

## Análisis de la precisión de mapas de pendientes utilizando modelos digitales de terreno

O. COELHO PEREIRA NETO<sup>1</sup> & L. LIMBERGER<sup>2</sup>

*Departamento de Geociências – Universidade Estadual de Londrina, Rod. Celso Garcia Cid, Km 379, 86051-990, Londrina, PR, Brasil, coelho@uel.br<sup>(1)</sup> / leila@geo.uel.br<sup>(2)</sup>*

COELHO PEREIRA NETO, O. & L. LIMBERGER. 2004. Análisis de la precisión de mapas de pendientes utilizando modelos digitales de terreno. *Rev. Fac. Agron.* 105 (2): 97-103.

La cuenca de "Ribeirão Cafezal" es el segundo principal sistema de recepción de agua que abastece la ciudad de Londrina, al norte del Estado de Paraná - Brasil. Esta región presenta extensas áreas agrícolas, con diferente grado de utilización. La información de pendientes es fundamental en lo que se refiere a la elaboración de los más variados mapas que abordan los riesgos de erosión. En función de eso, fue realizado un análisis de la precisión en el mapeo, con la intención de obtener un mapa de pendientes lo más cercano a la realidad. Fueron generados mapas de pendientes, a partir de información digitalizada a escala 1:100.000, de un área representativa de la cuenca empleando dos métodos: por medio del cálculo de pendientes mediante la utilización de un ábaco gráfico (considerando como cierta la veracidad terrestre) y realizando el cálculo de pendientes utilizando herramientas de análisis de modelos digitales de terreno (con mallas de resolución 5x5, 15x15, 20x20, 25x25 y 50x50 metros). Posteriormente, esos planos fueron cruzados y analizados utilizando un sistema de información geográfica (GIS) a nivel de precisión del mapeo, según las ecuaciones adaptadas de Mendonça (1980). Los mejores resultados se obtuvieron con un modelo digital de terreno con una resolución de celda de 15x15 metros (71,50%), siendo esta, por consiguiente, la resolución final escogida en la confección del mapa de pendientes para toda el área de estudio. La prueba realizada se mostró satisfactoria para la obtención del análisis de la precisión del mapeo, en la confección del mapa de pendientes del terreno a través del GIS. De haber necesidad de una mayor precisión en la determinación de las clases de pendientes en algún proyecto más específico, el dato deberá ser obtenido a través del ábaco manual.

**Palabras Clave:** cuenca hidrográfica, pendientes, sistema de información geográfico, modelo digital de terreno, conservación del suelo.

COELHO PEREIRA NETO, O. & L. LIMBERGER. 2004. Accuracy analysis of the slope maps on Gis. *Rev. Fac. Agron.* 105 (2): 97-103.

The basin of "Ribeirão Cafezal" is the second main system of reception of water that supplies the municipality of Londrina, to the north of the State of Paraná - Brazil. This region presents extensive agricultural areas, with different exploration degrees. The slope information is fundamental to the elaboration of the several maps that approach the erosion hazards. So, an analysis of the precision was carried out in the mapping, for obtaining a slope map as close as possible to reality. Slope maps of a representative area of the basin were generated using two methods: the abacus (considering as the real slope terrain) and the GIS - Geographical Information System (with grid resolution 5x5, 15x15, 20x20, 25x25 and 50x50 meters). These maps were overlaid and the precision of the mapping was analyzed; the adjustment percentages and the omission and inclusion errors of the related maps were calculated, according to the equations of Mendonça (1980). From this analysis, the biggest adjustment percentage belongs to the cross-checked of the 15x15 meters resolution (71,50%); so, this is the resolution chosen in the making of the slope map for the whole study area. This test was satisfactory to the analysis of the precision of the mapping when constructing the slope terrain map using the GIS. In case that a specific project needs higher precision in the determination of the slope classes, it is recommended to use the manual abacus.

**Key Words:** basins, slope, GIS, digital terrain model, soil conservation.

## INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrográfica de "Ribeirão Cafezal" es el segundo principal sistema de recepción de agua que abastece la ciudad de Londrina, al norte del Estado de Paraná - Brasil. Esta región presenta extensas áreas agrícolas, con diferente grado de utilización. Las áreas donde la intensidad de utilización del suelo es mayor que la capacidad agrícola, sufren un proceso de erosión que tiende a disminuir los lechos de los ríos, comprometiendo el abastecimiento de agua de la ciudad.

Sayago (1986) destacó la información de pendientes como fundamental para la elaboración de los más variados mapas que tratan acerca de los riesgos de erosión. Considerando esta afirmación, el objetivo del presente trabajo fue analizar la precisión del mapeo con la intención de obtener un mapa de pendientes lo más cercano posible a la realidad, utilizando un Sistema de Información Geográfica (GIS).

Un GIS, es un sistema computacional capaz de almacenar, recuperar, integrar, manipular y visualizar diferentes informaciones de la superficie terrestre. Es utilizado en estudios relacionados al medio ambiente, considerado el hecho que los datos almacenados representen un modelo del mundo real (Burrough, 1986).

En un GIS, un mapa de pendiente es considerado como un Modelo Digital de Terreno (MDT), que es definido como un modelo matemático a ser procesado por computadora, que representa la variación continua del relieve en el espacio (Burrough, 1986). Makarovik (1976) considera que la fuente básica de datos de un MDT es el relieve del terreno o su modelo fotogramétrico.

Según Felgueiras (1987), cuando los puntos altimétricos muestreados en el terreno no son localizados sobre los puntos de la malla regular, que es lo más común, una interpolación es necesaria para ser estimados los valores de cotas en esos puntos. Para McCu-

llagh (1988), los nudos de la malla deben ser muestras precisas de la superficie que esta siendo modelada.

Pettinati (1983) define una malla regular como un modelo digital que aproxima las superficies a través de un poliedro de caras rectangulares. Los puntos centrales de cada poliedro pueden ser los propios puntos muestreados, en caso de que éstos hayan sido adquiridos en las mismas localidades (x, y), que definen la malla deseada.

Jenson & Domingue (1988) afirmaron que el procedimiento aplicado por ellos en la confección del mapa digital, al ser comparado con el mapa generado manualmente de la misma área, no coincidía bien; no obstante, fue verificado que el mapa presentaba errores, y que, después de corregidos, la coincidencia fue de 98%, lo que puede ser considerado como un punto para la extracción automática de rasgos topográficos, además del tiempo que puede ser economizado. Esta afirmación lleva a la hipótesis del presente trabajo, que pretende evaluar la menor precisión de los mapas digitales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La cuenca del "Ribeirão Cafezal" se localiza entre latitudes 23°16'30" y 23°22'30"S y longitudes 51°11'40" y 51°23'30"W, abarca parte de los municipios de Londrina, Cambé y Rolândia, al norte del Estado de Paraná - Brasil, con una área de aproximadamente 20 mil hectáreas, correspondiendo 12 mil a la cuenca de recepción de agua de la ciudad.

El relieve de la cuenca está caracterizado por una morfología formada por colinas redondeadas con pendientes extendidas y suaves. Las alturas topográficas se encuentran entre los 450 y 765 m.

En las áreas cercanas al nacimiento, los valles son amplios y abiertos, del medio de la cuenca caminando hacia su confluencia, los ríos son mas encajados, presentando suelos

profundos y bien desarrollados.

La información cartográfica de base estuvo constituida por: (a) mapa topográfico a escala 1:10.000 del Instituto de Tierras, Cartografía y Florestas - ITCF, con curvas de nivel a cada 5 metros, (b) base cartográfica a escala 1:50.000 y 1:100.000 (1965), del Instituto Brasileño de Geografía y Estadísticas - IBGE, con proyección "UTM - Córrego Alegre"; (c) el sistema de información geográfico SGI/INPE.

La escala del trabajo fue de 1:10.000, y la proyección cartográfica fue la "UTM-Córrego Alegre", por ser esas las características de la base de datos del trabajo.

La metodología de trabajo consistió en la creación de los mapas de pendientes de un área representativa de la cuenca a través de dos métodos (ábaco gráfico y digital). Las clases de declividad utilizadas siguieron la propuesta del Departamento de Geociencias de la Universidad Estatal de Londrina, y son los siguientes: (a) clase A: 0 a 2,5%; (b) clase B: 2,5% a 5%; (c) clase C: 5% a 10%; (d) clase D: 10% a 20%; (e) clase E: mayor que 20%.

En el primer método, se confeccionó un mapa de pendientes a través de un ábaco gráfico, utilizado manualmente sobre el mapa topográfico, obteniéndose directamente las clases de pendientes (Biasi, 1970). Ese mapa fue almacenado en el GIS, con la utilización de la mesa digitalizadora.

En el segundo método, los datos de pendientes fueron creados en el sistema SGI/INPE a partir del Modelo Digital de Terreno (MDT). La introducción de los datos de las curvas de nivel de la carta topográfica, fue a través de la mesa digitalizadora, juntamente con la inserción de las cotas altimétricas mediante el teclado. Fueron digitalizadas las curvas de nivel para toda el área de la cuenca; utilizándose solamente para este análisis una sub-área, por ser esta la más representativa de las condiciones del relieve.

En la fase siguiente, se interpolaron los datos con el método de Convolución Cúbica, por presentar mayor precisión que los restan-

tes métodos interpoladores. Fueron calculadas diferentes resoluciones de 5x5m, 20x20m y 50x50 m, sobre las cuales, posteriormente, fue aplicado un algoritmo de generación de mapas de pendientes en las clases anteriormente mencionadas.

Se obtuvieron, entonces, 4 planos de información (PI) para el sistema, llamados de: (1) "ábaco": pendientes a través del ábaco; (2) "sgi5": pendientes a través del SGI con malla de 5x5 m; (3) "sgi20": pendientes a través del SGI con malla de 20x20 m; (4) "sgi50": pendientes a través del SGI con malla de 50x50 m.

Fueron calculadas, para posterior análisis, las áreas (en hectáreas) de las clases de pendientes de cada PI.

La siguiente etapa abarcó la conversión y manipulación de esos 4 planos. Para ello, a través del algoritmo de conversión de la resolución, fueron generados los planos de información del ábaco en 5x5 m, 20x20 m y 50x50 m, ya que los planos a ser cruzados deben estar en la misma resolución.

Considerando el PI "ábaco" como la veracidad terrestre, se procedió al cruzamiento de este con los PI "sgi5", "sgi20" y "sgi50" con los respectivos del ábaco 5x5 m, 20x20 m y 50x50 m, obteniéndose tres planos de información (PI) resultantes: el PI "cz5", "cz20" y "cz50", respectivamente. Como se tienen 5 clases en cada PI de entrada, fueron obtenidas 25 clases en cada PI resultante. Fueron calculados los porcentajes de ajuste y los errores de la omisión y de inclusión de los PI relacionados (Figura 1), según las ecuaciones adaptadas de Mendonça (1980), expuestas en la metodología de Donzeli *et al.* (1983) y Pereira Neto & Valério Filho (1993):

- Porcentaje de ajuste de clasificación de la clase i:

$$PA_i = \frac{ACC_i}{AR_i} \times 100$$

- Porcentaje de error de omisión de la clase i:

$$EO_i = 100 - PA_i$$

- Porcentaje de error de inclusión de la clase i:

$$EI_i = \frac{AC_i - ACC_i}{AT - AR_i} \times 100$$

- Porcentaje total de ajuste:

$$PAT = \sum_{i=1}^N (w_i - PA_i) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{ACC_i}{AT} \right)$$

- Porcentaje de error de omisión total:

$$EOT = 100 - PAT = \sum_{i=1}^N (w_i \times EO_i)$$

- Factor de ponderación de la clase i:

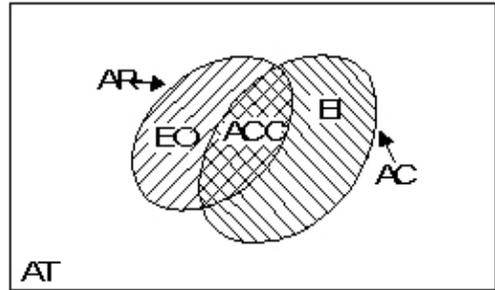
$$w_i = \frac{AR_i}{AT}$$

donde: AT = área total; AR = área real (verdad terrestre); AC = área clasificada por el SGI; ACC = área correctamente clasificada; N = número de clases de pendientes.

Del análisis de precisión del mapeo, fue seleccionado el cruzamiento que presentó el mayor porcentaje total de ajuste, con el objetivo de definir la mejor resolución espacial que conformara el plano de información "pendientes" de toda el área. Este plano final, fue elaborado entonces, siguiendo las mismas etapas ya mencionadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la precisión del mapeo se basó en la definición de la cantidad de datos a ser muestreados para la creación de una malla de resolución ideal que, según Makarovik (1976), es un factor importante. McCullagh



**Figura 1.** Esquema demostrativo de los elementos utilizados en la evaluación de los datos resultante de los cruzamientos (AT: área total; AR: área real; AC: área clasificada; ACC: área correctamente clasificada; EO: error de omisión; EI: error de inclusión). Fuente: Mendonça (1980).

*Demonstrative scheme of the utilized elements in the data evaluation from overlaying (AT: total area; AR: real area; AC: classified area; ACC: classified correctly area; EO: omission error; EI: inclusion error). Source: Mendonça (1980).*

(1988) confirma esta afirmación.

Los parámetros calculados para el análisis de la precisión son mostrados en la tabla 1. El mayor valor de porcentaje total de ajuste (PAT) revela en cuál de los cruzamientos la pendiente creada por el GIS es más semejante a la verdad terrestre (pendientes a través del ábaco). Ese valor corresponde al 71,43%, de los cruzamientos con resolución de 20x20 metros.

En el esfuerzo de aún obtener un mejor valor de PAT, se decidió hacer dos cruzamientos más, cubriendo las alternativas alrededor de la resolución vigente (20x20 m). Se tomó el mismo método de cruzamiento entre la pendientes a través del ábaco y la creada por el GIS, ya descrito anteriormente; por lo tanto, ahora, con resoluciones de 15x15 m y 25x25 m. Los nuevos parámetros calculados se presentan en la tabla 2.

Se observó que la mayor PAT perteneció al cruzamiento de resolución de 15x15 m (71,50%), siendo esta, por consiguiente, la resolución final escogida para crear el mapa

**Tabla 1.** Índices Resultantes de los Cruzamiento entre el Mapa Manual y los Mapas Digitales en las Resoluciones de 5x5 m, 20x20 m y 50x50 m.

Index from overlaying between manual and digital maps in the Resolution 5x5 m, 20x20 m and 50x50 m.

Res.	Clase	AR(ábaco)	AC(sgi)	ACC (ha)	PA(%)	EO(%)	EI(%)	PAT(%)	EOT(%)	
5	A	386,50	588,07	320,94	83,04	16,96	8,57			
	B	433,68	166,79	48,19	11,11	88,89	3,86			
	x	C	985,69	1140,85	659,01	66,86	33,14	19,13	62,89	37,11
	D	1437,31	1317,56	1009,94	70,27	29,73	14,88			
	5	E	260,81	290,73	165,38	63,41	36,59	3,87		
20	A	383,04	338,08	256,16	66,88	33,12	2,62			
	B	455,52	414,84	247,16	54,26	45,74	5,49			
	x	C	1044,80	1226,72	810,80	77,60	22,40	16,87	71,43	28,57
	D	1348,72	1318,28	1040,92	77,18	22,82	12,84			
	20	E	277,44	211,60	151,88	54,74	45,26	1,85		
50	A	375,00	280,75	203,50	54,27	45,73	2,45			
	B	504,25	515,25	266,00	52,75	47,25	8,25			
	x	C	1149,00	1245,50	768,00	66,84	33,16	20,10	62,09	37,91
	D	1190,00	1384,50	882,50	74,16	25,84	21,50			
	50	E	306,50	98,75	68,50	22,35	77,65	0,94		

AR: área real; AC: área clasificada; ACC: área correctamente clasificada; PA: porcentaje de ajuste; EO: error de omisión; EI: error de inclusión; PAT: porcentaje de ajuste total; EOT: error de omisión total.

**Tabla 2.** Índices Resultantes de los Cruzamiento entre el Mapa Manual y los Mapas Digitales en las Resoluciones de 15x15 m y 25x25 m.

Index from overlaying between manual and digital maps in the Resolution 15x15 m and 25x25 m.

Res.	Clase	AR(ábaco)	AC(sgi)	ACC (ha)	PA(%)	EO(%)	EI(%)	PAT(%)	EOT(%)	
15	A	385,06	396,76	284,10	73,78	26,22	3,61			
	B	449,01	339,93	201,51	44,88	55,12	4,53			
	X	C	1025,61	1250,30	808,69	78,85	21,15	17,79	71,50	28,50
	D	1375,83	1276,58	1046,31	76,05	23,95	10,80			
	15	E	271,68	243,63	166,99	61,47	38,53	2,37		
25	A	382,18	322,75	246,12	64,40	35,60	2,45			
	B	462,25	445,87	259,50	56,14	43,86	6,11			
	X	C	1063,43	1208,25	802,75	75,49	24,51	16,56	70,61	29,39
	D	1321,87	1345,93	1030,37	77,95	22,05	14,41			
	25	E	282,31	189,25	141,12	49,99	50,01	1,49		

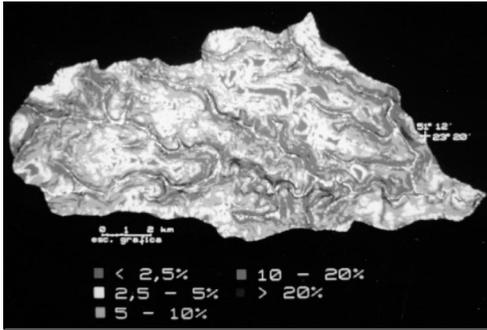
AR: área real; AC: área clasificada; ACC: área correctamente clasificada; PA: porcentaje de ajuste; EO: error de omisión; EI: error de inclusión; PAT: porcentaje de ajuste total; EOT: error de omisión total.

de pendientes de toda el área de estudio, según la Figura 2.

Conforme verificaron Jenson & Domingue (1988), el mapa de pendientes generado a tra-

vés del ábaco puede contener algún error en su confección, hecho este que comprometería el valor del porcentaje total de ajuste.

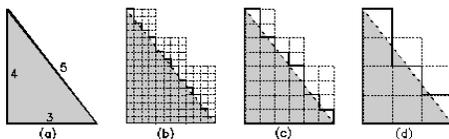
Las tablas fueron obtenidas a través del



**Figura 2.** Mapa de pendientes del área de estudio. Slope map of the study area.

cruzamiento de una misma área; sin embargo, los valores del área total (AT) de cada tabla fueron diferentes (Tabla 3). La Figura 3 (a) muestra un polígono original con área igual a 6 unidades cuadradas ( $u^2$ ). Cuando el polígono fue transformado en formato "raster" con resolución de  $0,25 \times 0,25$  (b), su área aumentó a  $6,25u^2$ . Cuando transformado con resolución de  $0,5 \times 0,5$  (c), el área estuvo en  $6,5u^2$ ; y en la resolución (d), se obtuvo  $7u^2$ . Observamos que, según disminuye la resolución, el área del polígono aumenta, lo que ocurre igualmente con los valores de AT de la tabla 3, siendo esto una limitación inherente a la estructura del dato "raster".

Según aumenta la resolución del polígono, el área del mismo tiende a igualarse al área vectorial (Figura 3a). Observándose que, en



**Figura 3 -** Relación entre la resolución y el área del polígono. (a)  $6u^2$ , (b)  $6,25u^2$ , (c)  $6,5u^2$  y (d)  $7u^2$ . Fuente: Adaptado de Burrough, (1986, p.20).

Relation between polygon resolution and area. (a)  $6u^2$ , (b)  $6,25u^2$ , (c)  $6,5u^2$  and (d)  $7u^2$ . Source: Adaptado de Burrough, (1986, p.20).

**Tabla 3.** Área Total (AT) resultante de los cruzamientos en las diferentes resoluciones.

Total Area (AT) from overlaying on different resolutions.

Tabla	Resolución (m)	Área total (ha)
Tabla 1	5 x 5	3504,00
Tabla 2	15 x 15	3507,21
Tabla 1	20 x 20	3509,52
Tabla 2	25 x 25	3512,06
Tabla 1	50 x 50	3524,75

las resoluciones menores (píxel mayor), una gran parte del píxel que delimita un polígono (Figura 3d) está situado fuera de su borde vectorial, siendo esas fracciones contabilizadas a más, considerándose por lo tanto parte del polígono.

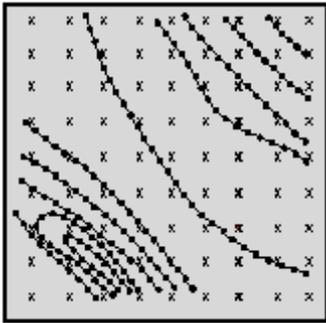
Con relación al valor del área de pendientes de las clases, se observa, en la resolución de  $5 \times 5$  m, un aumento en el área clasificada (CA) como clase A, y una disminución en la clase B, cuando es comparada con los otros cruzamientos. Para explicar esto, es considerado el concepto de malla regular.

Ese sistema de mallas regular, según Burrough (1986), presenta ciertas desventajas:

(a) La gran cantidad de datos repetidos en áreas de relieve uniforme (figura 4) explicaría la diferencia de estos datos obtenidos, en que el sistema pudiera sobreestimar el área de la clase A (terreno más llano, con curvas de nivel más distantes) en perjuicio de la clase B. Gomes (1989) comenta que las áreas con relieve uniforme son pobremente muestreadas en función de la mayor distancia entre las curvas de nivel, lo que hace el modelo susceptible a errores.

(b) Si fuera posible al sistema modificar el tamaño de la malla para adaptarse a áreas de relieve de mayor o menor complejidad, las limitaciones mencionadas dejarían probablemente de existir.

Sin embargo, en el mismo cruzamiento, la resolución de  $5 \times 5$  m fue favorable para la



**Figura 4.** Puntos muestreados irregularmente en una área hipotética en la fase de digitalización de las curvas de nivel (■), y los puntos interpolados por el software (x). Fuente: Adaptado de Burrough, (1986, p.44).

*Irregularly sampled points on hypothetical area in the digitalization stage (■), and the interpolated points on software (x). Source: Adaptado de Burrough, (1986, p.44).*

clasificación de áreas con pendientes acentuada; el área correctamente clasificada (ACC) como clase E (165,38 hectáreas) fue mayor que todos los otros cruzamientos

Según lo expuesto se observa que, mientras más fina es la resolución escogida, mayor será la repetición de los datos en el área más llana. Existiendo por tanto, una íntima relación entre la resolución de la malla y la distancia entre las muestras obtenidas (equidistancia entre las curvas de nivel).

## CONCLUSIONES

(a) Para una mayor exactitud en el delineamiento de las clases de pendientes este dato deberá obtenido a través del ábaco.

(b) Para dar una continuidad al análisis metodológico de este trabajo, se propone utilizar otros modelos de mallas (por ejemplo, a "Triangular Irregular Network").

## BIBLIOGRAFIA

- Burrough, P. A.** 1986. Principles of Geographical Information Systems for land resources assessment. Oxford University Press, New York. 138pp.
- Biasi, M.** 1970. Carta de declividade e de vertentes: confecção e utilização. Boletim de Geomorfologia da Universidade de São Paulo. 21: 15pp.
- Donzeli, P. L.** 1983. Imagens orbitais e de radar na definição de padrões fisiográficos aplicados ao solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 7: 89-94.
- Felgueiras, C. A.** 1987. Desenvolvimento de um sistema de modelagem digital de terreno para microcomputador. INPE, São José dos Campos. INPE-4406-TDL/303. 243 pp.
- Gomes, W.** 1989. Amostragem e interpolações em modelos digitais de terreno. INPE, São José dos Campos. INPE-5041-TDL/404. 111 pp.
- Jenson, S. K. & J. O. Domingue.** 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information systems analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.54: 1593-1600.
- Makarovik, B.** 1976. A digital terrain model system. ITC Journal. 1: 57-83.
- Mccullagh, M. J.** 1988. Terrain and surface modeling systems: theory and practice. Photogrammetric Record 12: 747-749.
- Mendonça, F. J.** 1980. Uso de dados LANDSAT para avaliar áreas ocupadas com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. INPE, São José dos Campos. INPE-1713-TDL/023.154pp.
- Pereira Neto, O. C. & M. Valério Filho.** 1993. Análise comparativa de métodos para elaboração de cartas de declividade aplicadas a estudos do meio físico. Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. INPE, Brasil. pp. 54-67.
- Pettinati, F.** 1983. Modelagem digital e representação gráfica de superfícies. Escola Politécnica da USP. São Paulo. 86 pp.
- Sayago, J. M.** 1986. Small scale erosion hazard mapping using Landsat information in the northwest of Argentina. International Symposium on Remote Sensing for Resources Develop. and Environ. Management. Enschede-Netherlands. pp. 669-674.