

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Georóżnorodność z ArcGIS Desktop i ArcGIS Pro

Wybrane miary krajobrazowe

Tomasz Bartuś

Na podstawie materiałów szkoleniowych ESRI
Wyłącznie do użytku wewnętrznego AGH

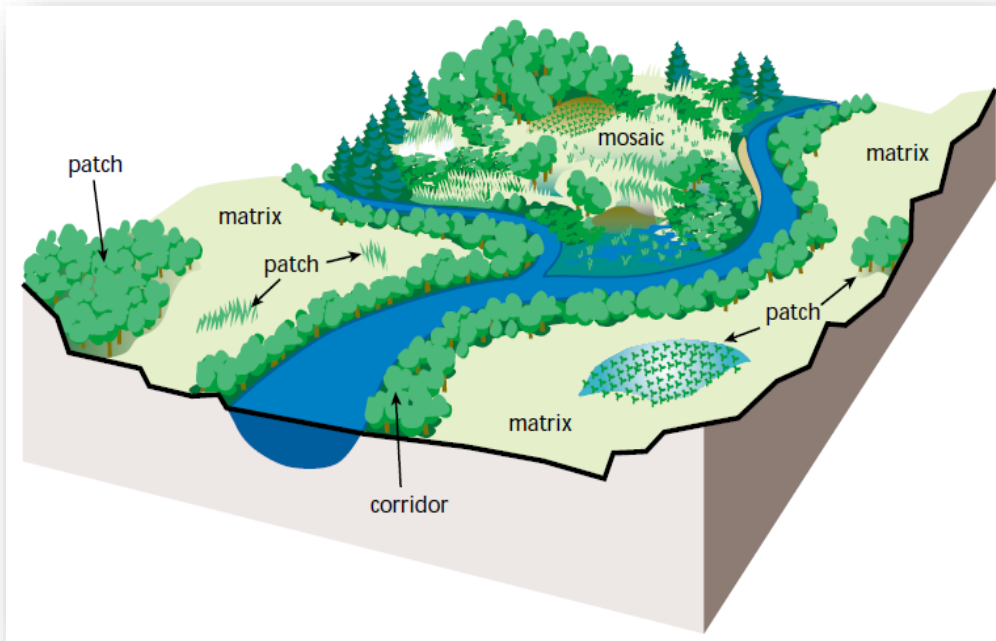
<http://home.agh.edu.pl/bartus>
10.12.2023 12:09:00

Wprowadzenie

Współczesna nauka zajmuje się opisem struktury, typologią i funkcjonowaniem krajobrazów, rozumianych jako przejawy zróżnicowania zewnętrznej sfery Ziemi – epigeosfery (Richling 1992; Ostaszewska 2002; Chmielewski 2012). Współcześni geografowie i ekolodzy krajobrazu przedmiot swoich zainteresowań rozumieją jako wielowymiarowy i wielocechowy system zmieniający się w czasie i przestrzeni (Pietrzak 1998; 2010). **Zróżnicowanie przestrzenne krajobrazów określane jest jako struktura. Jej rozwinięcie pionowe rozpatrywane w pewnym obszarze wyraża charakter, współwystępowanie oraz układ poszczególnych części składowych krajobrazu** (sfer, elementów i cech; Richling 1992; Löffler 2002). Struktura pozioma krajobrazów wynika z przestrzennego zróżnicowania jednostek przyrodniczych wykazujących istotne zróżnicowanie struktury pionowej. Homogeniczne jednostki przestrzenne mogą mieć różny charakter. Sposób ich definiowania zależy od przyjętego modelu pojęciowego (Pietrzak 2000). Do najczęściej stosowanych systemów należą metoda geokompleksów (Bartsch 1968; Kondracki 1976; Kondracki & Richling 1983; Balon 2007, 2014, 2018) oraz metoda płatów-korytarzy-matrycy (Forman & Godron 1986).

W metodzie geokompleksów (ang. *geocomplex*) wydzielone jednostki przestrzenno-strukturalne obejmują pewien zamknięty wycinek przyrody, w obrębie którego funkcjonują różnorodne zależności wiążące komponenty naturalne (biotyczne i abiotyczne) oraz antropogeniczne (Bartsch 1979). Pojęcie geokompleksu obejmuje sfery, komponenty, elementy i cechy krajobrazu. Podział krajobrazu dokonywany jest na podstawie hierarchicznego systemu jednostek o zmiennym poziomie heterogeniczności obejmującego od części świata, poprzez: obszary, podobszary, prowincje, podprowincje, makroregiony, mezoregiony, mikroregiony, tereny (ekochory), uroczyska, aż po jednorodne facje (Kondracki 1976). Jednostki wyższych rzędów składają się z jednostek niższych rzędów, dlatego obiekty wyższego szczebla niż facje są zawsze wewnętrznie niejednorodne. Facje, uroczyska i tereny, które opisują krajobraz w skali lokalnej, są wydzielane metodą kartowania fizycznogeograficznego. Jednostki wyższych rzędów nazywane regionami są wyróżniane w skali regionalnej. Największe z nich opisują krajobraz w skali globalnej (Balon 2018).

Z kolei w modelu płatów-korytarzy-matrycy krajobraz definiowany jest jako struktura złożona z izolowanych płatów oraz łączących je korytarzy, które łącznie występują w pewnym tle nazywanym matrycą (Ryc. 1).



Ryc. 1. Krajobraz opisany za pomocą modelu płatów-korytarzy-matrycy

W analizach struktur krajobrazów wykorzystujących modele geokompleksów albo płatów-korytarzy-matryc (Forman & Godron 1986), powszechnie wykorzystywane są tzw. miary krajobrazowe (McGarigal & Marks 1995; Kot & Leśniak 2006; McGarigal *i in.* 2012; Urbański 2012). Są to ilościowe wskaźniki opisujące geometryczne i przestrzenne właściwości elementów krajobrazu. Do najważniejszych typów należą miary: powierzchni i krawędzi (ang.: *area and edge metrics*), kształtu (ang.: *shape metrics*), stref centralnych (ang.: *core area metrics*), kontrastu (ang.: *contrast metrics*), fragmentacji (ang.: *aggregation metrics*) i **różnorodności** (ang.: *diversity metrics*).

Miary krajobrazowe można obliczać dla jednego komponentu środowiska (np. dla zmienności stratygraficznej), dla całego obszaru badań (tzw. poziom krajobrazu) lub dla zdefiniowanych wcześniej fragmentów (naturalne bądź sztuczne sieci analityczne). Można dokonywać obliczeń także na poziomie kategorii (dla każdej kategorii osobno, np. dla płatów odsłoneń jury, kredy, miocenu itd.) oraz na poziomie pojedynczych płatów (wielokątów wyznaczających w tym przypadku granice odsłoneń).

Podstawowym narzędziem służącym do obliczeń miar krajobrazowych jest aplikacja **Fragstats** (McGarigal & Marks 1995; Raines 2002; Zwierzchowska *i in.* 2010; McGarigal *i in.* 2012). Program, który powstał i jest rozwijany na Uniwersytecie w Oregonie, wykorzystuje dane przestrzenne w modelu rastrowym. Aplikacja umożliwia obliczenie kilkudziesięciu miar krajobrazowych.

Poniżej przedstawiono definicje szeregu najczęściej wykorzystywanych metryk krajobrazowych. Pełen zestaw wskaźników, wraz z ich szerokim opisem można znaleźć w publikacjach, np. [Landscape Metrics for Categorical Map Patterns](#); McGarigal & Marks (1995).

1. Miary powierzchni i krawędzi

Całkowita powierzchnia krajobrazu TA (ang.: *Total Landscape Area*) to prosta miara łącznej powierzchni całego obszaru badań (1). Dla przyjętego obszaru badań, wartość wskaźnika wynosiła 9 000 ha.

$$TA = A \cdot \left(\frac{1}{10^4}\right) [ha] \quad (1)$$

gdzie:

A – pole powierzchni całego krajobrazu (obszaru badań) [m^2].

Powierzchnia płatów $AREA$ to miara pola powierzchni elementów krajobrazu (2). Jest wyznaczana na poziomie płatów i kategorii. W drugim przypadku wyznaczane są proste statystyki opisowe (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012).

$$AREA = a_{ij} \cdot \left(\frac{1}{10^4}\right) [ha] \quad (2)$$

gdzie:

i – kategoria (typ płatów),

j – numer elementu krajobrazu w kategorii i ,

a_{ij} – powierzchnia płata ij [m^2].

Powierzchnia kategorii CA (ang.: *Class Area*) jest miarą kompozycji krajobrazu opisującą stopień jego złożoności z płatów określonej kategorii (3). Gdy cały krajobraz składa się z jednego płata $CA=TA$ (1). Jest obliczana na poziomie kategorii. Stanowi całkowite pole powierzchni zajmowane przez wszystkie elementy danej kategorii (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012).

$$CA_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot \frac{1}{10^4} [ha] \quad (3)$$

gdzie:

n – liczba płatów kategorii i ,

pozostałe symbole jak we wzorze (2).

Procentowy udział kategorii w krajobrazie $PLAND$ (ang.: *Percentage of Landscape*) jest względną miarą powierzchni opisującą proporcjonalny udział w krajobrazie płatów każdego typu (4), McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$PLAND_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot \frac{10^2}{A} [\%] \quad (4)$$

symbole jak we wzorach (1), (2) i (3).

Wskaźnik największej jednostki LPI (ang.: *Largest Patch Index*) jest prostym wskaźnikiem dominacji (5). Obliczany na poziomie krajobrazu lub kategorii, wskazuje na procent powierzchni obszaru badań zajętego przez największy płat (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012).

$$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

symbole jak we wzorach: (1) i (2).

Długość krawędzi jednostek TE (ang.: *Total Edge*) najczęściej obliczana jest na poziomie kategorii i całego obszaru badań (6). Na poziomie krajobrazu wyraża łączną długość wszystkich krawędzi (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$TE = E \text{ [m]} \quad (6)$$

gdzie:

E – całkowita długość wszystkich krawędzi w krajobrazie [m].

Gęstość granic ED (ang.: *Edge Density*) obliczana jest na poziomie kategorii i całego krajobrazu (7). W wymiarze całego obszaru badań, wyraża średnią długość krawędzi płatów w przeliczeniu na hektar powierzchni (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$ED = \frac{E}{A} \cdot 10\,000 \text{ [m/ha]} \quad (7)$$

symbole jak we wzorach: (1) i (6).

2. Miary kształtu

Wskaźnik kształtu SHAPE (ang.: *Shape Index*) jest miarą złożoności kształtu płatów (8). Oblicza się go dla poziomych elementów krajobrazu jako znormalizowany stosunek obwodów płatów do ich pól powierzchni, w odniesieniu do standardowego kształtu piksela. Wartości wskaźnika zmieniają się w przedziale $<1; \infty$). Parametr osiąga wartość minimalną, gdy elementy krajobrazu posiadają kształt zbliżony do kwadratu. Wartości indeksu bezgranicznie rosną wraz ze wzrostem stopniem komplikacji przebiegu granic płatów. Zaletą parametru jest odporność na zjawisko proporcjonalności (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012). Dla poziomów klasy i krajobrazu analizowane są proste statystyki opisowe parametru.

$$SHAPE = \frac{0.25 \cdot p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} [-] \quad (8)$$

gdzie:

p_{ij} – obwód elementu krajobrazu ij [m],
pozostałe symbole jak we wzorze (2).

Wymiar fraktalny FRAC (ang.: *Fractal Dimension Index*) jest wskaźnikiem odzwierciedlającym złożoność kształtu płatów (9). Obliczany jest dla poziomu poszczególnych elementów. Dla poziomów kategorii i krajobrazu analiza wartości parametru oparta jest o proste statystyki opisowe. Wartości parametru zmieniają się w przedziale $<1; 2>$. Wskaźnik osiąga wartość minimalną, gdy płaty posiadają kształty zbliżone do prostych, dwuwymiarowych figur znanych z geometrii euklidesowej. Stopniowy wzrost wskaźnika do wartości 2 wskazuje na rosnący stopień komplikacji kształtów. Wymiar fraktalny FRAC jest odporny na zjawisko proporcjonalności (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012; Milne 1988; Urbański 2012).

$$FRAC = \frac{2 \cdot \ln(0.25 \cdot p_{ij})}{\ln a_{ij}} [-] \quad (9)$$

symbole jak we wzorach: (2) i (8).

3. Miary różnorodności

Liczba kategorii płatów PR (ang.: *Patch Richness*) jest chyba najprostszym względnym wskaźnikiem kompozycji krajobrazu (10). Jest obliczany na poziomie całego obszaru badań jako łączna liczba wszystkich kategorii płatów (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012).

$$PR = m [-] \quad (10)$$

gdzie:

m – liczba kategorii w krajobrazie.

Entropia, wskaźnik różnorodności Shannon'a-Weavera SHDI (ang.: *Shannon's Diversity Index*) jest parametrem mierzącym stopień powierzchniowego zróżnicowania cech (Shannon & Weaver 1949). Oblicza się go na poziomie krajobrazu (11). Wskaźnik może przyjmować wartości $<0; \ln m_{max}>$, gdzie m_{max} oznacza maksymalną liczbę typów płatów. SHDI ma wartość 0 gdy cały obszar badań obejmuje wyłącznie jeden płat (brak różnorodności). Wartość parametru wzrasta wraz wzrostem stopnia równomiernego pokrycia obszaru przez różne kategorie płatów oraz wraz ze wzrostem liczby kategorii (w mniejszym stopniu). Indeks Shannon'a jest bardziej wrażliwy od omawianego poniżej indeksu Simpson'a (SIDI) na obecność płatów o bardzo małej powierzchni. Jest także od niego nieco bardziej wrażliwy na obecność kategorii o niewielkiej liczbie elementów (McGarigal & Marks 1995; Kot & Leśniak 2006; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \cdot \ln P_i) [-] \quad (11)$$

gdzie:

P_i – proporcja danej kategorii w krajobrazie (prawdopodobieństwo wystąpienia w krajobrazie płata określonego typu),

$$P_i = \frac{\text{powierzchnia zajmowana przez } i - \text{tą kategorię}}{\text{powierzchnia pola podstawowego}} * 100\%$$

pozostałe symbole jak we wzorach: (2) i (10).

Wskaźnik różnorodności Simpson’a *SIDI* (ang.: *Simpson's Diversity Index*) jest parametrem obliczanym na poziomie krajobrazu. Opisuje prawdopodobieństwo zdarzenia, w którym dwie losowo wybrane komórki są położone wewnątrz płatów należących do dwóch odmiennych kategorii (12). Indeks przyjmuje wartości z przedziału $<0; 1>$. Wartość minimalną osiąga, gdy analizowany obszar zawiera wyłącznie jeden płat (brak różnorodności). Wzrost wartości indeksu postępuje wraz ze wzrostem liczby kategorii i stopniem równomiernego pokrycia przez nie całego obszaru badań. Wskaźnik Simpson’a jest mniej czuły na obecność rzadkich typów płatów i jest bardziej intuicyjny niż indeks Shannon’a (Simpson 1949; McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$SIDI = 1 - \sum_{i=1}^m P_i^2 \quad [-] \quad (12)$$

symbole jak we wzorach: (2), (10) i (11).

Wskaźnik równomierności Shannon’a *SHEI* (ang.: *Shannon's Evenness Index*) jest miarą proporcjonalnego rozmieszczenia płatów różnych kategorii w analizowanym obszarze (13). Oblicza się go dla poziomu krajobrazu. Wartości indeksu zmieniają się w przedziale $<0; 1>$. Minimalna wartość jest osiągnięta, gdy analizowany obszar w całości pokrywa wyłącznie jeden płat (brak różnorodności) lub gdy powierzchniowy rozkład kategorii staje się coraz bardziej nierówny. Maksymalną wartość wskaźnik osiąga wtedy gdy wszystkie kategorie występują w tych samych proporcjach. Różnica pomiędzy wartością maksymalną równomierności równą 1, a rzeczywistym poziomem wskaźnika równomierności *SHEI* nosi nazwę dominacji (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^m (P_i \cdot \ln P_i)}{\ln m} \quad [-] \quad (13)$$

symbole jak we wzorach: (2), (10) i (11).

4. Miary agregacji

Liczba płatów *NP* (ang.: *Number of Patches*) jest prostą miarą obliczaną na poziomie kategorii i całego krajobrazu. Na poziomie krajobrazu i poziomie kategorii wyraża liczbę płatów znajdujących się w obszarze badań (14). Wskaźnik często ma ograniczoną wartość interpretacyjną, ponieważ nie przekazuje żadnych informacji na

temat ich powierzchni, rozkładu, czy gęstości (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$NP = \sum_{i=1}^m n_i [-] \quad (14)$$

symbole jak we wzorach: (2), (3) i (10).

Gęstość płatów PD (ang.: *Patch Density*) to względna miara liczby płatów w przeliczeniu na 100 ha (15). Jest obliczana na poziomie kategorii oraz całego krajobrazu (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012).

$$PD = \frac{n_i}{A} \cdot (10000) \cdot (100) [\text{liczba}/100\text{ha}] \quad (15)$$

symbole jak we wzorach: (1) i (3).

Wskaźnik fragmentacji DIVISION (ang.: *Landscape Division Index*) wykorzystywany jest na poziomie kategorii i całego krajobrazu. W skali całego obszaru badań, opisuje prawdopodobieństwo zdarzenia, w którym dwie dowolne komórki podstawowe (piksele obrazu rastrowego) nie znajdą się w obrębie tego samego płata (16). Wartości wskaźnika zmieniają się w przedziale $<0; 1>$. Parametr osiąga swą wartość minimalną, gdy cały obszar badań objęty jest wyłącznie jednym płatem. Wartość maksymalna osiągana jest w przypadku, gdy każda komórka obrazu rastrowego stanowi pojedynczy płat (McGarigal & Marks 1995; Jaeger 2000; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$DIVISION = \left[1 - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{A} \right)^2 \right] [-] \quad (16)$$

symbole jak we wzorach: (1), (2) i (10).

Procent identycznego sąsiedztwa PLADJ (ang.: *Percentage of Like Adjacencies*) może być wykorzystywany na poziomie kategorii i całego obszaru badań. Na poziomie krajobrazu jest obliczamy jako stosunek sumy połączeń komórek danego typu z innymi komórkami tej samej kategorii, do sumy połączeń komórek danego typu z komórkami innych kategorii (17). Wartość wskaźnika jest wyrażana w procentach i zmienia się w zakresie 0–100%. Parametr osiąga wartość minimalną, kiedy komórki poszczególnych kategorii są maksymalnie rozproszone i żadna nie sąsiaduje z komórkami tej samej kategorii. Wartość wskaźnika rośnie wraz ze wzrostem stopnia skupienia (agregacji) komórek poszczególnych kategorii. Parametr osiąga wartość maksymalną, kiedy cały obszar badań w całości pokryty jest komórkami należącymi do jednej i tej samej kategorii (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$PLADJ = \left(\frac{\sum_{i=1}^m g_{ii}}{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \cdot 100 [\%] \quad (17)$$

gdzie:

g_{ii} – liczba połączeń pomiędzy komórkami danej kategorii z komórkami tej samej kategorii.
 g_{ik} – liczba połączeń pomiędzy komórkami danej kategorii z komórkami innych kategorii.

Wskaźnik agregacji AI (ang.: *Aggregation Index*) może być obliczany na poziomie kategorii i całego krajobrazu. W drugim przypadku wyraża średnią ważoną ze wskaźników agregacji obliczonych dla poszczególnych kategorii. Współczynnikami wag są wielkości pól powierzchni zajmowanych przez dany typ płatów (18). Wartości wskaźnika wyrażane są w procentach i zmieniają się w przedziale (0–100%). Wskaźnik przyjmuje wartość minimalną, gdy komórki poszczególnych kategorii są maksymalnie rozproszone. Jego wartość stopniowo wzrasta wraz ze wzrostem agregacji i gdy obszar badań składa się z jednego płata – osiąga 100% (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$AI = \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right) \cdot P_i \right] \cdot 100 [\%] \quad (18)$$

gdzie:

$\max \rightarrow g_{ii}$ – liczba połączeń pomiędzy komórkami danej kategorii z komórkami tej samej kategorii występująca przy maksymalnej agregacji.
 pozostałe symbole jak we wzorach: (2), (10) i (11).

Wskaźnik zróżnicowania granic IJI (ang.: *Interspersion and Juxtaposition Index*) jest obliczany na poziomie kategorii i całego krajobrazu. Jest miarą przestrzennej struktury zmienności płatów. Parametr oblicza z iloma typami sąsiadów graniczy dany element (19). Przy obliczeniach uwzględniana jest zróżnicowana długość granic klas. Parametr wyrażony jest w procentach, zmienia się więc w granicach 0–100%. Wartość minimalną osiąga, gdy płaty danego typu przylegają wyłącznie do jednego, innego typu płatów. Niezależnie od stopnia fragmentacji krajobrazu, dla ustalonej liczby kategorii, wartość maksymalną wskaźnik osiąga kiedy długości granic pomiędzy wszystkimi parami kategorii są jednakowe (McGarigal & Marks 1995; Kot & Leśniak 2006; McGarigal i in. 2012).

$$IJI = \frac{-\sum_{i=1}^m \sum_{k=i+1}^m \left[\left(\frac{e_{ik}}{E} \right) \cdot \ln \left(\frac{e_{ik}}{E} \right) \right]}{\ln(0.5[m(m-1)])} \cdot 100 [\%] \quad (19)$$

gdzie:

e_{ik} – łączna długość krawędzi pomiędzy elementami krajobrazu należącymi do kategorii i i k [m].
 pozostałe symbole jak we wzorach: (2), (6) i (10).

Odległość do najbliższego elementu danej kategorii ENN (ang.: *Euclidean Nearest-Neighbor Distance*) jest miarą obliczaną na poziomie elementów krajobrazu. Stanowi miarę izolacji płatów należących do jednej kategorii. Jest obliczany jako minimalna odległość pomiędzy elementami należącymi do tego samego typu płatów (20). W badaniach prowadzonej na poziomie całego krajobrazu analizowane są parametry statystyczne z zakresu statystyki opisowej. Odległość w obrazach rastrowych mierzona

jest pomiędzy środkami komórek krawędzi dwóch pól tej samej kategorii (McGarigal & Marks 1995; McGarigal i in. 2012; Urbański 2012).

$$ENN = h_{ij}[m] \quad (20)$$

gdzie:

h_{ij} – minimalna odległość elementu krajobrazu ij od elementu należącego do tej samej kategorii.

Bibliografia

Forman, R.T.T., & Godron, M., 1986. *Landscape Ecology*. Wiley and Sons, New York, 640.

Kot, R., Leśniak, K., 2006. Ocena georóżnorodności za pomocą miar krajobrazowych – podstawowe trudności metodyczne. *Przegląd Geograficzny*, 78(1), 25-45.

McGarigal, K., Cushman, S.A., Ene, E., 2012. *FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical and Continuous Maps*. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. URL: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html> (10.06.2013).

McGarigal, K., Marks, B.J., 1995, *FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. USDA Forest Service. Technical Reports, PNW-GTR-351, Portland, 132.

http://www.umass.edu/landeco/teaching/landscape_ecology/schedule/chapter9_metrics.pdf

Raines, G.L., 2002. Description and comparison of geological maps with FRAGSTATS – a spatial statistics program. *Computers and Geosciences*, 28, 169-177.

Simpson, E.H., 1949. Measurement of diversity. *Nature*, 163: 688-688.

Shannon C., Weaver W., 1949. The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press, Urbana, 144.

Urbański, J., 2011. *GIS w badaniach przyrodniczych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 252.

Zwierzchowska, I., Stępniewska, M., Łowicki, D., 2010. Możliwości wykorzystania programu Fragstats w badaniach środowiska przyrodniczego. *Przegląd Geograficzny*, 82(1), 85-102.