

# **La mappatura del potenziale interesse per le attività estrattive mediante tecniche di integration modelling: un caso di studio**

Dr.ing. Alberto Pistocchi  
Dottorato di ricerca in Georisorse e Geotecnologie  
DICMA-Università di Bologna

## **1. Introduzione**

Per *integration modelling* si deve intendere lo studio di fenomeni che si manifestano in relazione a determinate 'cause', attraverso l'analisi di queste ultime, ovvero l'uso congiunto di più tipi di dati per prevedere fenomeni che da essi in qualche modo dipendono. Per esempio, se si vuole evidenziare la propensione del territorio al dissesto, si possono rappresentare le litologie affioranti, a ciascuna delle quali si associa una certa franosità potenziale; successivamente si potrà ricorrere ad altre informazioni, come ad esempio la presenza di luoghi a elevata piovosità e affioramenti di falda, forte pendenza, ecc.; si potrà infine concludere che le zone più propense all'insorgere di frane sono quelle in cui, simultaneamente, si verificano abbondanti piogge, litologie favorevoli, pendenze di un range appropriato...

Per rendere 'oggettivi' i criteri con cui operare l'integrazione di informazioni differenti, sono state sviluppate numerose metodologie, che tengono presente l'incertezza intrinseca dell'operazione: non si può affermare che, in corrispondenza del coesistere di più fattori di predisposizione per il fenomeno, questo si verificherà effettivamente, ma solo che la località in cui ciò si verifica è 'propensa' a detto accadimento. In generale, le metodologie possono essere assunte sotto la denominazione complessiva di 'funzioni di propensione' (*favourability functions*, Chung e Fabbri, 1993).

Nel seguito si esporranno brevemente le considerazioni teoriche che sottendono questo approccio, e si descriverà una applicazione delle tecniche descritte alla zonizzazione di una regione sulla base dell'interesse per le attività estrattive. Il risultato di detta operazione è una mappa che riporta per ogni località un punteggio esprimente la *favourability*, o predisposizione, a che in essa si possa rinvenire un giacimento minerario.

## **2. Basi teoriche**

Supponiamo che A sia il dominio oggetto di analisi, ovvero la regione di studio. Sia poi F il fenomeno del quale si è rappresentata su una carta l'occorrenza in occasione di rilievi sperimentali od osservazioni di campagna (per esempio un insieme di giacimenti minerari di esistenza certa e nota). Se sono disponibili r insiemi di dati (*layers*) rappresentati ciascuno su una mappa (carta tematica) e coprente tutto A, possiamo definire per ciascuno di essi una 'funzione di partizione':

$$v_k: A \Rightarrow [1, 2, \dots, n_k]$$

che assegna ad ogni punto (o *pixel*) di A una delle  $n_k$  classi nelle quali è diviso il layer k-esimo (per esempio, tale funzione potrebbe essere quella che ad ogni punto associa una classe litologica di appartenenza).

Si può inoltre definire un'altra funzione:

$$R_k: [1, 2, \dots, n_k] \Rightarrow [a, b]$$

che associa ad ognuna delle classi in cui è diviso il layer un valore compreso fra a e b, due numeri che devono soddisfare alcune proprietà. Il numero associato a ciascuna classe rappresenta il grado di *favourability* da associare ad ogni classe del layer nei riguardi di un dato fenomeno. Per esempio,

si può dare a ciascuna classe litologica un valore di predisposizione alla mineralizzazione di un metallo, ovvero un numero crescente con la predisposizione stessa. Questo valore di predisposizione è un indice della “ragionevolezza” che il fenomeno accada in presenza di una certa caratteristica del territorio. Definiamo allora la funzione di favourability come la composizione di R e V:

$$F_k = R_k \circ V_k$$

Gli estremi dell’intervallo, a e b, devono essere scelti dal modellista sulla base della propria interpretazione della “ragionevolezza”: se questa viene interpretata come la probabilità dell’accadimento, allora deve essere a=0, b=1. Altre grandezze possono essere prese a misura della “ragionevolezza”, come ad esempio le funzioni di appartenenza della teoria dei *fuzzy sets* (Zadeh, 1965, 1968), o i *certainty factors* (Shortliffe e Buchanan, 1975; Heckermann, 1986; cit. in Chung e Fabbri, 1993). In quest’ultimo caso, ad esempio, a=-1 e b=1.

Se la *favourability* è intesa come probabilità, si può invocare il teorema di Bayes, per cui la probabilità condizionata che si verifichi un fenomeno F, data la concomitante presenza degli attributi E1, ..., En (supposti fra loro condizionatamente indipendenti) è

$$\text{Prob}(F/E_1, \dots, E_n) = (\text{pps}_1 * \dots * \text{pps}_n) * (\text{ppa}_1 * \dots * \text{ppa}_n) / \text{psF}^{n-1} * \text{pps}_{1\dots n}$$

essendo:

- $\text{pps}_i$  (i=1, ..., n) la probabilità a priori che una certa classe di attributo si verifichi sul dominio A
- $\text{ppa}_i$  (i=1, ..., n) la probabilità che, data una certa classe di attributo, F si verifichi sul dominio A; essa è calcolata con la formula (Chung e Fabbri, 1993)  $\text{ppa}_i = 1 - (1 - (\text{area}_i)^{-1})^{nb(i)}$ , essendo  $\text{area}_i$  l’area di A dove si incontra la classe di attributo i-esima, e  $nb(i)$  l’area di A dove insieme all’attributo i-esimo si incontra anche un’evidenza di F
- $\text{pps}_{1\dots n}$  la probabilità congiunta di E1, ..., En, ovvero la probabilità di incontrare tutti gli n eventi simultaneamente
- $\text{psF}$  la probabilità a priori di incontrare un’evidenza di F su A

Per applicare questa regola, si deve stilare una mappa per ciascuna combinazione delle classi di attributo che si identificano sul territorio. Questo viene fatto automaticamente in un GIS mediante l’operazione di *cross*, ovvero di identificazione di tutti i poligoni per i quali si assiste ad una combinazione unica degli attributi.

Se al posto della probabilità, valutata con la regola di Bayes, si ricorre ai *certainty factors*, occorre considerare invece le seguenti espressioni (Fabbri *et al.*, 1998).

I *certainty factors* per una classe di attributo possono essere definiti come:

$$\text{CF}(i) = [\text{Prob}(F/E_i) - \text{Prob}(F)] / [\text{Prob}(F/E_i)(1 - \text{Prob}(F))], \text{ se } [\text{Prob}(F/E_i) > \text{Prob}(F)]$$

$$\text{CF}(i) = [\text{Prob}(F/E_i) - \text{Prob}(F)] / [\text{Prob}(F)(1 - \text{Prob}(F/E_i))], \text{ se } [\text{Prob}(F/E_i) < \text{Prob}(F)]$$

essendo  $\text{Prob}(F)$  la probabilità a priori di incontrare un’evidenza di F; il *certainty factor* (CF) per un attributo varia fra -1 e 1, indicando per valori prossimi a -1 la tendenza del fenomeno ad accadere in assenza dell’attributo, e per valori prossimi a 1 la tendenza ad accadere in sua presenza.

Il *certainty factor* di due attributi è dato da:

$$\text{CF}(1+2) = \text{CF}_1 + \text{CF}_2 - \text{CF}_1 * \text{CF}_2, \text{ se entrambi i CF sono non-negativi}$$

$$\text{CF}(1+2) = \text{CF}_1 + \text{CF}_2 / \min(\text{abs}(\text{CF}_1), \text{abs}(\text{CF}_2)), \text{ se i CF hanno segno opposto}$$

$$\text{CF}(1+2) = \text{CF}_1 + \text{CF}_2 + \text{CF}_1 * \text{CF}_2, \text{ se entrambi i CF sono negativi}$$

La procedura si applica iterativamente per più attributi:  $\text{CF}(1+2+3) = \text{CF}(1+2) + \text{CF}(3) + \dots$

Un’altra possibilità è quella di ricorrere alla *logica fuzzy*.

La logica *fuzzy* è formalmente analoga a quella classica booleana, salvo per il fatto che una affermazione non è mai semplicemente vera o falsa, ma possiede un grado di verità variabile fra zero e uno. Questo grado di verità è chiamato ‘*membership function*’, ed esprime il grado di appartenenza di un oggetto a un insieme. Spesso, per praticità, si tende a confondere la *membership* con la probabilità a priori che l’evento espresso dall’affermazione si verifichi ( $\text{ppa}_i$ , i=1, ..., n). In tal caso, la funzione assume un valore che viene stimato dalla frequenza relativa di accadimento.

Per quanto detto, si definiscono le seguenti operazioni logiche:

- fuzzy 'and'= $\min(ppa_i, i=1, \dots, n)$
- fuzzy 'or'= $\max(ppa_i, i=1, \dots, n)$
- fuzzy-prodotto= $\prod(ppa_i, i=1, \dots, n)$
- fuzzy-somma= $(1-\prod(1-ppa_i), i=1, \dots, n)$
- fuzzy- $\gamma$  operation'= $(\text{fuzzy-somma})^a(\text{fuzzy-prodotto})^{(1-a)}$   
(generalmente,  $a=0,7$ )

In questo modo, si definiscono regole per la sovrapposizione di mappe, che consentono di valutare l'influenza degli eventi occorrenti in corrispondenza di determinati attributi sull'intera area di studio. Con una analisi più approfondita, si può comprendere qual è la combinazione dei vari attributi in corrispondenza della quale si ha massima 'favourability' per l'accadimento del fenomeno in questione.

### 3. Un caso di studio: primi risultati e indicazioni su futuri approfondimenti

Il caso qui brevemente presentato è dato dal distretto di Makonde, una regione dello Zimbabwe nella quale si trovano alcune miniere di rame. Si desidera effettuare una mappatura del territorio sulla base della propensione alla presenza di mineralizzazioni di rame. Il caso è presentato sommariamente a titolo di esempio. I dati disponibili sono:

- una mappa della litologia dell'area, che mostra in particolare le litologie favorevoli per ospitare le mineralizzazioni (*arkose e dolomite*)
- una mappa delle concentrazioni di metalli nei campioni di suolo prelevati su una griglia regolare di 500 m di lato a coprire tutta l'area (un'elevata concentrazione di rame indica propensione per la mineralizzazione)
- una mappa del segnale del campo magnetico totale misurato da apparecchio aereo, che rappresenta la prossimità del materiale di basamento igneo (ritenuto l'origine del minerale), sepolto sotto sedimenti magneticamente inerti, rispetto alla superficie terrestre
- una mappa dei principali lineamenti strutturali (pieghe e faglie) dell'area (ritenute vie di migrazione preferenziale delle soluzioni mineralizzanti)
- una mappa delle miniere esistenti, cui è stata data una estensione areale convenzionale, e che viene considerata, nell'elaborazione, come una mappa degli eventi osservati (ovvero effettiva presenza di mineralizzazioni).

Nelle figure 1, 2 e 3 sono rappresentati i dati utilizzati. La mappa dell'anomalia geochimica è stata ottenuta per interpolazione dei dati esistenti, di tipo puntuale, circa le concentrazioni di rame. Le figure da 4 a 8 mostrano invece le mappe di predisposizione alla formazione di giacimenti di rame ottenute con varie tecniche.

Dai risultati ottenuti occorre osservare:

- che le varie tecniche portano a risultati molto diversi fra loro, attribuendo pesi diversi ai vari fattori che denotano, a priori, predisposizione alla mineralizzazione
- che un fattore limitante l'attendibilità delle mappe prodotte è la ridotta dimensione dell'insieme di eventi osservati (si avevano solo 5 miniere su un'area di qualche centinaio di kmq): per eventi osservati molto rari, accade che nessuno di essi cada esattamente in corrispondenza delle classi di ciascun dato effettivamente più favorevoli
- che, se effettivamente una classe è favorevole per l'evento, allora la percentuale dell'area valutata favorevole dopo il calcolo, nella quale si ha anche quella classe dovrebbe essere una funzione monotona crescente. Questo non è sempre verificato nella pratica, a conferma della scarsità dei dati disponibili.

Queste considerazioni possono essere formalizzate ricorrendo all'uso di appositi tests statistici, e in particolare all'analisi del grado di predizione (*prediction rate*), come definito in Chung e Fabbri, 1998. È importante sottolineare che la metodologia ha senso in quanto consente di validare la 'predizione', costituita dalla mappa di 'favourability' prodotta. La validazione normalmente si

effettua dividendo i dati disponibili sull'evidenza del fenomeno in studio (nel nostro caso, le miniere esistenti) in due gruppi, uno solo dei quali deve essere utilizzato nei calcoli, e verificando se la predizione effettivamente afferma che i luoghi dove si trovano le evidenze non utilizzate sono predisposti per il fenomeno. Nel caso in esame, essendovi un numero modesto di evidenze, si è scelto di effettuare considerazioni qualitative, ma è previsto un futuro approfondimento che consenta di integrare nell'analisi dati di maggiore dettaglio e un numero di evidenze adeguato per una validazione della predizione.

#### **4. Conclusioni**

Le tecniche ora illustrate rappresentano un insieme di metodologie di un certo interesse per la mappatura del territorio sulla base di un *overlaying* di mappe. Questo è dovuto all'aspetto probabilistico che è pienamente supportato dal calcolo. Purtroppo, un forte limite è dato dall'esigenza di un insieme di eventi osservati piuttosto ampio. La tecnica dell'*overlaying* di mappe è molto comune nel mondo delle applicazioni GIS, e queste metodologie possono trovare un proficuo impiego in ambito molto diversi, dalla mappatura dell'interesse minerario, a quella del rischio geoambientale e dell'impatto ambientale, all'identificazione di siti idonei per certe attività economiche. Occorre infine sottolineare che, qualora gli eventi osservati siano troppo scarsi, si possono costruire i valori delle probabilità richiesti dalle funzioni precedentemente descritte attraverso un'operazione iterativa di assegnazione di valori sulla base del giudizio di un esperto, e di loro correzione in modo da garantirne la consistenza (Chung e Fabbri, 1993).

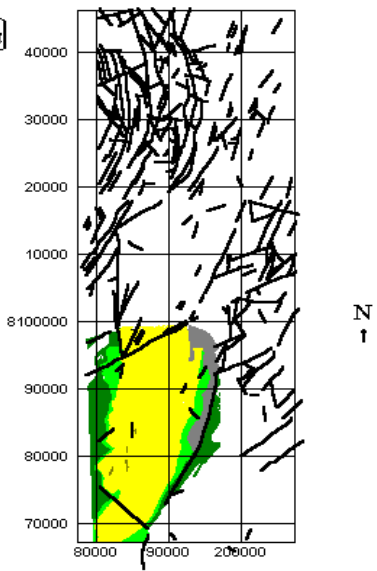
#### **5. Bibliografia essenziale**

- Chung, C.F., Fabbri, A.G., The representation of geoscience information for data integration, Non Renewable Resources, 1993
- Fabbri, A.G., Chung, C.F., Three bayesian prediction models for landslide hazard, IAMG International Conference, Ischia, Na, 1998
- Fabbri, A.G., Napolitano, P., C.F. Chung, L. Zezere, A.B. Ferreira, E. Reis, Modelling landslide hazard north of Lisbon, Portugal, Using favourability functions, IAMG International Conference, Ischia, 1998
- Remondo, J., Diaz de Teran, J.R., Marquinez, J., Menendez, R., Napolitano, P., Fabbri, A.G., Chung, C.F., Geologic hazard zonation by a fuzzy set favourability function applied in the Basque Country, Spain, IAMG International Conference, Ischia, 1998
- Pistocchi, A., Sistemi informativi geografici e pianificazione delle attività estrattive, Quarry & Construction, giugno 1999
- Zadeh, L.A., Fuzzy sets, IEEE Informatics and Control, n.8, 1965
- Zadeh, L.A., Probability measures of fuzzy events, Jour. Math. Analysis and application, v.10, 1968

*geological map of the area*

- Arkose
- Dolerite
- Dolomite
- Greenstone
- Slate
- alluvium
- basic dike

0 25000



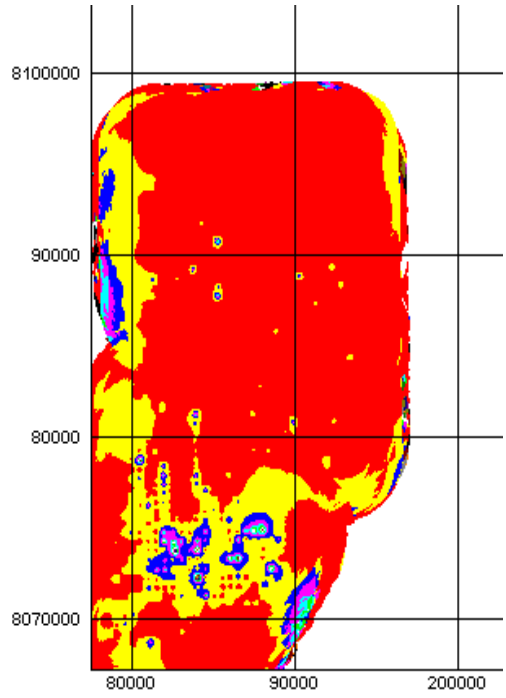
**Figura 1**

***Map of geochemical anomalies***

**copper concentration in soil samples, ppm**

- |   |  |
|---|--|
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> <50            | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: olive; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 400-450     |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 50-100      | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: blue; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 450-500      |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: cyan; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 100-150       | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: purple; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 500-550    |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: magenta; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 150-200    | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: teal; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 550-600      |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightblue; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 200-250  | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: darkgreen; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 600-650 |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightgreen; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 250-300 | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: gray; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 650-700      |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: white; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 300-350      | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: orange; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 700-750    |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: brown; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 350-400      | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: black; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> >750        |

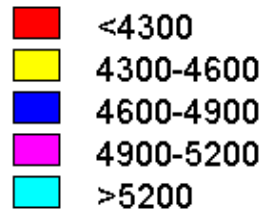
0 25000



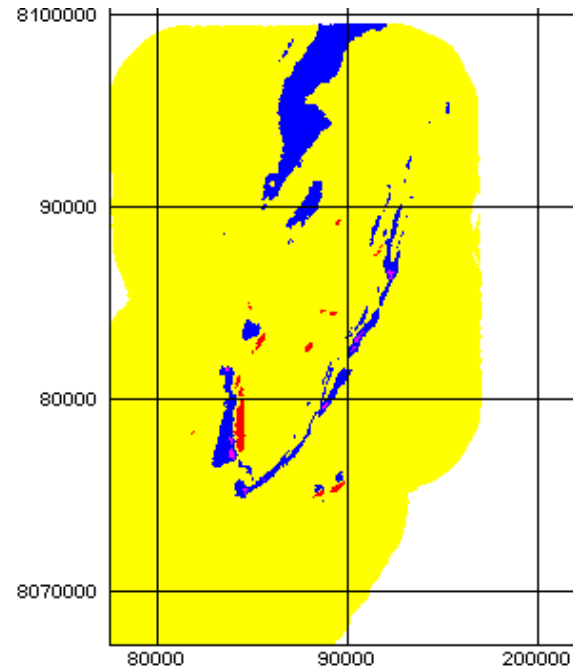
**Figura 2**

**map of the aeromagnetic survey  
of the area**

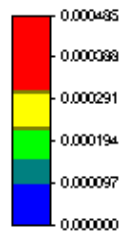
total magnetic field, nT



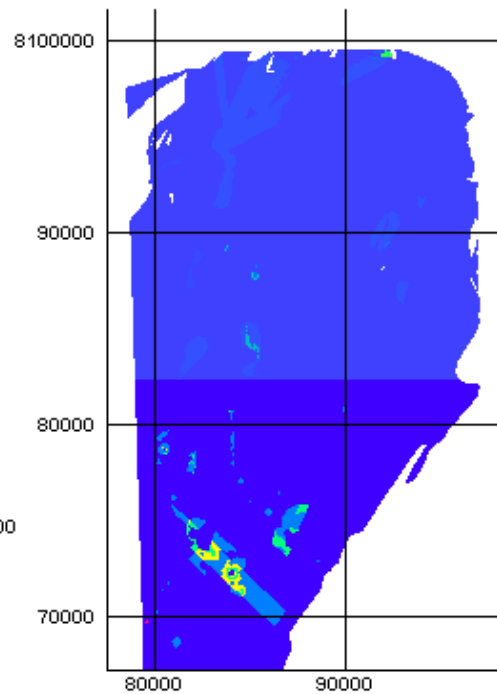
*Figura 3*



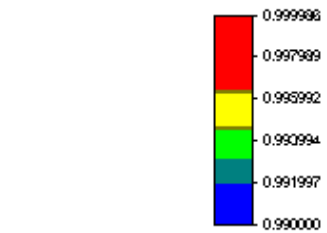
**Bayesian  
Probability  
Scores**



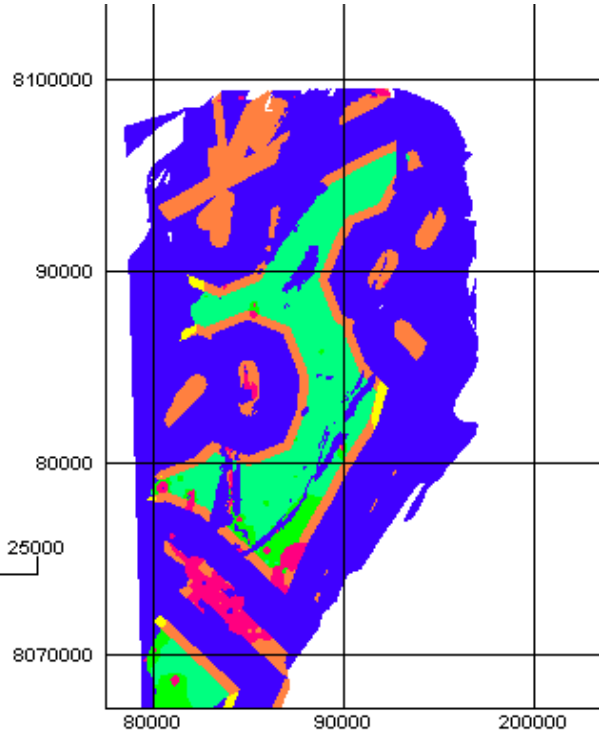
**Figura 4**



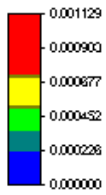
**Certainty factors scores**



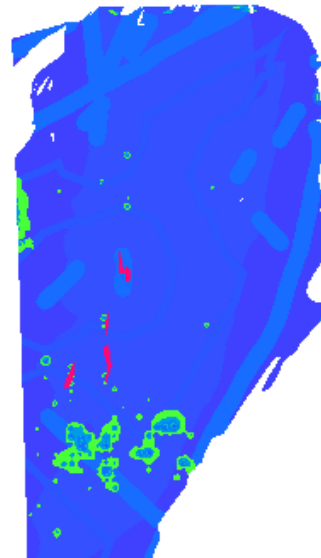
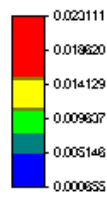
**Figura 5**



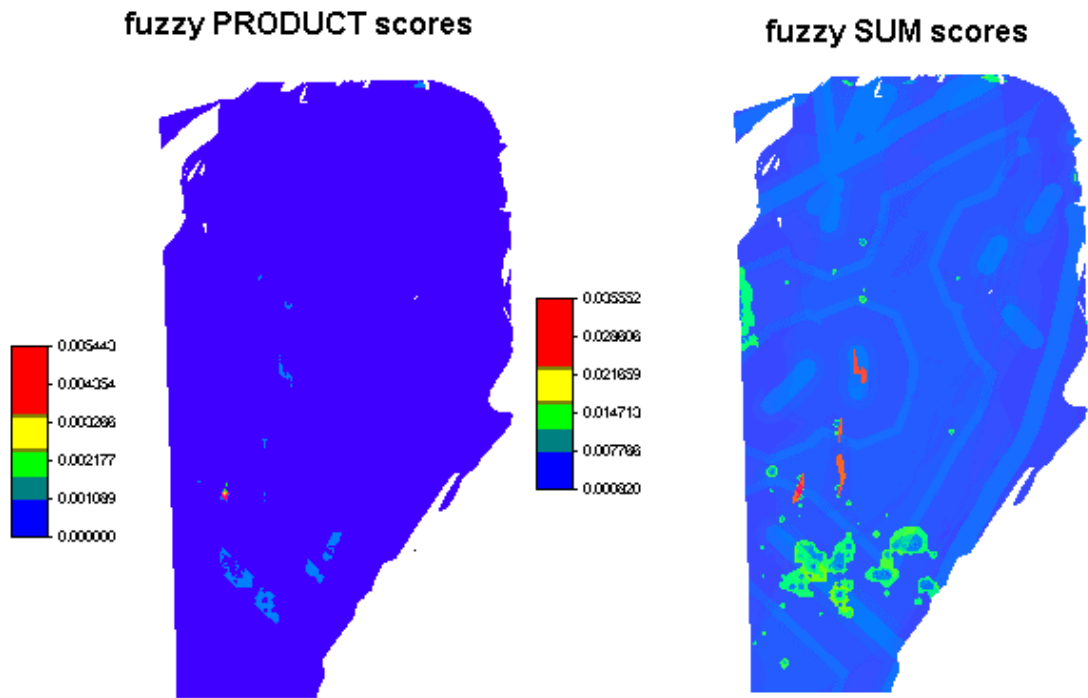
**fuzzy AND scores**



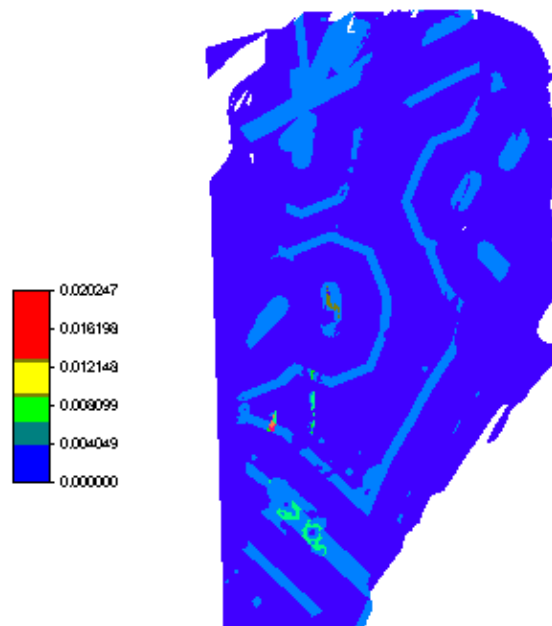
**fuzzy OR scores**



**Figura 6**



**Figura 7**



**Figura 8**