

## APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE FOURIER AO TRATAMENTO DE IMAGENS, COM EXEMPLOS DE ÁREAS EM MOÇAMBIQUE E EM PORTUGAL

A utilização de técnicas de pesquisa elaboradas por variados ramos do conhecimento científico é usual entre os geógrafos; e tendem a ser tanto mais diversificadas quanto mais complexo for o grau de polimatia <sup>(1)</sup> da investigação.

Quer se destinem ao estudo directo dos fenómenos, quer à análise de documentos, as técnicas são, na sua maioria, fundamentadas em princípios teorizados por leis físicas e matemáticas, ainda que algumas não se expressem por valores quantitativos.

Uma técnica a que até agora pouco se tem recorrido em estudos de Geografia consiste na aplicação dos princípios da óptica geométrica de Huygens-Fresnel à difracção das ondas planas (difracção de Fraunhofer), de modo a obter a transformada ou derivada de Fourier. Assim, fenómenos sujeitos a um movimento de propagação ondulatória (ondas, marés, radiações e outros <sup>(2)</sup>), ou registos desse movimento (fotografias ou imagens digitalizadas), são susceptíveis de ser submetidos a esse tratamento.

A presente nota trata da aplicação da transformada de Fourier à análise de fotografias verticais, aéreas ou não, e de imagens obtidas a partir dos registos numéricos fornecidos pelo sistema multispectral dos satélites Landsat.

### 1. FUNDAMENTAÇÃO DA TÉCNICA

A sensibilidade visual da retina do globo ocular humano é limitada a uma banda do espectro solar, convencionalmente definida entre 400 e 700 nm de comprimento de onda, com um máximo na radiação verde — 550 nm (fig. 1). Segundo KALITÉEVSKI (1980), esse facto resultou de uma adaptação do sentido da visão às condições ambientais do planeta; experiências de óptica fisiológica demonstram que não só as fronteiras da percepção visual são variáveis, em especial na passagem à banda do infravermelho próximo (a radiação vermelho-vivo de um laser de gás —  $\lambda$  850 nm — é perfeitamente visível), como não são separáveis comprimentos de onda muito próximos.

<sup>(1)</sup> Vocábulo proposto por ORLANDO RIBEIRO para substituir "pluridisciplinaridade"

<sup>(2)</sup> Fenómenos de difusão, como a moda — sugestão de DIOGO ABREU.

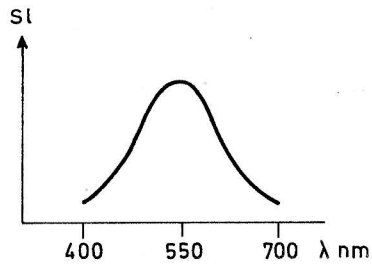


Fig. 1 — Variação da sensibilidade da retina do globo ocular humano com o comprimento de onda ( $\lambda$ ) da radiação luminosa, segundo Kalitévski (1980).

A visualização directa das imagens fotográficas está, então, aquém das possibilidades de informação que esses documentos podem oferecer. Entre os vários processos de tratamento que permitem melhorar a sua percepção qualitativa e quantitativa encontra-se o da difracção óptica bidimensional de Fourier.

O processo consiste em submeter uma imagem transparente ou semitransparente à incidência ortogonal de um feixe de raios paralelos de luz coerente, em regra raios laser, devido ao seu grande brilho e, porque, sendo uma radiação monocromática, se transmite por uma onda harmónica e, portanto, plana.

Na figura 2 estão representados os mecanismos e as funções da transformação da imagem. Para garantir o paralelismo dos raios emitidos pela fonte laser (F1) coloca-se, entre esta e a imagem transparente a analisar ( $P_i$ ), uma lente colimadora (L). Cada ponto iluminado da imagem funciona, então, como um novo emissor de raios luminosos que, por interferência com os da fonte laser original (princípio de Huygens), criam, ao atravessar uma lente convergente ( $L_1$ ), o espectro de difracção bidimensional de Fourier ( $P_{i1}$ ), também conhecido por derivada ou transformada de Fourier. O fenómeno repetir-se-ia indefinidamente, se não fosse colocado um filtro polarizador no plano focal da lente; aí, o espectro de difracção pode ser visualizado e/ou registado, quer numa película fotográfica, quer num espectrograma (através de uma célula fotoeléctrica — NYBERG, S. et al, 1971). No primeiro registo obtém-se a imagem do espectro; no segundo, a curva de distribuição da função transformada.

Analisado o espectro, procede-se à filtragem, introduzindo, no mesmo plano, filtros (F) que seleccionam direcções (uma ou várias) ou frequências espaciais. A imagem filtrada ( $P_{i2}$ ) é recolhida no plano focal de outra lente convergente ( $L_2$ ) que a polariza e inverte. Por consequência das propriedades da difracção (inversão e simetria), o espectro de Fourier é uma imagem inversa da original e simétrica relativamente ao centro. A maior parte do fluxo luminoso que, devido à proximidade do eixo óptico, não é ou é pouco difractado, concentra-se na parte central do espectro, no espaço correspondente ao intervalo definido por

$$\text{sen } d = \pm \frac{\lambda}{b}$$

sendo  $d$  o ângulo de difracção,  $\lambda$  o comprimento da onda laser e  $b$  a abertura do tubo do sistema óptico (AB, fig. 2).

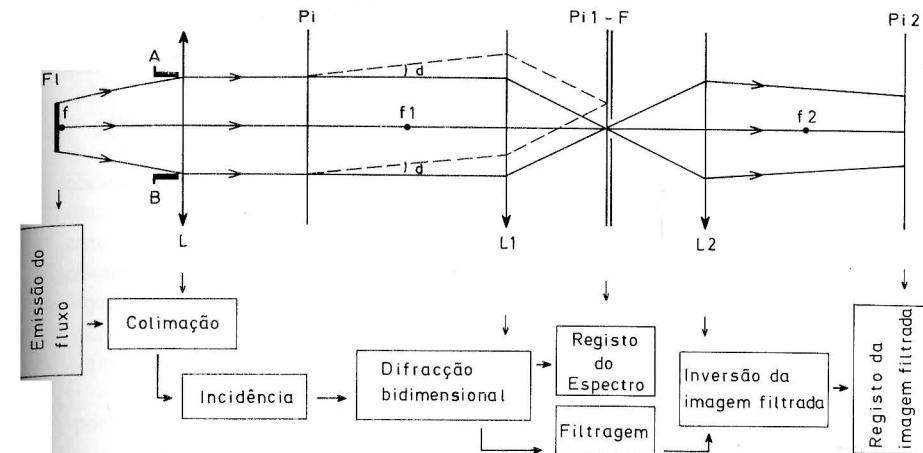


Fig. 2 — Esquema do processo e dos mecanismos da difracção óptica seguida de filtragem, numa imagem transparente submetida a um feixe de raios laser.

F1 — Fonte luminosa (laser), AB — Abertura do tubo laser, L — Lente colimadora,  $P_i$  — Plano da imagem original,  $L_1$  — Lente convergente,  $P_{i1}$  — Plano da imagem espectral e da filtragem, F — Filtro,  $L_2$  — Lente convergente,  $P_{i2}$  — Plano da imagem filtrada,  $d$  — ângulo de difracção, F — Focos das lentes.

A existência, na imagem original, de elementos lineares alinhados, origina um aspecto com alongamentos da mancha luminosa na direcção perpendicular à dos alinhamentos iniciais (por inversão). Os pontos luminosos dispersos ou agrupados em franjas de difracção concêntricas correspondem, no espectro de Fourier, aos elementos não alinhados da imagem original.

Uma pequena parte do fluxo (2% a 5% — KALITÉVSKI, 1980) é desviada nas direcções dos planos da abertura do tubo, se esta for rectangular ou quadrada, notando-se, no espectro, duas linhas de pontos luminosos cruzados ortogonalmente no centro. No caso de um tubo de abertura circular, os referidos pontos luminosos formam, no espectro, um anel concêntrico. Em alguns espectroscópios, tecnicamente mais evoluídos, o efeito de difracção da abertura é reduzido, para evitar sobreposições com eventuais linhas de orientação de elementos da imagem. Pela mesma razão deve evitar-se qualquer esquadria na imagem transparente a analisar.

Pelo que ficou exposto conclui-se que o tratamento óptico das imagens fotográficas, a partir do espectro de Fourier, pode ser feito proveitosamente, quando a imagem contém elementos lineares orientados ou, quando se supõe que os pode conter, sem que sejam perceptíveis através da visão.

## 2. ENSAIOS DA SUA APLICAÇÃO

Esta técnica tem sido aplicada, com êxito, em estudos de tectónica e hidrogeologia — na distribuição espacial das fracturas (DOBRIN, 1968; DROGUE et al, 1975); de oceanografia — na caracterização dos parâmetros e modificações das

ondas (GUY, 1969); de geomorfologia — na organização de campos de dunas e estudo indirecto de regimes eólicos (VERSTAPPEN, 1974); de glaciologia — na avaliação do índice de plasticidade no gelo e da rugosidade do leito dos glaciares, através da direcção e da frequência das fendas (BAUER *et al.*, 1967; VERSTAPPEN, 1974); e, ainda na análise de estruturas urbanas e de campos arqueológicos (SOYER *et al.*, 1970).

Os ensaios de aplicação que aqui se apresentam incidem sobre estudos de rede hidrográfica, de ondulação e de uma estrutura sedimentar. O tratamento óptico das imagens foi feito no Laboratório de Espectroscopia e Óptica do Corpo Sólido da Universidade Louis Pasteur de Strasbourg, em 1976, sob orientação do Professor MICHEL GROSSMANN; J. TRAUTMANN e E. SOUBARI auxiliaram na preparação laboratorial das imagens.

### 2.1. *Orientação da rede de drenagem dos rios Impamputo e Gumbe no planalto da Namaacha — Singuila (Moçambique)*

O planalto da Namaacha — Singuila situa-se nos Montes Libombos, no sudoeste de Moçambique, numa região de rochas riolíticas não alteradas, mas profundamente fracturadas. Os cursos de água estão organizados numa rede de tipo reticular que segue os alinhamentos de fractura, e caracterizam-se por um regime esporádico ou sazonal; como a infiltração é importante em determinadas direcções com elevado índice de permeabilidade secundária, o regime dos cursos muito encaixados na superfície planáltica e dos de planície é mais ponderado, comportando-se o sistema hidrológico como pseudocársico.

Em princípio, a análise da rede hidrográfica poderia ter sido feita directamente a partir da fotografia aérea, mas a presença de outros elementos da imagem com disposição linear (vias de comunicação, limites de parcelas, alinhamentos de cornijas) falsearia o espectro da orientação dos talvegues. Por isso, a rede hidrográfica de uma área de amostragem com 120 km<sup>2</sup> foi desenhada a partir de um mosaico compensado, na escala de 1:50 000; desta imagem obteve-se um filme positivo (est. I A) sobre o qual se faz incidir o feixe de raios laser. No espectro de Fourier, recolhido por uma câmara fotográfica (est. I B), observa-se que a mancha de dispersão dos pontos luminosos apresenta uma faixa de concentração de intensidade na direcção NNW-SSE (recorde-se que a imagem espectral é inversa da imagem objecto). Na curva do espectrograma (est. II A), que representa a distribuição direccional da função inversa da transformada de Fourier [ $f(FT)^{-1}$ ] (com escala arbitrária), observa-se que o máximo se localiza num eixo com direcção N 10° E. Para obter a repartição espacial dos segmentos da rede com esta orientação, procedeu-se à filtragem do espectro, isolando apenas esta direcção e inverteu-se a imagem transformada e filtrada (est. II B).

Ao relacionar a direcção predominante da rede, com a sua distribuição hierárquica, o seu regime hidrológico e a distribuição da rede de fracturas (Moreira-Lopes, 1979), foi possível prever a localização dos principais eixos de abastecimento da circulação freática e inventariar as nascentes responsáveis pela ponderação dos cursos que correm abaixo de 100 m de altitude, de modo a

planear a instalação de açudes e outras obras de regularização e aproveitamento hídrico dos referidos rios, subafluentes do rio Umbelúzi.

### 2.2. *Orientação das ondas na Ponta Dobela — litoral da Província de Maputo (Moçambique)*

Neste ensaio, bem como no que se segue (2.3.) não são expostas todas as fases do tratamento óptico das imagens, por terem sido apresentados no caso anterior (2.1.).

Pretendeu-se analisar a direcção dos sistemas de ondas ao largo da Ponta Dobela, onde fora prevista a instalação da terminal oceânica do porto de Maputo.

A imagem transparente destinada à difracção óptica foi obtida directamente a partir da fotografia aérea (escala aproximada de 1:20 000), numa área de amostragem com 1 km<sup>2</sup> de superfície (est. III A).

No espectro obtido (est. III B) observa-se que o alongamento máximo corresponde à direcção dominante das cristas das ondas incidentes, vindas do largo com orientação leste-oeste (est. III C); os máximos secundários, melhor observáveis no espectrograma do que no espectro, referem-se às direcções das ondas de interferência resultantes do encontro das ondas incidentes com as reflectidas e difractadas pela costa.

Tendo em conta que o tipo de ondulação representado na imagem analisada (de 28 de Outubro) corresponde ao estado mais frequente da superfície do mar, com ondas do largo devidas ao varrido (*fetch*) dos ventos alíseos, é de notar que, nesta área, o efeito das ondas deformadas (máximos secundários acumulados) é quase tão importante como o das incidentes.

### 2.3. *Orientações de uma estrutura sedimentar nos eolianitos da arriba da Ponta Ponduíne (ilha de Inhaca, Moçambique)*

Neste ensaio, o documento submetido à análise espectrográfica foi uma simples fotografia, feita perpendicularmente à superfície da arriba (est. IV A). A imagem reproduz uma estratificação entrecruzada com lenticulas muito alongadas, num arenito identificado como eolianito. Pretendeu-se caracterizar as orientações dominantes dos planos de estratificação, de modo a estabelecer a posição do corte relativamente à forma dunar.

Tanto o espectro (est. IV B) como a curva do espectrograma (est. IV C) permitem reconhecer duas orientações condominantes, quase paralelas. Uma coincide com a actual direcção dos ventos mais frequentes no litoral do sul de Moçambique (SSE-NNW); a outra parece corresponder à circulação do fluxo de contorno da baía de Maputo, aqui com direcção SSW-NNE.

## 3. ENSAIO DE APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE FOURIER AO TRATAMENTO DAS IMAGENS LANDSAT

Neste caso não há tratamento óptico; o processo consiste no cálculo da derivada de Fourier dos valores de luminância dos elementos da imagem (*pixels*). Estes valores correspondem à radiação luminosa reflectida pela superfície terrestre.

captados pelos radiómetros dos satélites Landsat e registados em bandas magnéticas, sob a forma digital, nas estações de recepção de dados.

Com a aplicação da transformada de Fourier aos valores unispectrais pretende-se depurar a imagem original dos chamados "ruídos", ou sejam perturbações resultantes da interferência atmosférica na propagação das ondas luminosas. Esta operação consiste na filtragem do espectro de Fourier, obtido através de um filtro cuja distância de frequência de corte (D0) é calculada a partir da análise da dispersão do espectro (visualizado num sistema de televisão ou impresso). A imagem filtrada e invertida (pela aplicação da função inversa da transformada de Fourier) aparece simplificada, em especial nas faixas de transição entre unidades de paisagem com fraco contraste de cor e brilho.

Aqui se apresenta um exemplo desta aplicação da transformada de Fourier seguida de filtragem dos valores de luminância, no canal MSS 6 ( $\lambda$  600-700 nm), da imagem fornecida pelo satélite Landsat 2 em 28.8.1978, referente à extremidade da restinga de Tróia (est. V).

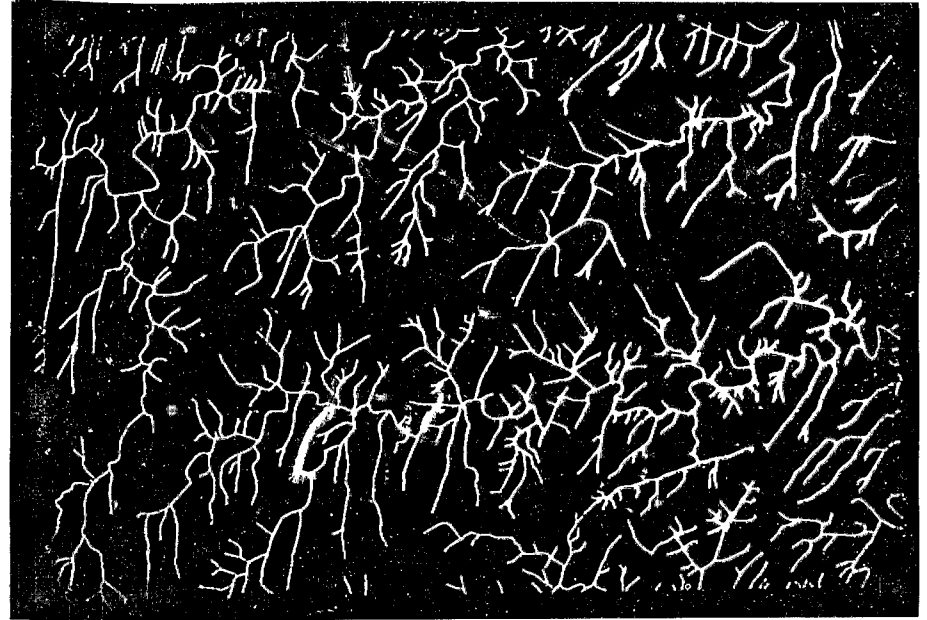
Todo o processamento digital foi executado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa, utilizando a banda magnética e os programas de tratamento de imagens de Detecção Remota desta instituição, sob orientação do Engenheiro EDUARDO DE OLIVEIRA.

O objectivo do trabalho foi apenas experimentar a técnica, para observar até que ponto a simplificação da imagem eliminaria os pormenores no litoral. A partir do espectro de Fourier (est. VI), caracterizado por um alongamento com direcção perpendicular à da restinga de Tróia, fizeram-se tentativas de filtragem, experimentando várias frequências de corte com um filtro passa-baixo de Butterworth; escolhida a frequência que pareceu minimizar a perda de detalhes (est. VII), filtrou-se e inverteu-se a imagem (est. VIII). Repetindo o processamento para os valores dos restantes canais MSS, obtêm-se os quatro ficheiros filtrados, que servirão de base para a classificação das unidades da paisagem ou do tema que se pretende estudar. A escolha da frequência de corte do filtro deve merecer muita atenção, porque ao eliminar os pormenores, sobretudo em estudos de áreas de contactos em que estes são importantes — litorais, lagos e albufeiras, canais fluviais, ecoclines, etc. —, corre-se o risco de perder informação. Pelo contrário, em estudos de grande escala espacial, a filtragem regulariza os contornos.

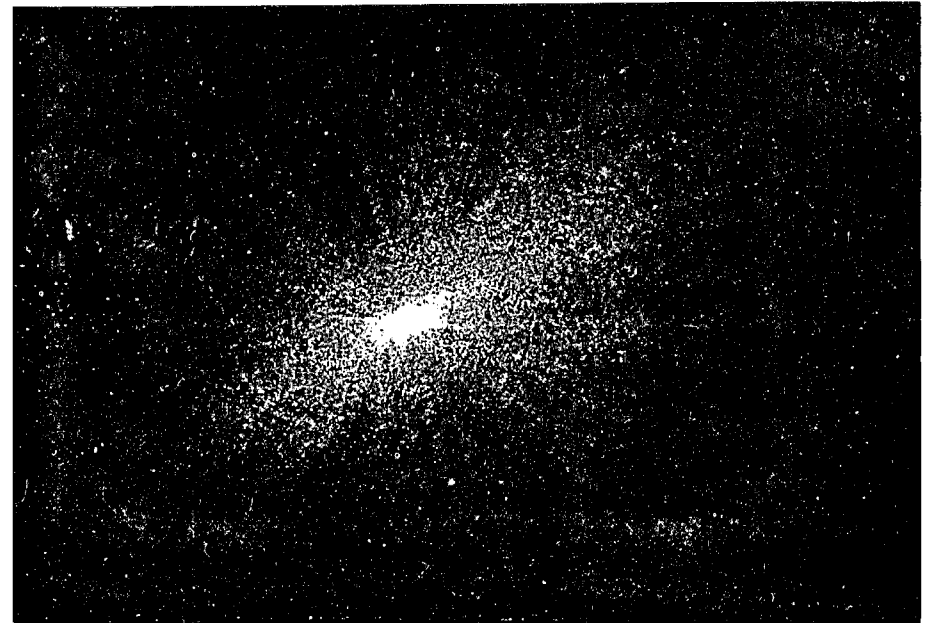
M. EUGENIA S.A. MOREIRA

## BIBLIOGRAFIA

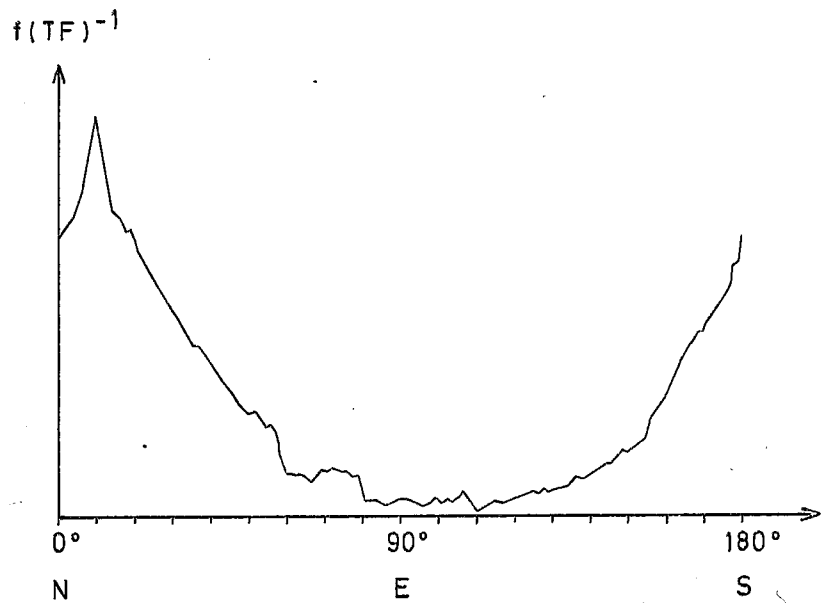
- BAUER, A.; FONTANEL, A. e GRAU, G., "The Application of Optical Filtering in Coherent Light to the Study of Aerial Photographs of Greenland Glaciers". *Journal of Glaciology*, 6, 48, 1967, pp. 43-65.
- DOBRIN, M.M., "Optical Processing in the Earth Sciences". *Spectrum*, 5, 9, 1968, pp. 59-66.
- DROGUE, C.; MAS, G.; GRILLOT, J.C.; LLORIA, C. e GUERIN, R., "Utilisation du filtrage optique pour l'étude de la fracturation en hydrogéologie des roches carbonatées". *Rev. Géogr. phys. Géol. dynam.* (2), 27, 1, 1975, pp. 39-44.
- DUFFIEUX, P.M., *L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique*. Besançon. Faculté de Sciences, 1946.
- FONTANEL, A.; GRAU, G.; LAURENT, J. e MONTADERT, L., "Méthode d'étude et depouillement des photographies aériennes par diffraction de la lumière cohérente issue d'un laser". Actes du II<sup>e</sup> Symposium International de Photo-interprétation, 1967. *Archives internationales de photogrammétrie*, 16, 1967.
- GRILLOT, J.C. e GUERIN, R., "Tectonique, microtectonique et directions des écoulements souterrains: exemple de relations dans le bassin karstique du Haut-Vidourle (Gard, France). *Rev. Géogr. phys. Géol. dynam.* (2), 27, 1, 1975, pp. 45-60.
- GUY, M., "L'analyse fine de la houle par diffraction optique". *Rev. Photo-interprétation*, 4, 1 e 2, 1969, pp. 8-10.
- HORMANN, K., "Geomorphologische Kartenanalyse mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen". *Zeitschr. Geomorph.*, 13, 1, 1968, pp. 75-98.
- KALITEEVSKI, N., *Optique ondulatoire*, tradução do russo por S. Medvédev. Moscovo, MIR, 1980, 451 p.
- MOREIRA-LOPES, M.E.S.A., *A Baía do Rio Umbelúzi (Moçambique). Estudo Geomorfológico*. Lisboa, Centro de Estudos Geográficos, 1979, 337 p. pol. + Anexos.
- NYBERG, S.; ORHAUG, T. e SVENSSON, H., "Optical Processing for Pattern Properties". *Lund Studies in Geography*, A, 50, 1971, pp. 547-554.
- SOYER, A. et al., *Manuel de Photointerprétation*. Paris, Technip, 1970, 248 p.
- VERSTAPPEN, H. Th., "On Quantitative Image Analysis and the Study of Terrain". *ITC Journal*, 3, 1974, pp. 395-413.



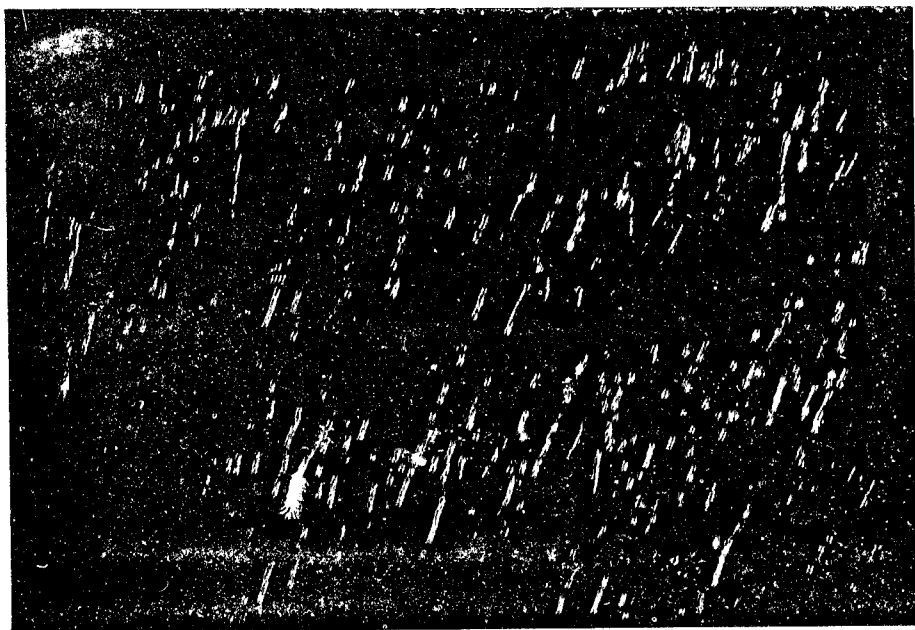
*Est. 1-A* — Imagem original, representando o traçado da rede hidrográfica dos rios Impamputo e Gumbe (Moçambique) numa área de amostragem de 120 km<sup>2</sup>.



*Est. 1-B* — Espectro de Fourier da imagem anterior.



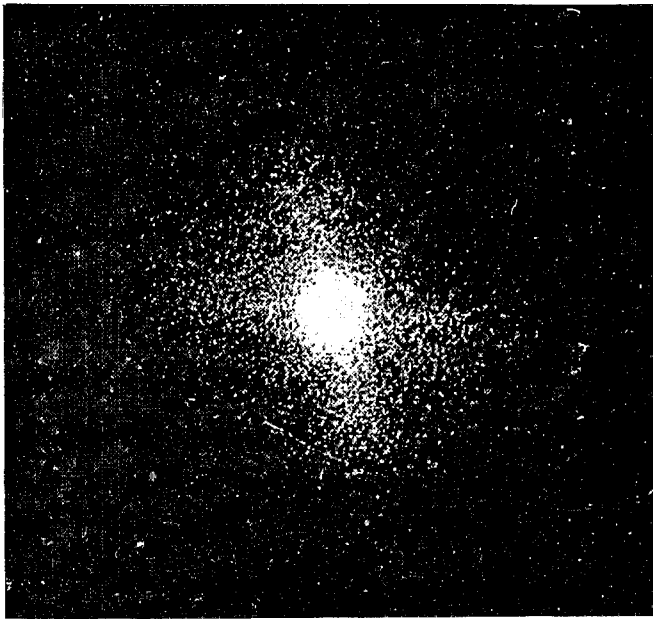
Est. II-A — Espectrograma, representando a curva da distribuição direccional (relativa ao Norte) da função inversa da transformada de Fourier,  $f(FT)^{-1}$ , da imagem da estampa I-B.



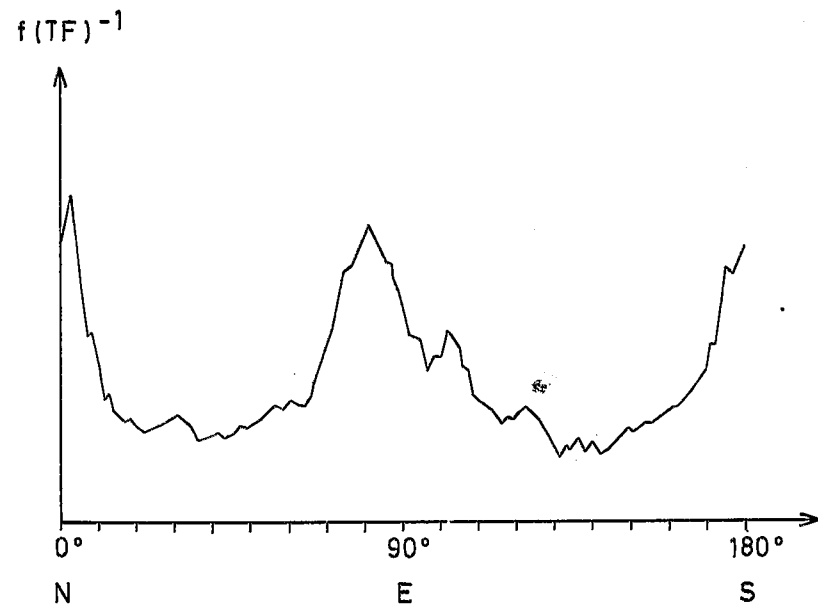
Est. II-B — Imagem da rede hidrográfica dos rios Impamputo e Gumbe filtrada na direcção predominante (N 10° E).



Est. III-A — Imagem original, representando a ondulação ao largo da Ponta Dobela (Moçambique).



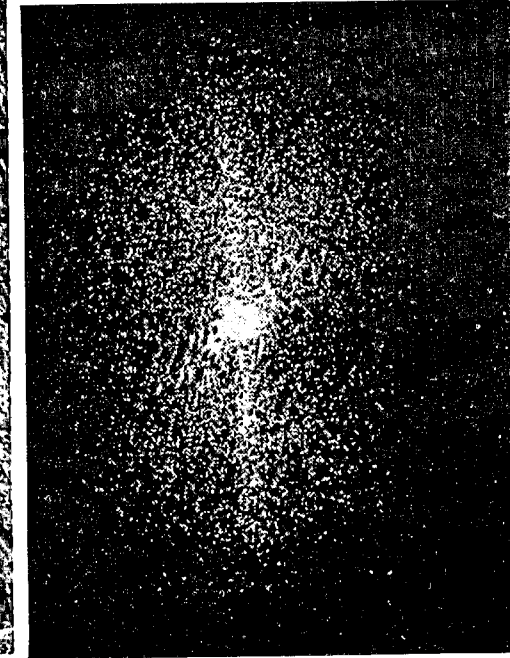
Est. III-B — Espectro de Fourier da imagem anterior.



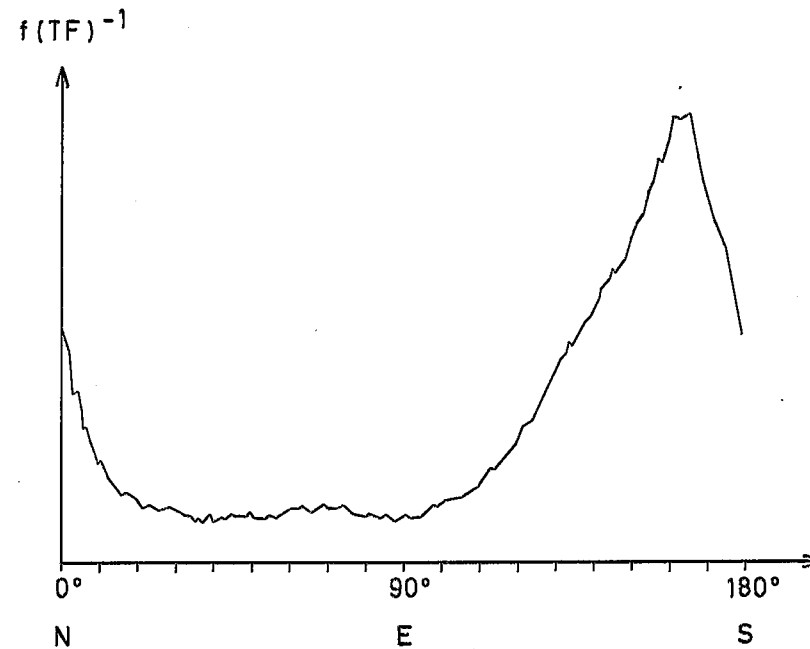
Est. III-C — Espectrograma, representando a curva da distribuição direccional (relativa ao Norte) da função inversa da transformada de Fourier,  $f(FT)^{-1}$ , da imagem da estampa III-B.



Est. IV-A — Imagem original, representando uma estrutura sedimentar de tipo entrecruzada lenticular, nos eolianitos da arriba da Ponta Pondeine (ilha da Inhaca — Moçambique).

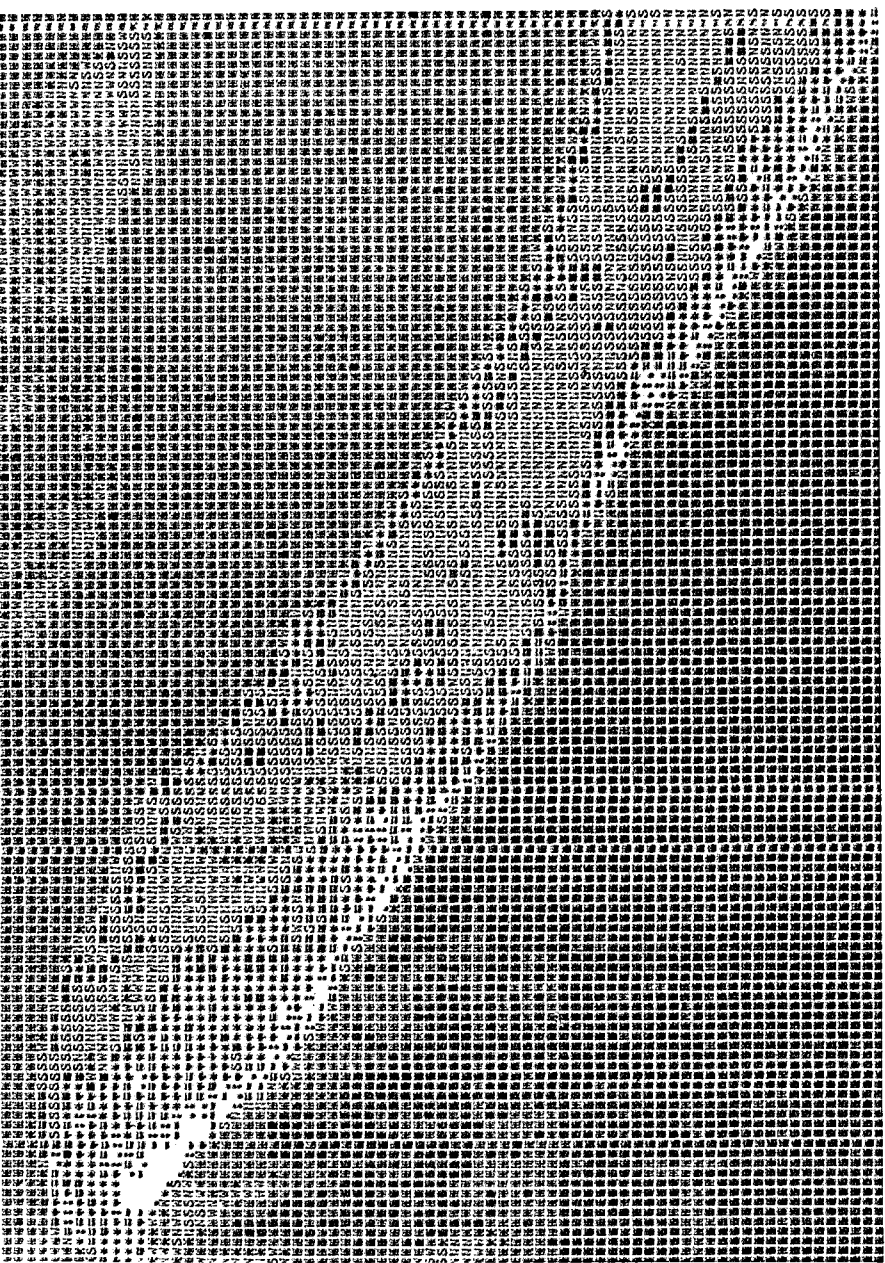


Est. IV-B — Espectro de Fourier da imagem anterior.

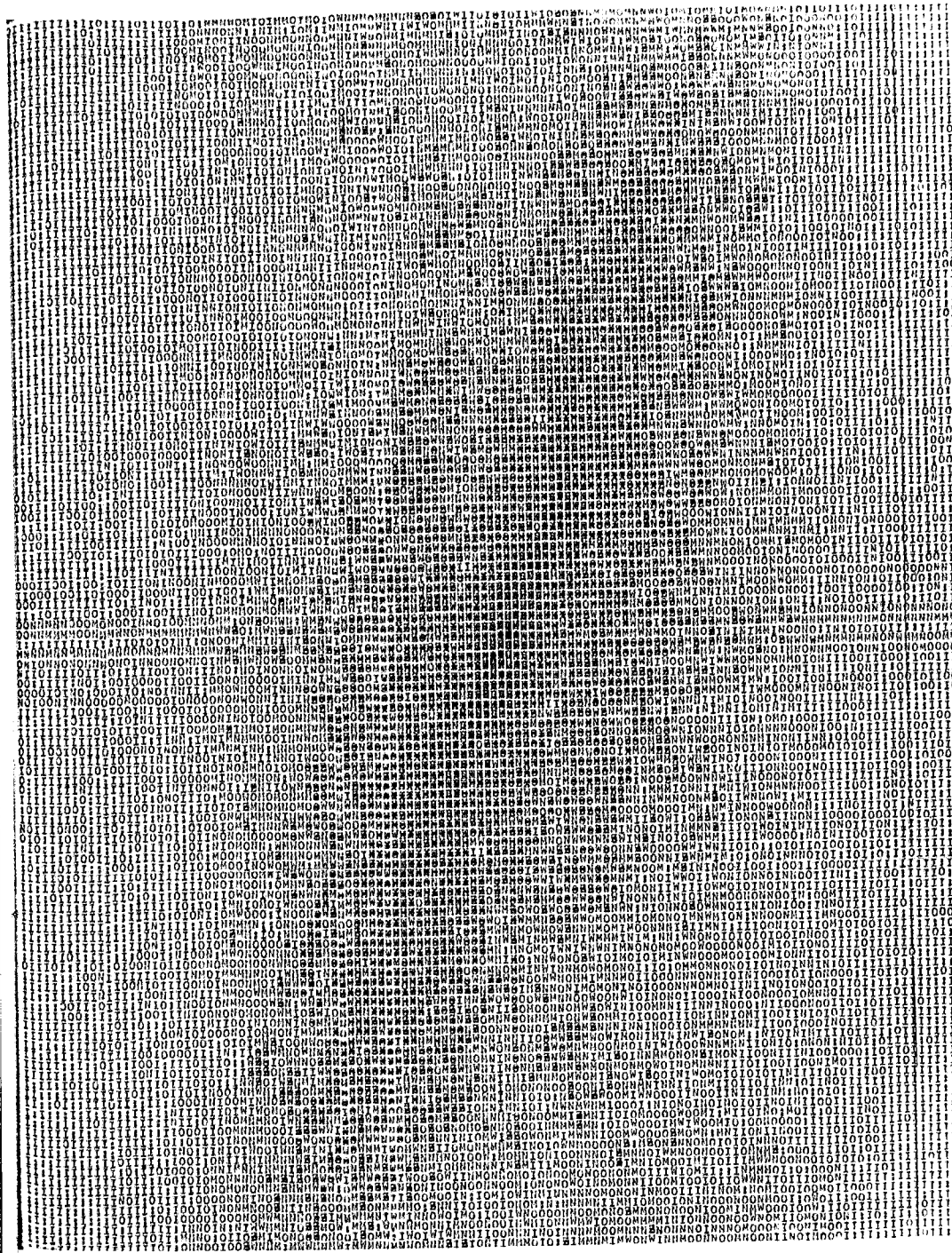


Est. IV-C — Espectrograma, representando a curva da distribuição direccional (relativa ao Norte) da função inversa da transformada de Fourier,  $f(FT)^{-1}$ , da imagem da estampa IV-B.



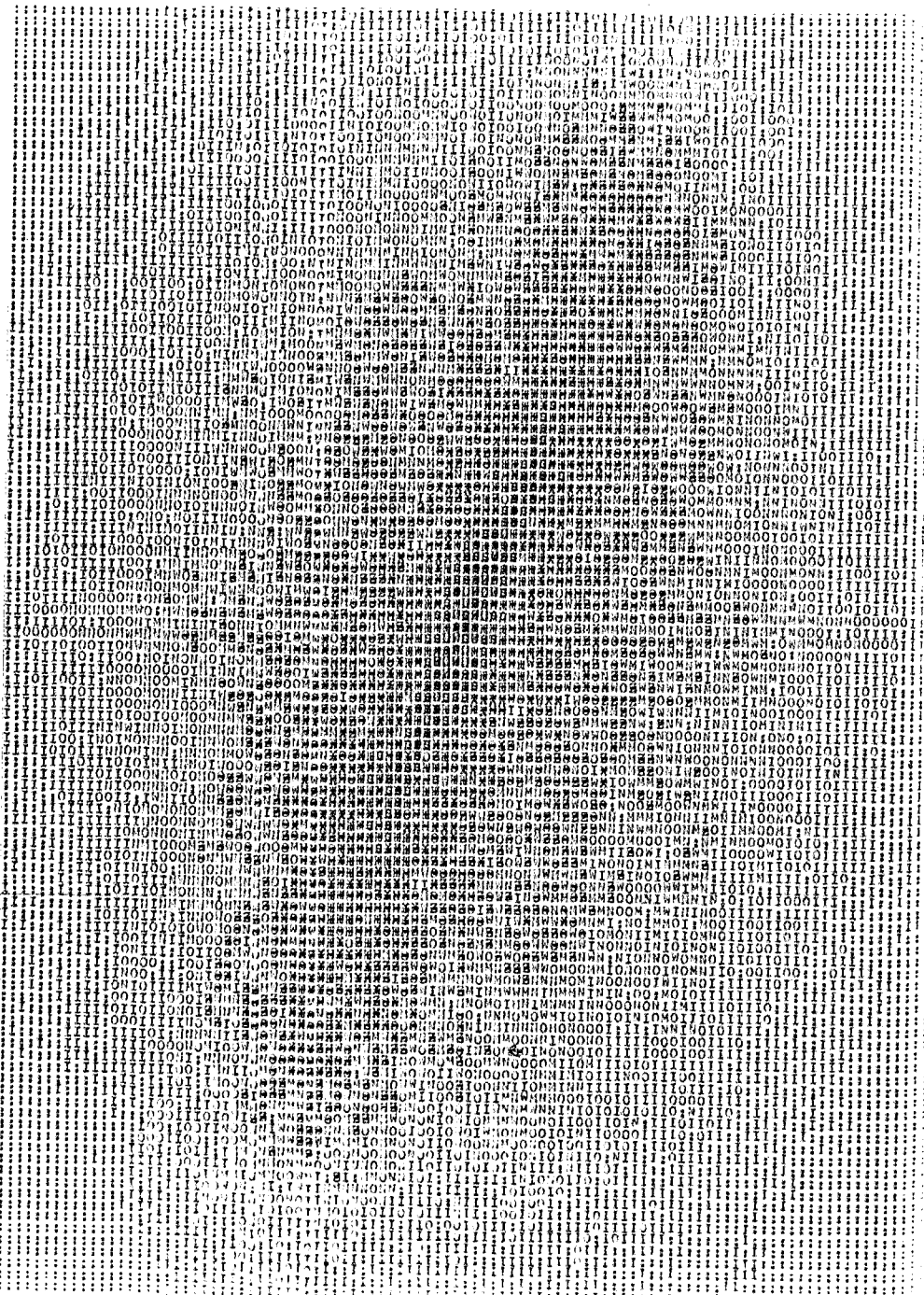


Est. V — Imagem original da extremidade da restinga de Tróia, em 28 de Agosto de 1978, no canal MSS 6 (Land sat).



Est. VI — Espectro de Fourier da imagem da Est. V.





Est. VII — Espectro filtrado por um filtro passa-baixo, de Butterworth, com distância de frequência de corte igual



Est. VIII — Imagem da Est. V transformada e filtrada.