS integration and to the development of Spatial Decision Support Systems (SDSS), but few papers presented examples of perfect integration. Also in case of perfect integration, they often integrate within GIS only one multicriteria model. Our application is a better contribution in this way. We developed four GRASS modules that permit to implement four different MCDA methods: the Regime, the FUZZY, the ELECTRE and the Dominance-based Rough Set Approach. One of the main advantages of our application over the previous ones is the possibility of a future development in an open- source context. The paper presents an application of the Regime, Electre and Fuzzy modules.

1. Introduzione

Affrontare problemi decisionali di tipo spaziale può implicare l'applicazione contemporanea di un approccio di analisi multicriteri (*Multi Criteria Decision Analysis - MCDA*) ed uno di analisi territoriale tramite sistemi informativi geografici (*Geographical Information Systems - GIS*) (Malczewski, 2006). Benché l'analisi multicriteri e lo sviluppo degli strumenti GIS rappresentino due distinte aree di ricerca, esse possono entrambe trarre beneficio da un loro utilizzo congiunto (Malczewski, 2006; Rahman *et al.*, 2012), e la loro integrazione reale e funzionale rappresenta oggi una frontiera della ricerca (Chakhar e Martel, 2003; Malczewski, 2006).

Normalmente la MCDA assume che vi sia un'omogeneità spaziale delle alternative considerate all'interno di ciascun caso studio. Tale assunzione, però, è molto spesso non realistica perché in caso di applicazioni territoriali i criteri utilizzati per la valutazione variano nello spazio (Malczewski, 1999; Laskar, 2003). Nel caso in cui le alternative abbiano anche una dimensione geografica, quindi, la loro classificazione, ordinamento o scelta dipende anche da tale caratterizzazione spaziale (Malczewski, 1999). D'altra parte, i GIS sono strumenti dedicati alla gestione dei dati (acquisizione, immagazzinamento, manipolazione e analisi) (Malczewski, 1999), ma mostrano significativi limiti nelle analisi che implicano anche giudizi di valore (Malczewski, 1999; Eldrandaly *et al.*, 2005). Per questo negli ultimi venti anni numerosi studiosi si sono occupati dello sviluppo di sistemi di supporto alle decisioni di tipo spaziale (*Spatial Decision Support System - SDSS*) o comunque di

forme di integrazione quanto più funzionale e completa tra modelli MCDA e strumenti GIS (Chakhar e Martel, 2003; Densham, 1991; Jankowski, 1995; Laaribi *et al.*, 1996; Laskar, 2003; Malczewski, 1999, 2006; Rahman *et al.*, 2012; Riccioli, 2009), e recentemente anche con i webGIS (Boroushaki e Malczewski, 2010a, 2010b; Karnatak *et al.*, 2007).

In un'analisi multicriteriale di tipo spaziale per definire un'alternativa sono necessari sia un giudizio di valore che un dato spaziale (Malczewski, 1999). Per questo per effettuare una valutazione occorre disporre sia del quadro metodologico della MCDA che delle possibilità offerte dai GIS. La sfida è nelle modalità di aggregazione dei due strumenti.

L'obiettivo di questo studio è la presentazione di un pacchetto composto da quattro moduli (*r.mcda.electre*, *r.mcda.fuzzy*, *r.mcda.regime* e *r.mcda.roughset*) sviluppati all'interno del software *open source* GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*) e basati su quattro diversi metodi MCDA (*Regime*, *Electre*, *Fuzzy* e *Dominance Based Rough Set Approach - DRSA*). In particolare, nel presente studio verrà mostrata un'applicazione dei moduli *r.mcda.fuzzy*, *r.mcda.electre* e *r.mcda.regime* ad un problema di carattere ambientale per valutare le potenzialità di una vera analisi multicriteri spaziale.

L'articolo è organizzato come segue. La sezione 2 descrive brevemente il software GRASS GIS, l'approccio multicriteri, l'integrazione sviluppata ed i quattro moduli basati su tale integrazione, con brevi accenni ai metodi in modo da comprendere poi meglio l'applicazione. Nella sezione 3 viene riportata la descrizione del caso studio, seguita dai risultati (sezione 4) e dalla discussione (sezione 5). Il lavoro termina con le principali conclusioni.

2. Metodo: integrazione MCDA-GIS

Lo sviluppo dei moduli del pacchetto MCDA in ambiente GIS è stato realizzato all'interno del programma GRASS 6.4 svn, un *software open source* rilasciato sotto licenza GNU-GPL. GRASS GIS è un avanzato software geografico, tra i più utilizzati e diffusi per il *data management*, l'analisi e l'*image processing*, la produzione di mappe, la visualizzazione e la creazione di modelli spaziali (<http://grass.osgeo.org>). GRASS GIS supporta sia dati *raster* che *vector*, in due e tre dimensioni (Neteler e Mitasova, 2008).

Fin dal suo primo rilascio avvenuto nel 1982 (Frigeri *et al.*, 2011), GRASS GIS è stato sempre più utilizzato in tutto il mondo sia in ambito accademico che commerciale, così come da parte di agenzie governative e compagnie di consulenza ambientale, per le sue enormi possibilità applicative (Estalrich e Trill, 1998; Li *et al.*, 2010; Neteler e Mitasova, 2008). Può essere perciò considerato un *software* in crescente affermazione (Jasiewicz e Metz, 2011). Inoltre, grazie al linguaggio in cui è programmato e, soprattutto, alla licenza con cui il *software* e le sue librerie sono distribuiti è possibile sviluppare nuovi moduli o migliorare gli esistenti (Neteler e Mitasova, 2008; Frigeri *et al.*, 2011). I moduli da noi sviluppati in GRASS GIS integrano modelli di analisi multicriteriali.

I metodi classificabili come multicriteri sono fondamentali nelle valutazioni di carattere ambientale, ma non sono in grado di gestire facilmente la dimensione spaziale. Esistono molte definizioni di valutazione multicriteri. Utilizzando le parole di Bernard Roy (1996), l'analisi multicriteri può essere definita come "un aiuto nelle decisioni e uno strumento matematico che permette la comparazione di differenti alternative o scenari rispetto a numerosi criteri, spesso contraddittori, in modo da poter guidare il decisore (i decisori) verso scelte giudiziose". Un tipico problema multicriteriale si compone di un set di m alternative che deve essere valutato attraverso un vettore di n criteri, spesso in conflitto tra loro. Il Decisore (*Decision Maker* - DM) ha delle preferenze che possono essere rappresentate da un vettore di pesi non negativi $w=[w_1, w_2, \dots, w_n]$ tali che la somma sia normalizzata a 1. La risoluzione del problema comporta l'attuazione di una scelta, una classificazione o un ranking delle alternative. Le modalità con cui viene fatto ciò dipendono dal metodo applicato: all'interno della MCDA, infatti, convivono diversi metodi con caratteristiche computazionali molto varie (Figueira *et al.*, 2005) che si concretizzano poi in modalità di aggregazione differenti (Chakhar e Martel, 2003).

Per poter avere una vera integrazione MCDA-GIS è necessario che, oltre a combinare giudizi di valore con dati geografici, si proceda alla trasformazione ed elaborazione dei dati (Malczewski, 2006). Secondo alcuni autori (Chakhar e Martel, 2003; Laskar, 2003), l'integrazione MCDA-GIS può essere classificata secondo un sistema di tre livelli. Lo *step* di base prende il nome di integrazione indiretta: i due strumenti sono completamente separati, sia dal punto di vista del database utilizzato che dell'interfaccia. Per essere connessi i due sistemi devono utilizzare uno strumento intermedio. Il secondo livello consiste nei cosiddetti *Built-in* MCDA-GIS: i modelli multicriteriali sono inseriti come componenti integrate nel sistema geografico, pur rimanendo indipendenti sia dal punto di vista logico che funzionale. Pur utilizzando, infatti, l'interfaccia del software geografico, la parte multicriteriale utilizza un database separato. Solo attraverso l'integrazione completa dei due sistemi (Malczewski, 2006), che utilizzi la stessa interfaccia e lo stesso database, si raggiunge una vera efficienza applicativa. In questo caso, infatti, il modello o i modelli MCDA sono attivati all'interno del *software* GIS come fossero una delle sue tante funzioni. Tuttavia, anche nel caso di questo terzo livello di integrazione l'applicazione rimane rigida (Jankowski, 1995; Laarbi *et al.*, 1996) soprattutto perché spesso viene integrato un solo modello alla volta (Chakhar e Martel, 2003). La presenza di un solo modello di valutazione può limitare il potere applicativo di questi strumenti, perché problemi applicativi diversi richiedono soluzioni analitiche differenziate. La presenza di più metodologie permette di scegliere la più pertinente alla questione di ricerca.

L'applicazione da noi presentata è un esempio flessibile di integrazione completa. Non solo non viene sviluppato un unico metodo, ma essendo i metodi creati come moduli di GRASS-GIS presentano un'interfaccia *user friendly* per gli utenti del programma, che sono numerosi in tutto il mondo. Inoltre la loro costruzione, basata su diversi algoritmi in un pacchetto modulare unico, permette di aggiungere di nuovi senza il bisogno di modificare il codice originario. Da non sottovalutare che essendo moduli sviluppati in un programma *open source* è favorito

lo sviluppo di nuove funzionalità all'interno della *community*, aumentando così la flessibilità e l'adattabilità dello strumento.

I quattro metodi implementati nel sistema geografico sono: il metodo *Regime* (Hinloopen *et al.*, 1983; Nijkamp e Hinloopen, 1990), l'approccio *Fuzzy* (Yager, 1977, 1988, 1993), il metodo *Electre* (Roy, 1991; Vincke, 1992) e il *Dominance-based Rough Set Approach* (DRSA - Greco *et al.*, 2001a). La sintassi di ogni modulo segue quella tipica di GRASS GIS ed è la seguente:

r.mcda.[algorithm]¹.

Di seguito verrà data una breve descrizione dei quattro moduli in modo separato. Oltre a questi viene presentato anche un modulo basato sulla teoria classica dei *rough sets* (*Classical Rough Sets Theory* - CRST), che non è un vero metodo multicriteri ma che viene descritto come strumento di *discovery knowledge*, vista anche la grande importanza della CRST in ambito geografico (Beaubouef *et al.*, 2007; Gorsevski e Jankowski, 2008; Uddameri e Honnungar, 2006; Zoppi e Lai, 2006).

2.1 Integrazione MCDA- GIS: i quattro moduli

2.1.1 r.mcda.regime

Questo primo modulo rappresenta l'implementazione del metodo *Regime* in ambiente GRASS GIS. Non risulta al momento alcuna altra applicazione che permetta di realizzare valutazioni multicriteri spaziali usando il *Regime*, seppure si ritiene che possa essere molto utile in ambito geografico. Il *Regime*, infatti, è un metodo MCDA discreto (Hinloopen *et al.*, 1983; Nijkamp e Hinloopen, 1990), in grado di gestire dati di tipo misto (binari, ordinari, cardinali e categorici). Può essere considerato un metodo qualitativo in quanto le informazioni sulle preferenze del DM, che poi rappresentano i pesi, hanno solo una definizione ordinale (qualitativa), mentre i criteri possono essere definiti anche in forma quantitativa (Hinloopen *et al.*, 1983; Janssen *et al.*, 1990). Dal punto di vista metodologico il metodo si basa sulla generalizzazione dell'analisi di concordanza, a sua volta generalizzazione del confronto a coppie. Operativamente occorre definire due oggetti: la matrice di impatto e il vettore dei pesi, che deriva dalle preferenze espresse dal decisore sull'ordine di importanza degli stessi (Nijkamp e Hinloopen, 1990; Boggia e Rocchi, 2010). La prima sintetizza l'effetto di ogni azione in relazione a ciascun criterio di valutazione, i secondi l'importanza relativa assunta dai criteri di valutazione. Confrontando a coppie tutte le alternative rispetto ad ogni criterio di valutazione è possibile identificare gli insiemi di concordanza e di discordanza che serviranno da base per poter arrivare all'indice netto di concordanza, riguardo al quale sia-

¹ Il prefisso *r* significa che il tipo di dati elaborati sono *raster*, mentre *mcda* è il nome dato al pacchetto; *[algorithm]* deve essere sostituito con il nome del metodo utilizzato.

mo interessati soprattutto al segno che presenta. Questo perché nella costruzione intervengono anche i pesi, sui quali abbiamo solo informazioni ordinali. L'ordinamento, che non è necessariamente completo, si basa su una probabilità aggregata legata al segno dell'indice netto di concordanza che viene espressa come punteggio di performance.

Gli input richiesti dal modulo sono la lista dei *raster* rappresentanti i criteri di valutazione e il vettore dei pesi. Ogni cella della regione di GRASS è considerata come una possibile alternativa da valutare ed è descritta con i valori assunti dalla stessa cella dal *raster* utilizzato come criterio. L'output prodotto dal modello è una mappa raster che esprime la preferenza per ogni singola alternativa basata sull'indice netto di concordanza.

2.1.2 r.mcda.fuzzy

Il modulo rappresenta l'implementazione in ambiente GRASS GIS dell'algoritmo multicriteri *Fuzzy*, così come proposto da Yager (1977; 1988). In un modello *Fuzzy* i giudizi non sono chiaramente definiti ma coincidono con sottoinsiemi "sfocati" (*fuzzy* appunto), definiti utilizzando variabili non numeriche ma linguistiche. Anche il processo di pesatura viene realizzato attraverso modificatori linguistici, rappresentanti espressioni quali "molto più" o "molto meno". Il modello su cui si basa il modulo prevede la presenza di un insieme di alternative, un insieme *fuzzy* di obiettivi da raggiungere e un vettore di pesi. Il raggiungimento dell'obiettivo da parte di un'alternativa viene espresso dal grado di appartenenza. La decisione può essere basata su diversi operatori. Nella nostra trattazione ne abbiamo considerati tre: l'operatore minimo (o intersezione), l'operatore massimo (o unione) e l'*ordered weighted averaging* (OWA - somma pesata). L'intersezione e l'unione sono molto utili in caso di analisi di natura ambientale perché riflettono dal punto di vista logico i concetti di sostenibilità debole e forte (Daly e Cobb, 1990), in quanto il primo non permette effetti compensativi e il secondo sì. In letteratura sono rintracciabili sia applicazioni degli operatori intersezione che OWA (Bernetti e Fagarazzi, 2002; Rahman et al., 2012; Riccioli, 2009). Occorre sottolineare che l'operatore minimo e l'operatore massimo sono da considerare come casi particolari dell'OWA. In particolare, ad un atteggiamento pessimista del decisore corrisponde il minimo, mentre l'operatore massimo è considerato in caso di atteggiamento ottimista.

Gli input richiesti dal modulo sono la lista dei *raster* rappresentanti i criteri e il vettore dei modificatori linguistici (pesi) da assegnare. Ogni singola cella della regione di GRASS è considerata come una delle possibili alternative da valutare, descritta attraverso il valore assunto dalla stessa cella dal *raster* utilizzato come criterio. L'output del modulo è rappresentato da tre diversi file, risultanti dalle operazioni di unione, intersezione e media pesata.

2.1.3 r.mcda.electre

Il nome *Electre* (Roy, 1991) identifica non un singolo metodo, ma una famiglia di metodi MCDA, attualmente la più implementata nei pacchetti *software*, e

per la quale è possibile rintracciare qualche applicazione anche in senso geografico (Cavallo e Norese, 2001; Countinho- Rodrigues *et al.*, 2011). Tra i diversi metodi disponibili (*Electre I*, II, III, IV, IS, TRI), il pacchetto applica l'*Electre I*, adatto per l'operazione di scelta della migliore alternativa (*choosing*). Il metodo si basa sulla comparazione a coppie e sulla relazione di preferenza. Il metodo *Electre I* permette di dividere le alternative in due sottoinsiemi: N e A/N. Ogni alternativa presente in N surclassa ogni singola alternativa in A/N; le alternative presenti in N, però, sono tra loro incomparabili. La classificazione nei due gruppi avviene utilizzando gli indici di concordanza e discordanza (Roy, 1991). L'implementazione dell'algoritmo *Electre I* in GRASS GIS richiede come input la lista dei *raster* rappresentanti i criteri da assegnare nella valutazione multicriteri e il vettore dei pesi da assegnare. Ogni singola cella della regione di GRASS è considerata come una delle possibili alternative da valutare ed è descritta dal valore assunto dalla stessa cella dal *raster* utilizzato come criterio. Gli output sono un file rappresentante la distribuzione spaziale dell'indice di concordanza, ed un altro rappresentante l'indice di discordanza. La soluzione ottimale è quella che realizza contemporaneamente il valore massimo dell'indice di concordanza e il valore minimo di quello di discordanza. Normalmente, però, si ricerca una soluzione che soddisfi due soglie stabilite per ciascun indice.

2.1.4 r.roughset

Il metodo rappresenta l'implementazione della teoria classica dei *Rough Sets* (*Classical Rough Sets Theory* – CRST; Pawlak, 1982), basata su una libreria *open source* (*Rough Sets Library* - RSL ver. 2) (Gawrys e Sienkiewicz, 1993, 1994). Per utilizzare tale libreria è stato necessario correggerla, modificarla e svilupparla appositamente per le applicazioni in un contesto spaziale. In questo caso non si tratta di un vero e proprio modulo di analisi multicriteriale, perché con l'approccio rough sets si giunge ad una classificazione ma non ad un ordinamento. Tuttavia, tale modulo è stato propedeutico allo sviluppo del successivo, r.mcda.roughset, di cui di seguito.

2.1.5 r.mcda.roughset

Questo modulo implementa per la prima volta il *Dominance-based Rough Set Approach* (DRSA) (Greco *et al.*, 2001; Mac Parthalain e Shen, 2010) in ambito spaziale. Tutti i software finora sviluppati per effettuare applicazioni del DRSA (<https://idss.cs.put.poznan.pl/site/software.html>) infatti, non permettono la gestione dei dati geografici.

Rispetto all'approccio originale dei rough sets, che non considera proprietà ordinali dell'insieme dei valori assunti dagli attributi, il DRSA per prendere in considerazione le preferenze del decisore, utilizza relazioni di dominanza invece che di indiscernibilità. L'implementazione del DRSA è possibile con diversi algoritmi, ma al momento il più usato e conosciuto è il DOMLEM (Greco *et al.*, 2000) e per tanto esso è stato utilizzato anche nel modulo r.mcda.roughset. Tale algoritmo garantisce una maggiore accuratezza rispetto ad altri sviluppati di recente, soprattutto nel

caso di grandi database, il che lo fa sembrare particolarmente adatto alle applicazioni in ambito geografico.

Rispetto agli altri metodi MCDA, il DRSA non presenta il principale punto debole dell'approccio multicriteri: la fase della attribuzione dei pesi. L'approccio prevede che esperti valutino situazioni reali e che ogni criterio considerato sia semplicemente classificato come costo o beneficio (Greco *et al.*, 2001). Il DRSA permette di identificare delle "regole", a partire da un caso esemplare, nella forma di frasi del tipo "se..., allora..." (Greco *et al.*, 2001). Tre sono le tipologie di regole: certe, possibili ed ambigue. Ogni regola decisionale deve essere essenziale (Greco *et al.* 2001). Nel modulo le regole sono derivate dalla mappa *raster* che include la chiave tematica essenziale per le analisi. Il modulo produce due output: una mappa *raster* e un *file* di testo. Tale *file* è prodotto in un formato compatibile con altri programmi sviluppati dalla *Poznan University of Technology*, in modo da rendere agevole il controllo dei risultati prodotti dal modulo.

3. Caso studio

La gestione delle acque di vegetazione rappresenta un serio problema ambientale ed economico (Bonari e Silvestri, 2003) nelle aree a vocazione olivicola del territorio umbro. L'esclusione di tale materia dalla disciplina sui rifiuti è condizionata al rispetto di norme tecniche molto stringenti che sono funzionali all'utilizzazione agricola del refluo oleario. Tra le aree ritenute idonee alla fertirrigazione, in base alle vigenti normative nazionali e regionali, è possibile definire una scala di preferenza in termini di suscettibilità dei suoli alla fertirrigazione. In altri termini, si tratta di un classico problema di analisi multicriteri geografico.

L'area di studio, la Provincia di Perugia, (Figura 1) è identificata nell'insieme delle celle che saranno oggetto di valutazione. Ogni singolo pixel costituisce un'alternativa che viene descritta e valutata sulla base dei criteri di valutazione scelti (Bonari, 2007). I singoli criteri geografici sono così rappresentati da tematismi *raster* inseriti nel *database* geografico di GRASS.

La figura 2 riporta i criteri utilizzati per la valutazione e, per ciascun criterio, il valore dei singoli pesi e la funzione di normalizzazione dei criteri (Boggia e Massei, 2008). La fase di ponderazione rappresenta uno dei punti critici del sistema di valutazione, in quanto fortemente soggetta alle personali esperienze e alla professionalità del valutatore o del decisore. In questo caso l'attribuzione di tali valori è stata fatta secondo il modello Swing² (Hayashi, 1998).

L'analisi dei dati è stata realizzata utilizzando tre dei moduli disponibili (r.mcda.electre, r.mcda.fuzzy, r.mcda.regime). Non è stato applicato il modulo relativo ai DRSA perché non adatto ai dati a disposizione. Diversi problemi analitici, infatti, si adattano a diversi metodi di analisi. La possibilità di scegliere lo

² Il metodo prevede che il decisore valuti le differenze e le confronti rispetto allo standard, il criterio con la più alta preferenza.

Figura 1. Area di studio, superficie agricola nella provincia di Perugia con pendenza inferiore a 15%.

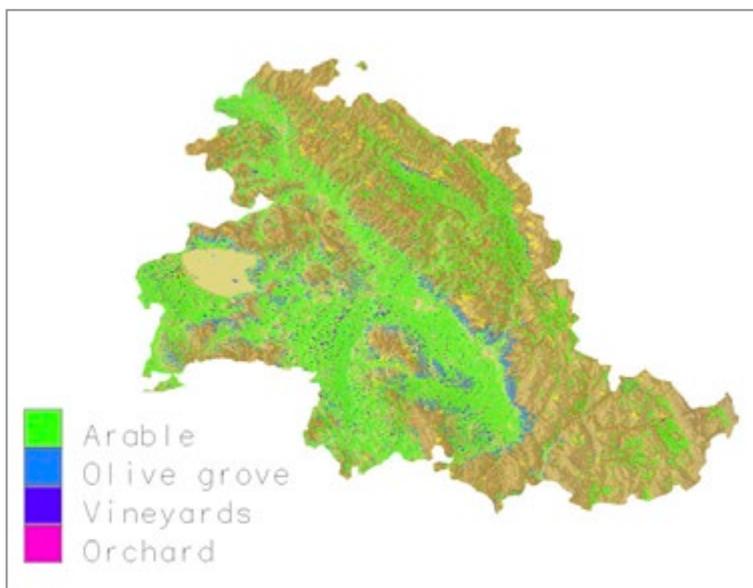


Figura 2. Sintesi dei criteri geografici, dei pesi attribuiti e delle funzioni di normalizzazione.

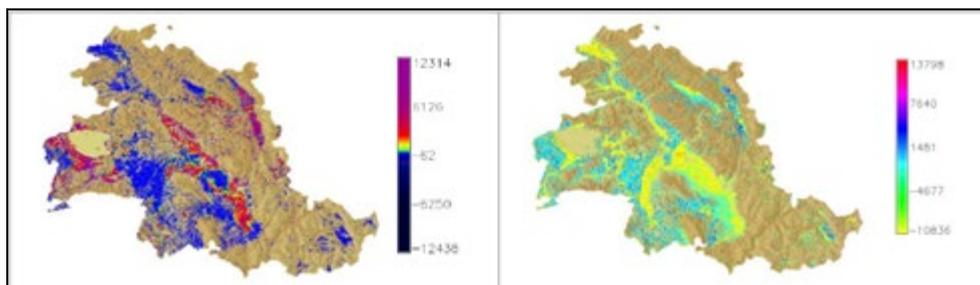
Capacità del suolo di ricezione acque di vegetazione senza rischi di ruscellamento	Conducibilità idraulica (Saxton <i>et al.</i> , 1986)	0,8	
	Indice di incrostazione del suolo (CI = $(1.5Zf + 0.5Zc)/(C+10M)$)	0,8	
Capacità depurativa e protettiva del suolo	pH (opt. 6.5 – 7.5)	0,5	
	Sostanza organica	0,5	
Vulnerabilità dell'acquifero (PTCP tav A.1.4)	1		
Altitudine (0 - 800 m) (DEM SRMT 90m)	0,4		
Pendenza (0- 15%) (DEM SRMT 90m)	0,8		
Distanza euclidea dai frantoi	0,6		

strumento più adatto in una suite è certamente un punto di forza dello strumento proposto.

4. Risultati

Il primo metodo applicato è il metodo Electre. Nella Figura 3 sono riprodotti i due output previsti dal modulo, la mappa di concordanza, sulla destra, e di discordanza sulla sinistra. Le due mappe mostrano, in pratica, le aree preferibili e quelle da evitare per l'utilizzo dei reflui. I soli risultati dei moduli non sono però sufficienti a fornire una risposta al decisore: è necessario effettuare un overlay che permetta di distinguere solo le aree che contemporaneamente soddisfino una soglia di concordanza minima e una di discordanza massima.

Figura 3. Mappe di discordanza e concordanza prodotte dal modulo r.mcda.electre.



Nella Figura 4 sono mostrate le aree che contemporaneamente presentano un valore dell'indice di concordanza superiore al 30% e di discordanza inferiore al 70%, sulla destra, mentre la mappa sulla sinistra mostra le zone in cui entrambi gli indici sono stati fissati al 50%. La possibilità di variare le soglie in una fase successiva all'elaborazione rende lo strumento più flessibile ed anche più comprensibile da parte del Decisore pubblico.

Utilizzando il modulo r.mcda.fuzzy gli output che si ottengono sono tre mappe, che rappresentano i diversi gradi di preferenza secondo la scala di colori riportata accanto a ciascuna. Una semplice analisi comparativa rende evidente il differente approccio e la diversità dei risultati dei tre operatori utilizzati.

La mappa generata con l'operatore AND (Figura 5) presenta un dominio di valori medio bassi [0.00, 0.75] rispetto al *range* teorico [0,1]. Infatti, i toni di colore del rosso, che identificano massima idoneità all'utilizzazione agronomica, sono limitati a piccole zone dell'area di studio. Situazione opposta è quella della mappa generata con l'operatore OR (Figura 6). In questo caso la maggior parte dei valori si attesta in prossimità dell'unità, tanto che la scala cromatica riferita alla mappa presenta un *range* di valori molto limitato [0.975, 1.000] e concentrato in prossimità

Figura 4. Overlay degli indici di discordanza e concordanza (soglia 70°-30° percentile; soglia 50° percentile).

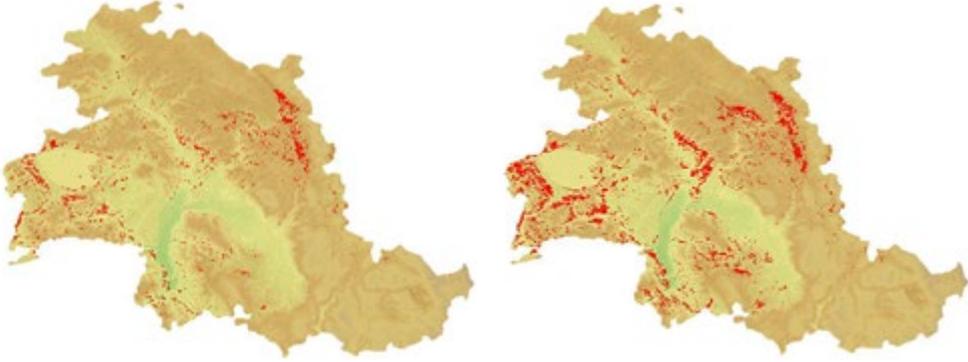
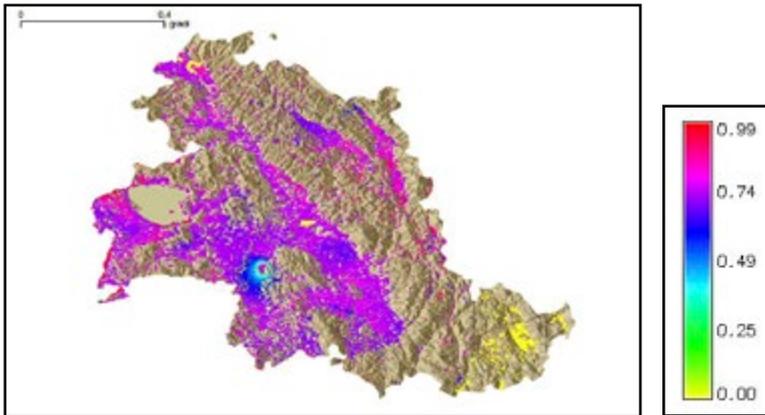


Figura 5. Output dell'analisi multicriteri geografica *fuzzy*. Mappa generata dall'operatore intersezione (AND logico).



del valore unitario (massima preferenza). La mappa ottenuta con l'operatore OWA (Figura 7), invece, presenta uno spettro di valori [0.78, 1] con valori molto distribuiti e con una maggiore capacità discriminante tra le diverse aree rispetto alla due precedenti mappe.

L'ultima elaborazione è stata realizzata utilizzando il modulo *r.mcda.regime*. La mappa rappresentante l'indice adimensionale, direttamente proporzionale alla preferenza accordata dal decisore, è riportata nella Figura 8.

Nella Figura 8 i colori tendenti al rosso mostrano le aree preferibili, mentre più si vira verso il blu e il giallo e minore è la preferenza accordata all'alternativa.

Figura 6. Output dell'analisi multicriteri geografica *fuzzy*. Mappa generata dall'operatore unione (OR logico).

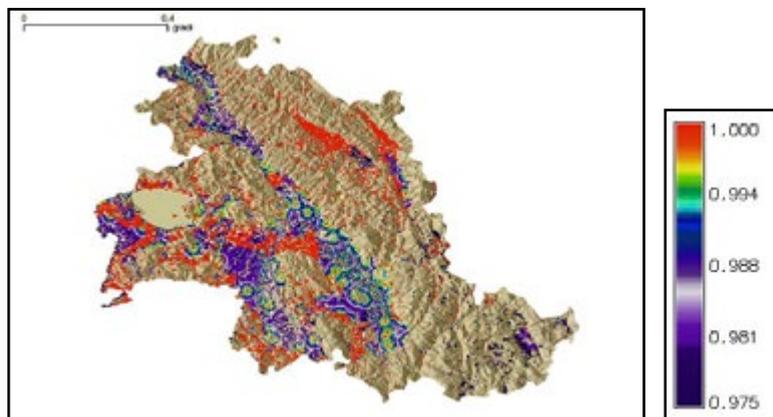
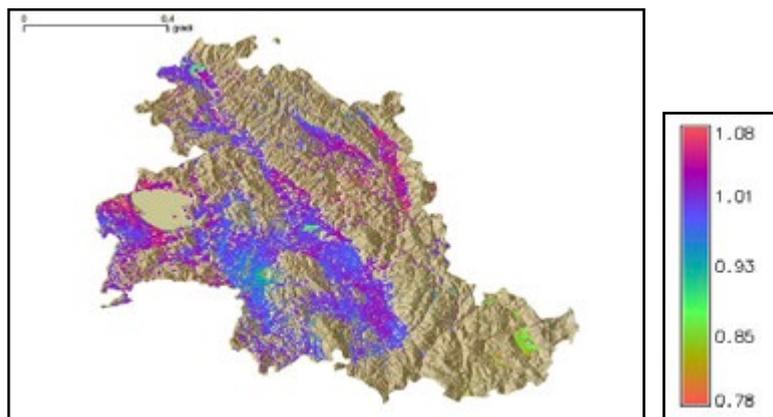


Figura 7. Output dell'analisi multicriteri geografica *fuzzy*. Mappa generata dall'operatore fuzzy media (OWA).

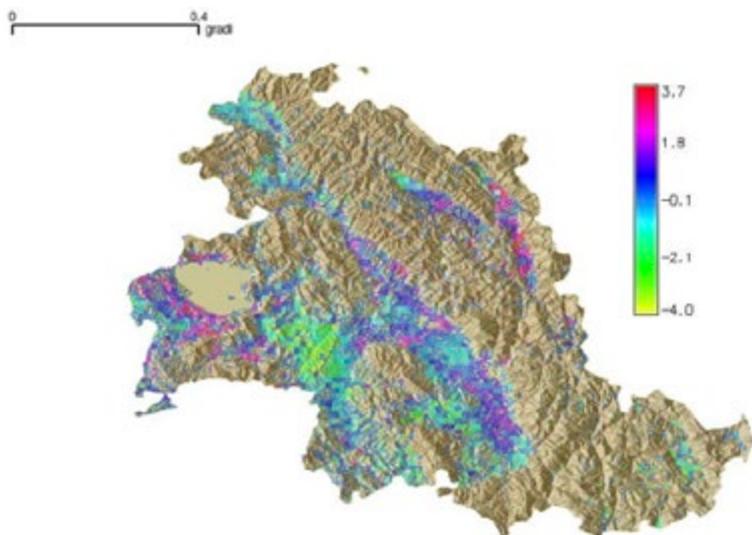


5. Discussione

I tre metodi producono risultati coerenti fra loro. La discussione che qui si riporta non è tanto sul risultato in sé, ma sulle caratteristiche degli output prodotti e sulle loro peculiarità soprattutto nell'ambito dell'analisi ambientale.

Il modulo `r.mcd.electre` produce dei risultati che devono essere rielaborati: da sole le due mappe di concordanza e discordanza non sono sufficienti a definire una soluzione. È necessario, tramite overlay, sovrapporre le due mappe dopo aver impostato soglie di accettazione e tolleranza per gli indici di concordanza e discordanza. La possibilità di modificare tali soglie permette di vagliare soluzioni diverse

Figura 8. Output dell'analisi multicriteri geografica regime.



rispetto a quella ottimale di massima concordanza e minima discordanza, ma comunque entro i criteri di sostenibilità adottati.

Il modulo *r.mcda.regime* permette di dare una risposta più immediata e diretta al decisore pubblico, in quanto produce un risultato direttamente leggibile. La mappa raster prodotta è infatti sintesi delle preferenze espresse dal decisore. La semplicità dell'output, però, potrebbe essere letta come il primo limite dello strumento per una minor capacità di modifica e di rielaborazioni dei risultati.

Per quanto riguarda il modulo *r.mcda.fuzzy* il livello di complessità della soluzione è maggiore in quanto i tre differenti tipi di output (intersezione, unione, OWA) hanno un diverso valore informativo dovuto alla tipologia di operazione insiemistica da cui derivano. In particolare, l'intersezione produce output molto conservativi. In termini di sostenibilità abbiamo già spiegato come i tematismi ottenuti con l'operatore *fuzzy* "AND logico" esprimano il concetto della "sostenibilità forte" (Daly e Cobb, 1990), mentre l'output dell'operatore *fuzzy* "OR logico" è coerente con i presupposti teorici della sostenibilità debole (Daly e Cobb, 1990). Questo perché l'intersezione è un'operazione di minimizzazione dei valori assunti, per una determinata cella, dai diversi criteri, mentre l'unione permette di schermare eventuali performance negative da parte di una sola performance positiva. Una condizione intermedia e con maggiore capacità discrezionale è data dall'operatore OWA, che opera la valutazione e l'ordinamento delle alternative sulla base di un indice *fuzzy*. Quest'ultimo tiene conto delle performance di ogni singola alternativa (porzione di territorio) rispetto a tutti i criteri di valutazione. Benchè il risultato dell'OWA sia, quindi, un risultato più completo rispetto agli altri, soprattutto in ambito ambientale si ritiene migliore elaborare tutte e tre le mappe (con operatori AND, OR e OWA), al fine di ottenere indicazioni corrette sui diversi gradi di preferenza

da parte del decisore. L'impiego congiunto dei tre tipi di approccio consente di fornire valutazioni di scenario secondo diversi livelli di sostenibilità. Nel caso di studio presentato, ad esempio, il decisore può adottare la valutazione secondo un approccio molto conservativo nei confronti dell'ambiente e, quindi, applicare la mappa ottenuta con l'applicazione dell'operatore *fuzzy* "AND logico". Alternativamente, può optare verso una soluzione poco conservativa e basata su un approccio di sostenibilità debole e adottare, quindi, la mappa generata con l'operatore *fuzzy* "OR logico". Come terza possibilità il decisore può scegliere di utilizzare la mappa generata dall'applicazione dell'operatore *fuzzy* OWA adottando, in questo caso, un approccio intermedio tra i primi due. Appare evidente che l'impiego di uno solo degli operatori, senza operare un confronto ragionato sulla base delle volontà del decisore nella programmazione del territorio rispetto ai possibili scenari forniti dagli operatori *fuzzy*, porterebbe ad una valutazione incompleta o addirittura distorta.

6. Conclusioni

Nonostante attualmente sia presente nel settore della ricerca un interessante sviluppo dell'approccio integrato GIS-MCDA, al momento pochi studi rappresentano casi di perfetta integrazione. Più comunemente si osservano applicazioni basate sulla integrazione formale tra i due approcci. Anche nel caso di una perfetta integrazione, spesso questa si limita ad un solo metodo multicriteriale alla volta. Il nostro studio cerca di contribuire proprio allo sviluppo di tali potenzialità. Sono stati perciò sviluppati quattro differenti moduli collegati ad altrettanti metodi MCDA (*Regime*, *Fuzzy*, *Electre* e *DRSA*), in un ben noto e diffuso *software* geografico: GRASS GIS.

Due i vantaggi della nostra applicazione rispetto a quelle già sviluppate. La prima è la presenza di più metodi che rende possibile scegliere il più adatto al problema che si intende affrontare. Pur essendo stati già sviluppati dei tentativi di integrazione, più o meno completa, essi sono solitamente piuttosto rigidi, in quanto viene integrato un solo metodo alla volta. Questo rende obbligata la scelta del metodo a prescindere dalle peculiarità della problematica trattata, oppure esclude l'utilizzo dello strumento stesso. L'altro aspetto positivo fornito dal pacchetto è la sua implementazione in un contesto *open-source*. Questo permette di ampliare in ogni momento il pacchetto originario, nonché di migliorarlo, proprio per i principi base dei software open source. Inoltre non si può tralasciare il fatto che GRASS GIS sia uno dei più usati software geografici, e per tanto permette ad un grande numero di utenti di utilizzare in modo semplice l'approccio multicriteriale.

Bibliografia

- Beaubouef T., Petry F.E., Ladner R. (2007). Spatial data methods and vague regions: a rough set approach. *Journal Applied Soft Computing archive*, 7(1).
- Bernetti I., Fagarazzi C. (2002). L'impiego dei modelli multicriteriali geografici nella pianificazione territoriale. *Aestimum*, 41: 1-26.

- Boggia A., Massei G. (2008). Implementation of Multicriteria Modules in a Geographic Information System: a Case Study. 23rd European Conference on Operational Research (EURO XXIII) Bonn, Germany, July 5-8, 2009.
- Boggia A., Rocchi L. (2010). Water Use scenario assessment using multicriteria analysis. *Journal of multicriteria decision analysis*, 17(5-6): 125-135. ISSN 1057-9214.
- Bonari E. (a cura di) (2007). *Linee guida per l'utilizzazione agronomica delle acque di vegetazione e delle acque reflue da aziende agroalimentari*. Linee Guida Ed. APAT.
- Bonari E., Silvestri N. (2003). *I reflui oleari: aspetti agronomici e ambientali*. I Georgofili. Quaderni - VI : 13-35.
- Bouroushaki S., Malczewski J. 2010a. ParticipatoryGIS: a web- based collaborative GIS and Multi-criteria decision analysis. *URISA Journal*, 1(22): 23-32..
- Bouroushaki S., Malczewski J. 2010b. Measuring consensus for collaborative decision- making: a GIS – based approach. *Computers, environment and urban systems*, 34: 322-332
- Cavallo A. and Norese MF. 2001. GIS and Multicriteria Analysis to evaluate and Map erosion and Landslide Hazards, *Informatica*, 1(12): 25-44.
- Chakhar S., Martel J.M. (2003). Enhancing Geographical Information Systems Capabilities with multi-criteria evaluation functions. *Journal of Geographical Information and Decision analysis*, 7(2):47-71.
- Coutinho- Rodrigues J., Simao a, Henggeler Antunes C. 2011. A gis- based multicriteria spatial decision support system for planning urban infrastructures. *Decision Support Systems*, 51: 720-726.
- Daly H., Cobb J. (1990). *For the common good*. London, Greenprint Press.
- Densham P.J. (1991). Spatial decision support systems. In D.J. Maguire, M.F. Goodchild & D. Rhind (eds), *Geographical information systems: principles and applications*, vol. 1:403-412. London, Longman.
- Eldrandaly K., Eldin N., Sui D., Shouman M. and Nawara G. 2005. Integrating GIS and MCDM using COM technology. *The international Arab Journal of Information Technology*, 2(2): 163-168.
- Estalrich J., Trill J. (1998). GATAGRASS: A Graphical user interface for using GRASS GIS. *Computers & Geosciences*, 24(5):501-506.
- Figueira J, Greco S., Ehrgott M. (eds) (2005). *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*. US, Springer's International Series.
- Frigeri A., Hare T, Neteler M., Coradini A., Federico C., Orosei R. (2011). A working environment for digital planetary data processing and mapping using ISIS and GRASS GIS. *Planetary and Space Science*, 59(11-12):1265-1272.
- Gawrys M., Sienkiewicz J. (1993). *Rough Set Library user's manual*. Warsaw, Institute of Computer Science, Warsaw University of Technology.
- Gawrys M., Sienkiewicz J. (1994). *RSL - The Rough Set Library version 2.0*. Warsaw, ICS Research Report, Warsaw University of Technology.
- Gorsevski P.V., Jankowski P. (2008). Discerning landslide susceptibility using rough sets. *Computers, environment and urban systems*, 32:53-65.
- Greco S., Matarazzo B., Slowinski R. (1999). Rough approximation of preference relation by dominance relations. *European Journal of operational research*, 117(1):68-83.
- Greco S., Matarazzo B., Slowinski S., Stefanowski J. (2000). An algorithm for induction of decision rules consistent with the dominance principle. In W. Ziarko, Y. Yao (eds), *RSCTC*, (pp. 304-313) Heidelberg, Springer-Verlag.
- Greco S., Matarazzo B., & Slowinski R. (2001). Rough sets theory for multicriteria decision analysis. *European Journal of operational research*, 129(1):1-47.
- Hayashi K. (1998). *Multicriteria Aid for Agricultural Decisions Using Preference Relations: Methodology and Application*. *Agricultural Systems*, 58(4):483-503.
- Hinloopen E., Nijkamp P, Rietveld P. (1983). Qualitative discrete multiple criteria choice models in regional planning. *Regional Science and Urban Economics*, 13:77-102.
- Jankowski P. (1995). Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(3):251-273.

- Janssen R., Nijkamp P., Rietveld P. (1990). Qualitative multicriteria methods in the Netherlands. In C.A. Bana E. Costa (eds), *Readings in multiple criteria decision aids*, (pp. 383-409). Heidelberg, Springer-Verlag.
- Jasiewicz J., Metz M. (2011). A new GRASS GIS toolkit for Hortonian analysis of drainage networks. *Computers & Geosciences*, 37(8):1162-1173.
- Karnatak HC, Saran S , Bhatia K., Roy PS. 2007. Multirriteria Spatial Decision Analysis in Web GIS Environment. *Geoinformatica*, 11:407-429
- Laaribi A., Chevallier J.J., Martel J.M. (1996). A spatial decision aid: a multicriterion evaluation approach. *Computers, environment and urban systems*, 20:351-366.
- Laskar A. (2003). *Integrating GIS and Multi Criteria Decision Making techniques for land resource planning*. Enschede (Netherlands), International Institute for Aerospace survey and earth sciences (ITC).
- Li X., Di L., Han W., Zhao P., Dadi U. (2010). Sharing geoscience algorithms in a Web service-oriented environment (GRASS GIS example). *Computers & Geosciences*, 36(8):1060-1068.
- Mac Parthlain N., Shen Q. (2010). On rough sets, their recent extensions and applications. *The knowledge engineering review*, 25(4):365-395.
- Malczewski J. (1999). *Gis and Multicriteria Decision Analysis*. New York, Wiley.
- Malczewski J. (2006). Gis-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7):703-726.
- Neteler M., Mitasova H. (2008). *Open Source GIS - A GRASS GIS approach*, third ed. New York, Springer.
- Nijkamp P., Hinloopen E. (1990). Qualitative multiple criteria choice analysis, the dominant regime method. *Quality & Quantity*, 24:37-56.
- Pawlak Z. (1982). Rough set. *International Journal of Information and Computer science*, 11(5):344-356.
- Rahman MA, Rusterberg B.,Gocu RC, Lobo Ferreira JP and Sauter M. 2012. A new spatial multicriteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. *Journal of Environmental Management*, 99: 61-75.
- Riccioli F (2009). Una proposta metodologica per lo studio della multifunzionalità: l'analisi multicriteriale geografica. *Economia & Diritto agroalimentare*, XIV, n.3, pp. 99-118
- Roy B. (1991). The outranking approach and foundations of ELECTRE methods. *Theory and decision*, 31:49-73.
- Roy B. (1996). *Multicriteria methodology for decision aiding*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., Papendick R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 50(4):1031-1036.
- Uddameri V., Honnunar V. (2006). Combining rough sets and GIS techniques to assess aquifer vulnerability characteristics in the semi-arid South Texas. *Environmental Geology*, 51(6):931-939.
- Vincke P. (1992). *Multicriteria decision-aid*. New York, John Wiley & Sons.
- Yager R.R. (1977). Multiple objective decision-making using fuzzy sets. *International Journal of Man-Machine Studies*, 9:375-382.
- Yager R.R. (1988). On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18(1):183-190.
- Yager R.R. (1993). Families of OWA operators. *Fuzzy Sets and Systems*, 59(2):125-148.
- Zoppi C., Lai S. (2006). *Geographic Information Systems and Decision Processes for urban planning: a case study of Rough Set Analysis on the Residential Areas of the City of Cagliari*. ERSA conference papers ersa06p367, European Regional Science Association.

