

Mission NASA—LANDSAT-2 MSS 6
Scène 159-39 du 10/11/1975 (4 h 49 TU)
Echelle environ 1:251 000 λ 0,7-0,8 μ m
Cartes 1:50 000 IND Feuilles HARYANA 44 0/2 et PUNJAB 44 0/6
1:250 000 IND Feuille HARYANA-PUNJAB-RAJASTHAN 44 0

F. DEBAINE, C. MERING, Y. PONCET

Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM), Bondy, France

LA MORPHOLOGIE MATHÉMATIQUE EN TEINTES DE GRIS APPLIQUÉE À LA MISE EN ÉVIDENCE DE RÉSEAUX

Nous présentons ici deux exemples de traitements appliqués à deux images de la même scène LANDSAT et concernant la même famille de thèmes : les réseaux linéaires (canaux d'irrigation et rivières, routes et chemins), aux confins des Etats d'Haryana et de Rajahstan (Inde du nord-ouest). Le premier exemple est simple, choisi pour montrer les effets des transformations de l'image. Le second met en évidence sur un secteur géographique plus complexe des réseaux qui étaient jusque-là indistincts sur l'image non traitée.

Nous avons appliqué au canal 6 de LANDSAT MSS une séquence de traitements qui commence par des filtres numériques dont l'effet est de rehausser les teintes de gris correspondant aux objets à mettre en évidence, puisque les transformations élémentaires de la *Morphologie Mathématique en teintes de gris* opèrent précisément sur les *pics* (maxima locaux) et les *vallées* (minima locaux) de la fonction en teintes de gris, matérialisée sur l'image par la variation des niveaux de gris (tableau A, p. 19).

Les procédures de morphologie mathématique ont été appliquées sans a priori sur ce que devaient révéler l'image et les traitements : le terrain proprement dit est mal connu dans ses détails et il s'agissait seulement de mettre en évidence des linéaments et d'identifier des différences de figuration entre eux. Les parties de l'image qui ne correspondent pas aux réseaux sont appelées ici « fond ».

La comparaison avec les médiocres cartes topographiques disponibles et les informations de seconde main sur le terrain ont permis ensuite de vérifier la cohérence des tracés et des classes obtenus, et de leur donner des noms : rivière Ghagghar, canaux d'irrigation principaux et secondaires, routes, chemins, etc.

I. La mise en évidence automatique de deux réseaux hydrographiques différents (un canal d'irrigation et la rivière Ghagghar) est présentée ici aux environs du bourg de Bhakra.

Les méthodes courantes fondées sur la classification des signatures spectrales ne permettent pas de différencier le canal de la rivière non plus que d'autres objets ayant des signatures spectrales voisines mais des formes différentes (mares et villages entourés d'arbres, réservoirs). Compte tenu de l'objectif fixé, nous choisissons d'appliquer à une image unique (fig. 1, p. 19) des méthodes numériques utilisant d'abord un indice de texture, puis les transformations de base de la morphologie mathématique qui, à travers le traitement des arrangements de valeurs des pixels dans un voisinage donné, permettent de mettre en évidence les objets sur l'image en teintes de gris en fonction de leur forme et non plus seulement de leur radiométrie. Les transformations morphologiques citées ici mettent en œuvre un *élément structurant isotrope*, l'hexagone de taille 1. Nous décrivons ci-dessous trois procédures qui ont donné des résultats satisfaisants (tableau B, p. 21).

— Le calcul de l'*indice de texture* consiste à remplacer la valeur du pixel central d'une maille carrée 3×3 par celle de l'écart-type calculé à l'intérieur de cette maille. Sur l'image résultante, les valeurs des pixels à forte variabilité locale des niveaux de gris sont rehaussées. Figure 2, les valeurs correspondant aux deux réseaux apparaissent en *pics* (rouge et vert) de même que quelques points isolés sur le fond. Le reste du fond est lissé par l'application de l'indice et aisément seuilable en deux paliers (ici bleu foncé et bleu clair).

- **Procédure 1** — L'application de la *Dilatation* (fig. 3) accentue la différence entre les deux réseaux : elle accroît la différence de leurs teintes de gris (rivière en rouge et canal en bleu-vert) et leurs largeurs respectives. On obtient donc une bonne discrimination et une bonne identification de chacun des réseaux tout en perdant de la précision dans les détails du tracé des méandres de la rivière. Les points isolés (mares et bosquets des villages) correspondant à des *pics* ont été élargis (points rouges) et le reste du fond demeure seuilable (en noir et bleu).

- **Procédure 2** — L'application de l'*Erosion* (fig. 4) amincit les réseaux (le canal est même coupé par endroits) et lisse le fond par extension des valeurs basses (en gris-bleu).

- **Procédure 3, enchaînement de trois transformations :**

a) l'*Ouverture*, en supprimant les *pics* de taille 1, diminue les contrastes dans les valeurs hautes, ce qui rapproche les teintes de gris correspondant au canal de celles du fond. Les points isolés de taille supérieure à l'élément structurant, n'ont pu être éliminés ;

b) l'*Erosion* sur ouverture (fig. 5, p. 21) : les réseaux sont amincis, mais n'apparaissent pas homogènes puisque les teintes de gris correspondantes ne sont pas lissées. En revanche, le fond (les valeurs basses dans l'image d'origine) est devenu plus homogène ;

c) le *Gradient morphologique* sur la figure 6 rehausse tous les contrastes locaux, quelle que soit la place des teintes de gris correspondantes dans l'échelle des valeurs. Les réseaux et points isolés sont plus lisibles. La différence de teintes de gris entre les deux réseaux est accentuée sans altération de leur largeur par rapport à la figure 2.

- **Résultats :** Si l'on prend comme critères de satisfaction la différenciation des deux réseaux par leurs teintes de gris et leur mise en évidence par opposition au fond, la fig. 3 et surtout la fig. 6 (procédures 1 et 3 du tableau B) peuvent être considérées comme satisfaisantes.

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° :

826579

15.9.1989

ex 1

II. L'aide à la classification de réseaux multiples est la procédure appliquée à une zone très voisine, celle du bourg de Panihari. La zone contient plusieurs catégories plus ou moins hiérarchisables de réseaux : rivière Ghagghar, canaux d'irrigation principaux et secondaires, routes revêtues, non revêtues, chemins. L'absence de contrastes sur toutes les bandes de cette scène empêche une bonne lisibilité des ensembles linéaires ; de plus, l'hétérogénéité du fond masque leur continuité (fig. 7). Comme précédemment, on recherche à rehausser les réseaux, à rétablir les continuités et à lisser le fond.

L'orientation régionale, mise en évidence par les plus grands réseaux et la structure dunaire, est approximativement NE-SW. On en a tenu compte dans le choix des opérations en commençant la séquence par l'application d'un filtre directionnel, puis en effectuant les transformations morphologiques en teintes de gris par un *élément structurant anisotrope*, le segment orienté de taille 1 (voir procédures **tableau C**, p. 23).

— **Le filtre directionnel** — On applique à l'image de base (fig. 7) un filtre-gradient dit « nord-ouest », obtenu par convolution à l'aide du masque suivant :

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{matrix}$$

Ce filtre accentue les linéarités dans la direction NE-SW sans empâter le trait (fig. 8) (Voir ci-dessous schéma des orientations). Les traitements suivants sont effectués sur cette image :

- **Procédure 1** — L'*Érosion* (fig. 9, p. 23) a pour effet d'élargir les réseaux sombres (en noir). Elle met en évidence les lignes ténues sombres peu distinctes sur la fig. 8. En revanche, les linéarités claires (en rouge, fig. 8), parallèles à l'orientation régionale, ont été estompées.

- **Procédure 2** — L'*Ouverture* (fig. 10) permet de supprimer les points isolés et clairs (en rouge) et lisse le fond, rendant ainsi les réseaux plus distincts.

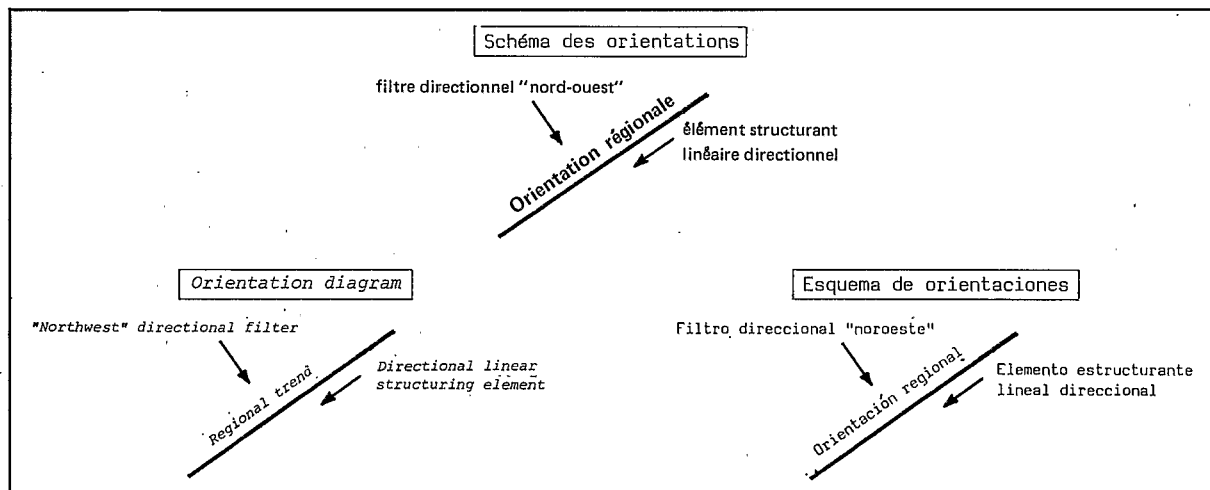
- **Procédure 3, enchaînement de deux transformations :**

a) la *Fermeture* (fig. 11) accentue la continuité des réseaux sombres sans modifier les autres ;

b) on effectue un *Chapeau haut-de-forme* (fig. 12) obtenu par soustraction arithmétique entre la *Fermeture* et son image d'origine.

- **Résultats :** Le filtre directionnel améliore la lisibilité de tous les réseaux orientés NE-SW dans l'image en rehaussant les teintes de gris correspondantes. *Erosion* et *Ouverture* ne soulignent pas les mêmes réseaux, mais toutes deux mettent clairement en évidence des réseaux peu distincts dans l'aire dunaire de l'image non traitée (fig. 7). La *Fermeture* rehausse la continuité du canal principal et le *Chapeau haut-de-forme* fait apparaître la continuité des réseaux du nord de la zone, tout en faisant disparaître les réseaux de l'aire dunaire (fig. 12).

CONCLUSION — L'utilisation des outils de la Morphologie Mathématique transforme l'image tout en conservant et même en soulignant certaines structures. La mise en évidence en est obtenue soit par renforcement du contraste et de la continuité des lignes, soit par lissage du fond sans altération des structures recherchées. Les procédures appliquées ont fait apparaître des structures linéaires indistinctes sur l'image LANDSAT non traitée : d'après les hypothèses émises par les archéologues, certaines de ces lignes correspondent à d'anciens réseaux d'irrigation, actuellement non fonctionnels et matérialisés sur le terrain par des talus.



Légende de la Figure 12

Caption of Figure 12

Leyenda de la Figura 12

Canal principal

1 Main channel

Canal principal

Canal secondaire

2 Tributary channel

Canal secundario

Canal médiéval

3 Mediaeval channel

Canal medioeval

Rivière Ghagghar

4 Ghagghar river

Río Ghaggar

Route

5 Road

Carretera

MATHEMATICAL MORPHOLOGY IN GREY TONES APPLIED TO NETWORK IDENTIFICATION

We present two examples here of processings applied to two images of the same LANDSAT scene and concerning the same family of themes: linear networks (irrigation canals and river, roads and paths), at the borders of the States of Haryana and Rajasthan (northwest India). The first example is simple, selected to demonstrate the effects of image transformation. The second, on a more complex geographic sector, identifies networks that were hitherto indistinct on the unprocessed image.

LA MORFOLOGÍA MATEMÁTICA EN TONOS DE GRIS APLICADA A LA PUESTA EN RELIEVE DE REDES

En el presente documento presentamos dos ejemplos de procesamientos aplicados a dos imágenes de la misma escena de LANDSAT, relativos a la misma familia de temas : las redes lineales (canales de riego y ríos, carreteras y caminos en los confines de los Estados de Haryana y Rayastán (NW de la India). El primer ejemplo, bastante sencillo, se eligió para demostrar los efectos de las transformaciones de la imagen. El segundo ejemplo, en un sector geográfico más complejo,

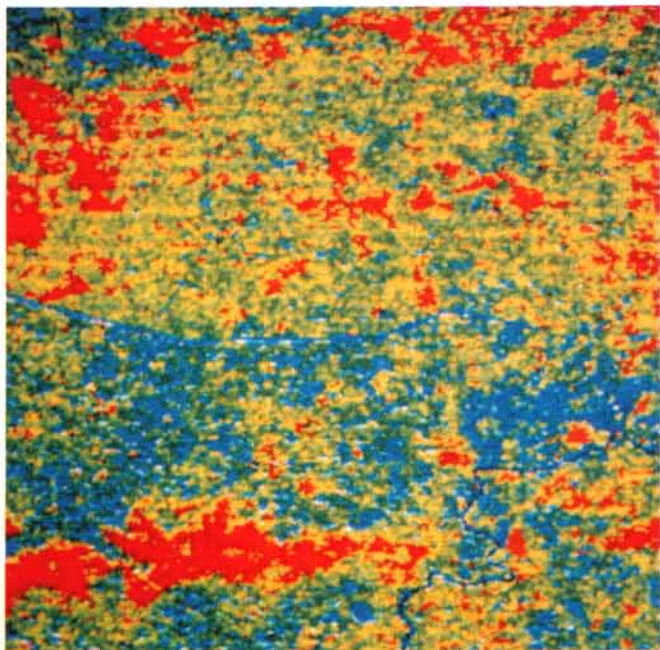


Fig. 1

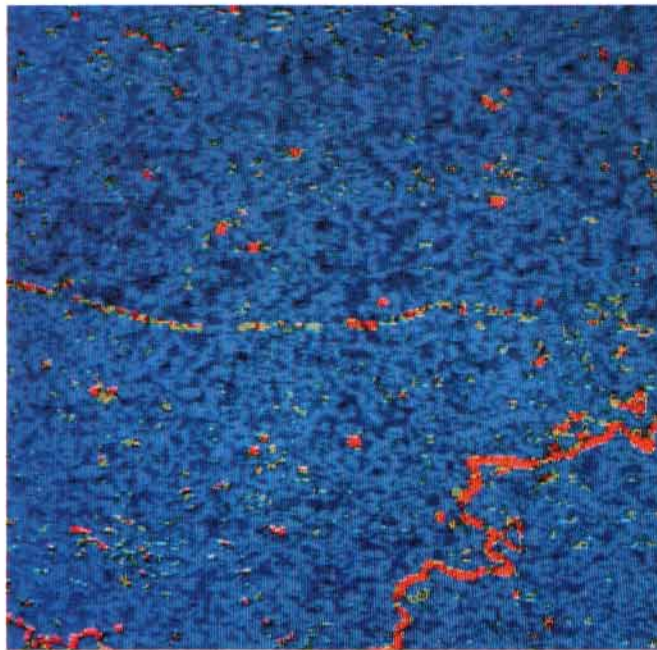


Fig. 2

images NASA-LANDSAT 2 - trait. ORSTOM-Bondy

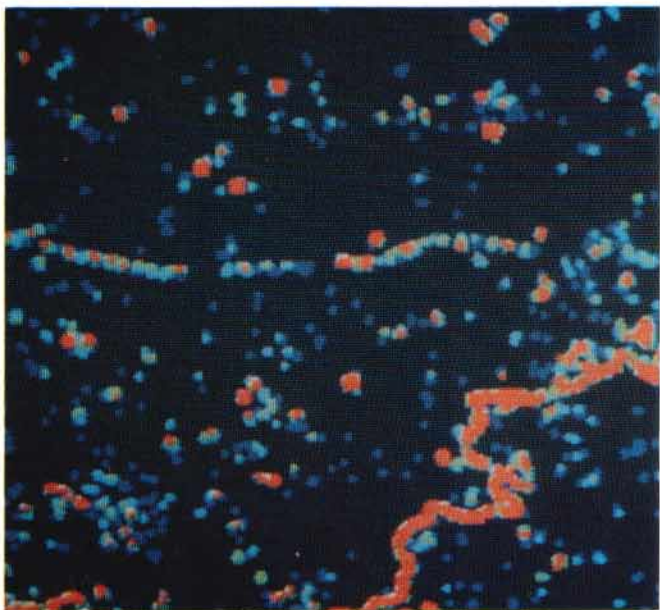
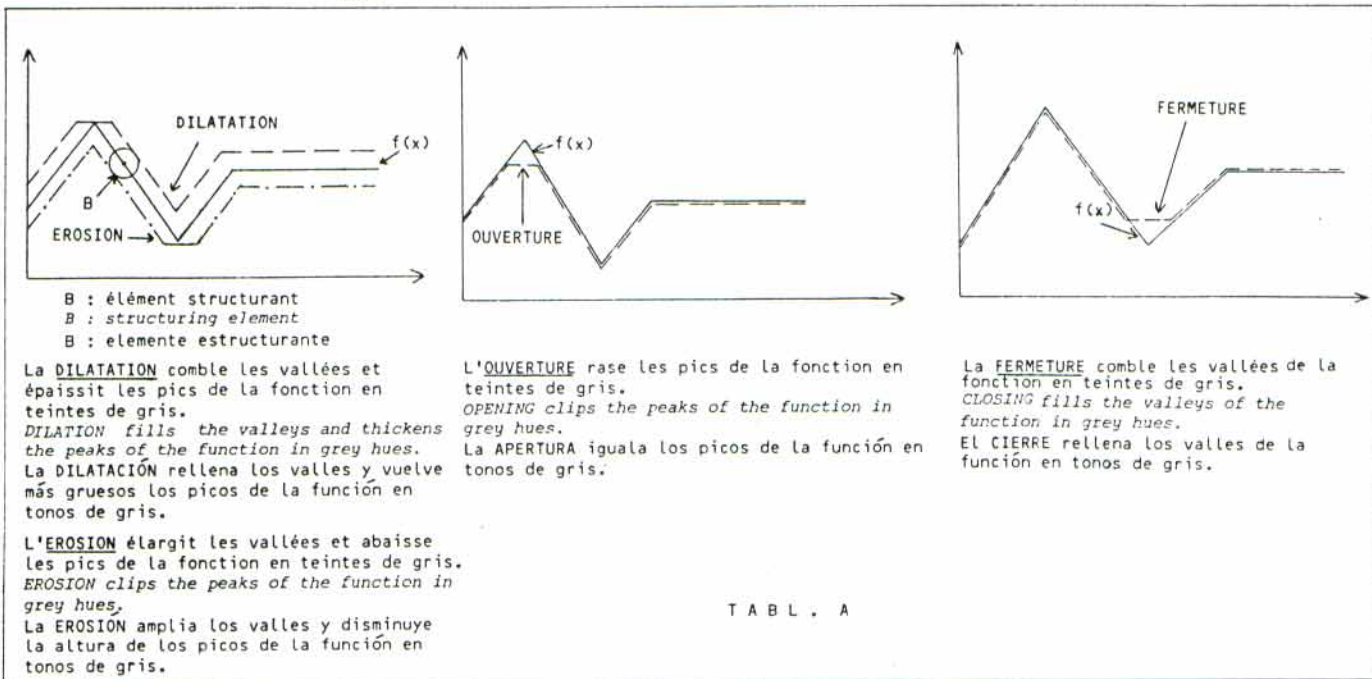


Fig. 3



Fig. 4



T A B L . A

H
0
0
9
3
6
4
1
0
5
0

| | | | | |
|----------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|
| IND INDE | NASA-LANDSAT 2 MSS 6 scène 159-39 | 10-11-75 4 h 49 TU | env. 1 : 251 000 λ 0,7-0,8 μm | 1 : 50 000 IND f. HARYANA-PUNJAB 44 0/2 et 44 0/6 1 : 250 000 IND f. HARYANA-PUNJAB-RAJASTHAN 44 0 |
|----------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|

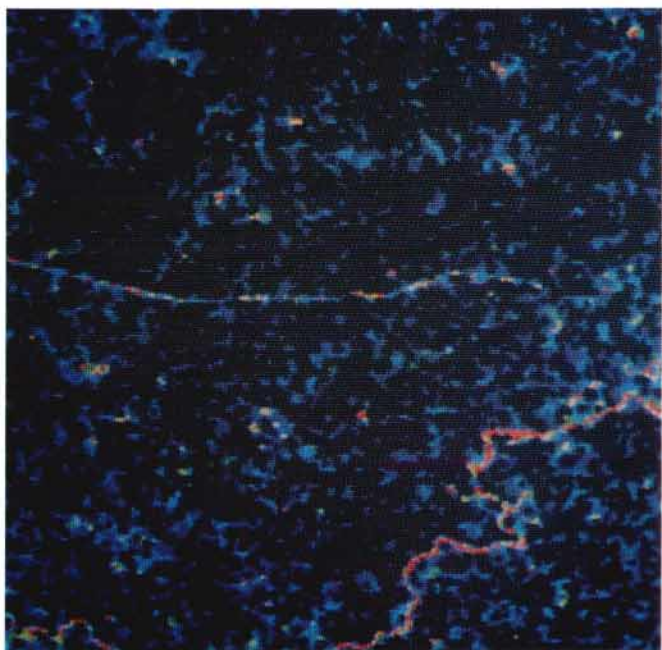


Fig. 5

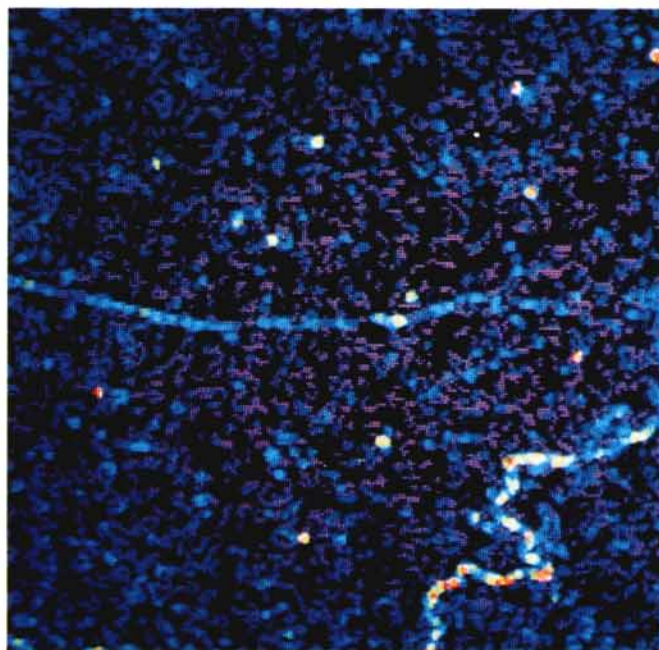


Fig. 6

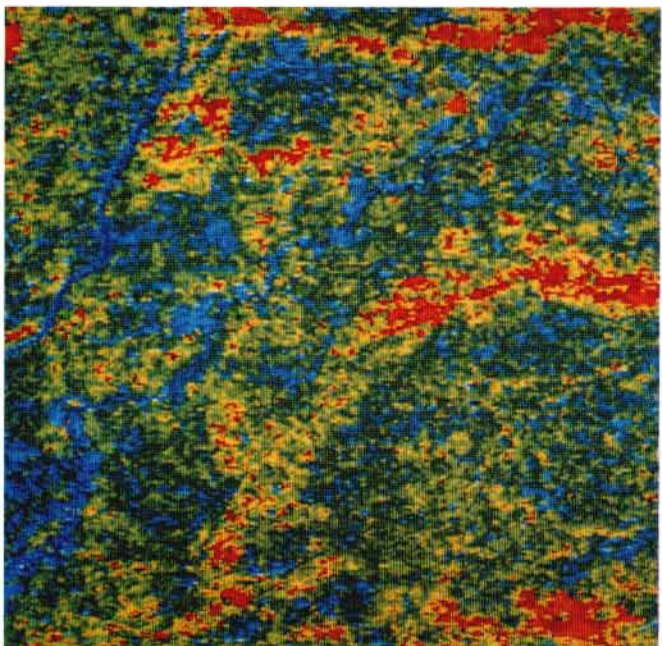


Fig. 7

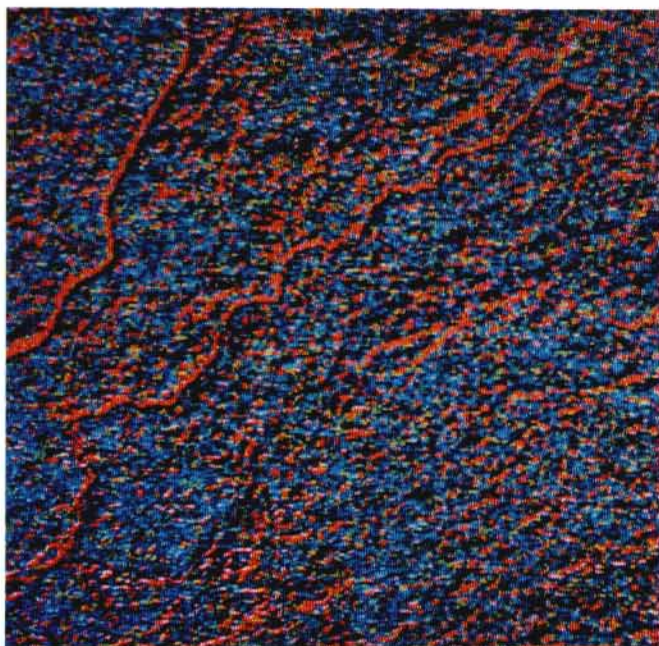
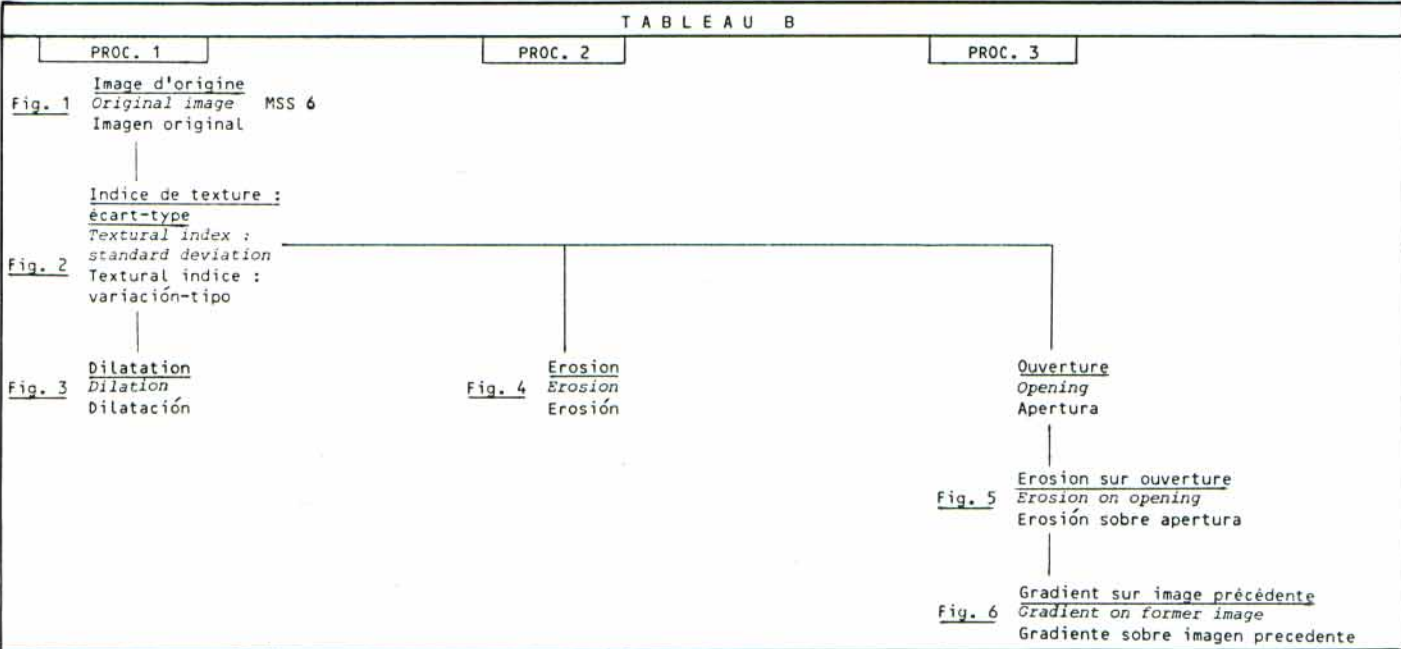


Fig. 8

images NASA-LANDSAT 2 - trait. ORSTOM-Bondy

TABLEAU B



H
0
0
9
3
4
6
1
0
5
0

| | | | | |
|----------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|
| IND INDE | NASA-LANDSAT 2 MSS 6 scène 159-39 | 10-11-75 4 h 49 TU | env. 1 : 251 000 λ 0,7-0,8 μm | 1 : 50 000 IND f. HARYANA-PUNJAB 44 0/2 et 44 0/6 1 : 250 000 IND f. HARYANA-PUNJAB-RAJASTHAN 44 0 |
|----------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|

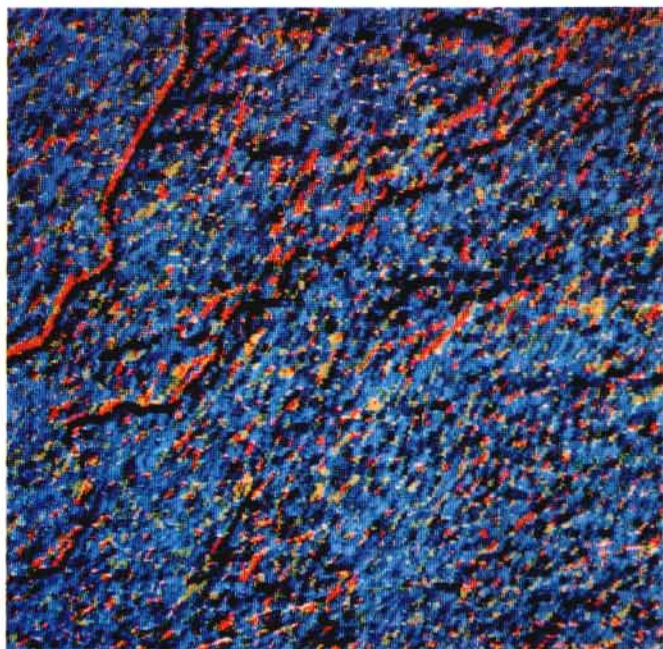


Fig. 9

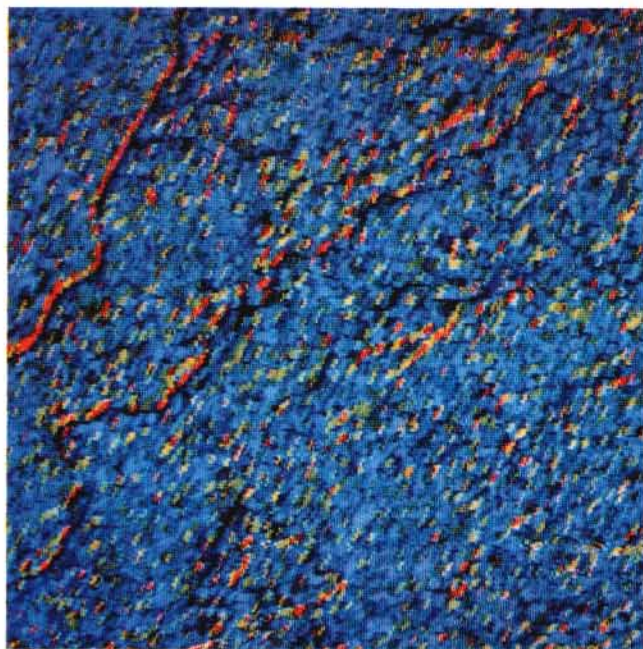


Fig. 10

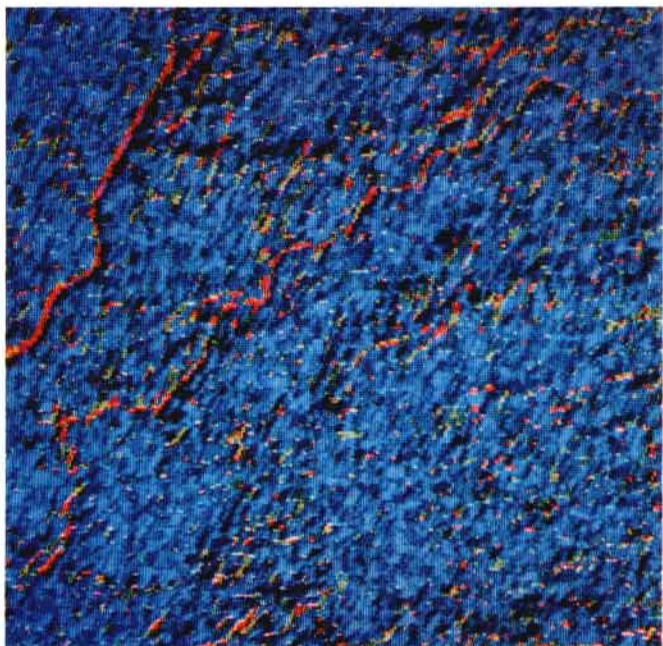


Fig. 11

images NASA-LANDSAT 2 - trait. ORSTOM-Bondy

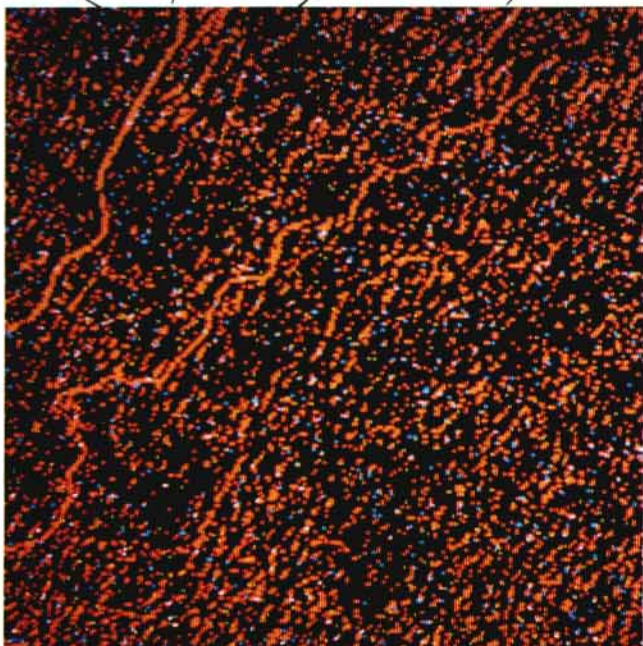
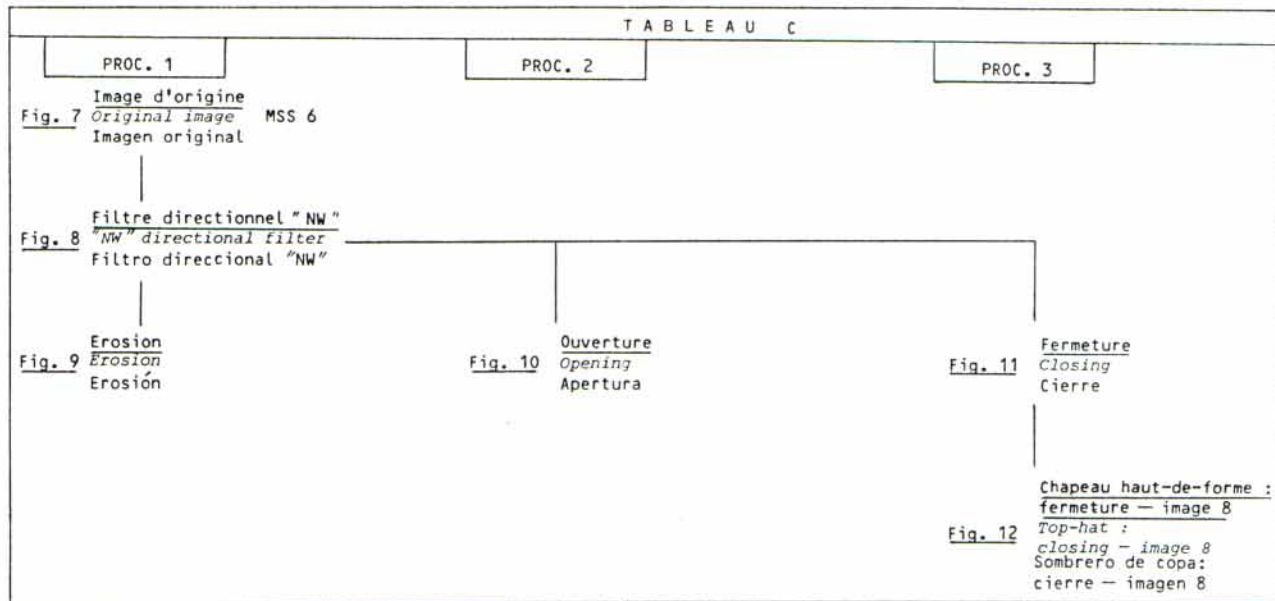


Fig. 12



H
0
0
9
3
6
4
1
0
5
0

We applied a processing sequence to LANDSAT MSS channel 6 which begins with digital filters, whose effect is to enhance the grey tones corresponding to the objects to be identified, because the elementary transformations of Mathematical Morphology for grey-tone functions act specifically on the peaks (local maxima) and valleys (local minima) of the function, materialized on the image by the variation of grey levels (Table A, p. 19).

The procedures of mathematical morphology were applied without a priori reasoning on what should be revealed by the image and processing: the actual ground is poorly known in detail, and it is only necessary to identify the lineaments and the pattern differences between them. The parts of the image which do not correspond to the networks are called the "background" here.

A comparison with the mediocre topographic maps available and the second-hand information in the field then served to check the consistency of the traces and the classes obtained, and to assign them names: Ghagghar River, main and secondary irrigation canals, road, paths, etc.

I. Automatic identification of two different drainage patterns (an irrigation canal and the Ghagghar River) is presented here in the environs of the township of Bhakra.

The standard methods based on the classification of spectral signatures did not help to differentiate the canal from the river, any more than from any other objects with similar spectral signatures but different shapes (ponds and villages surrounded by trees, reservoirs). Given the objective set, we decided to apply numerical methods to a single image (Figure 1, p. 19), first using a texture index, followed by the basic transformations of mathematical morphology which, through the processing of the pixel value arrangements in a given neighborhood, help to identify the objects on the image as a function of a shape, and not only of their radiometry. The morphological transformations mentioned here employ an isotropic structuring element, the hexagon of size one. We describe below three procedures which yield satisfactory results (Table B, p. 21).

- The calculation of the texture index consists in replacing the value of the central pixel of a 3 x 3 square mesh by that of the standard deviation calculated within this mesh. On the resulting image, the values of the pixels with high local variability of grey levels are enhanced. In Figure 2, the values corresponding to the two networks appear as peaks (red and green) in the same way as a number of isolated points on the background. The rest of the background is smoothed by the application of the index and easily thresholdable in two levels (dark blue and light blue here).

- Procedure 1 - The application of Dilation (Figure 3) accentuates the difference between the two networks: it increases the difference in their grey hues (river in red and canal in greenish-blue) and their respective widths. This achieves a good discrimination and a good identification of each of the networks, with a loss of accuracy in the details of the trace of the meanders of the river. The isolated points (ponds and copses of the villages), corresponding to peaks, have been widened (red points) and the rest of the background remains thresholdable (in black and blue).

- Procedure 2 - The application of Erosion (Fig. 4) thins the networks (the canal is even cut in places) and smooths the background by extension of the low values (in bluish-grey).

- Procedure 3, chaining of three transformations:

a) Opening, by eliminating peaks of size one, decreases the contrasts in the high values, making the grey hues corresponding to the canal similar to those of the background. The isolated points of greater size than the structuring element could not be eliminated;

b) Erosion on opening (Figure 5, p. 21): the networks are thinned, but do not appear uniform because the corresponding grey hues are not smoothed. However, the background (low values in the original image) has become more uniform;

c) the Morphological Gradient in Figure 6 enhances all the local contrasts, irrespective of the position of the corresponding grey levels in the scale of values. The networks and isolated points are more legible. The difference in grey levels between the two networks is accentuated without altering their width with respect to Figure 2.

- Results - If we assume as satisfaction criteria (1) the differentiation of two networks by their grey levels, and (2) their identification by opposition to the background,

pone de manifiesto diversas redes que hasta la fecha no podían distinguirse en la imagen sin tratar.

Al canal 6 de LANDSAT MSS se aplicó una serie de tratamientos que comienza por filtros numéricos con objeto de realzar los tonos de gris que corresponden a los objetos que se desea poner de manifiesto, ya que las transformaciones elementales de la *Morfología Matemática en tonos de gris* operan precisamente en los picos (valores máximos locales) y los valles (valores mínimos locales) de la función en tonos de gris, que aparece en la imagen como una variación de los matices de gris (Tabla A, p. 19).

Los procedimientos de morfología matemática se aplicaron sin a priori sobre lo que debía revelar la imagen y los tratamientos: el terreno propiamente dicho se conoce mal por lo que respecta a sus detalles y se trataba únicamente de evidenciar los lineamientos y de identificar las diferencias de figuración entre ellos. Las partes de la imagen que no corresponden a redes se denominan aquí "fondo".

Acto seguido, la comparación con los mediocres mapas topográficos disponibles y las informaciones de segunda mano sobre el terreno permitieron verificar la coherencia de los trazados y de las clases obtenidas, y de asignarles un nombre: río Ghagghar, canales de riego principales y secundarios, carreteras, caminos, etc.

I. El procedimiento para poner automáticamente en evidencia dos redes hidrográficas diferentes (un canal de riego y el río Ghagghar) es presentado en este documento en los alrededores del pueblo de Bhakra.

Los métodos corrientes, fundados en la clasificación de las señales espectrales, no permiten diferenciar el canal del río, ni de los otros objetos que poseen una señal espectral próxima pero de diferente forma (pantanos y pueblos rodeados de árboles, depósitos). Para tener en cuenta el objeto fijado, decidimos aplicar a una sola imagen (Fig. 1, p. 19) diversos métodos numéricos que utilizan, en primer lugar, un índice de textura, y acto seguido, las transformaciones básicas de la morfología matemática que hacen aparecer en la imagen en tonos de gris, a través del procesamiento de distribuciones de valores de pixels en un entorno determinado, los objetos en función de su forma y no sólo de su radiometría. Las transformaciones morfológicas mencionadas hacen intervenir un elemento estructurante isótropo, el hexágono de tamaño 1. A continuación, describiremos tres procedimientos que brindaron resultados satisfactorios (Tabla B, p. 21).

- El cálculo del índice de textura consiste en reemplazar el valor del pixel central de un entramado cuadrado 3 x 3 por el valor de la variación tipo calculada en el interior de dicho entramado. En la imagen resultante se realzan los valores de los pixels que presentan una elevada variabilidad local de los matices de gris. En la Fig. 2 los valores correspondientes a las dos redes aparecen en picos (rojo y verde), al igual que algunos puntos aislados en el fondo. El resto del fondo se alisa mediante la aplicación del índice y se puede limitar fácilmente en dos niveles (en este caso, azul oscuro y azul claro).

- Procedimiento 1 - La aplicación de la Dilatación (Fig. 3) acentúa la diferencia entre las dos redes, aumentando la diferencia entre sus tonos de gris (río en color rojo y canal en azul verdoso) y su respectiva anchura. De esta forma se logra efectuar una correcta discriminación y una buena identificación de cada una de las redes perdiendo, simultáneamente, algo de precisión por lo que respecta a los detalles del trazado de los meandros del río. Los puntos aislados (pantanos y bosques de los pueblos) que corresponden a picos fueron ampliados (puntos rojos) y el resto del fondo puede someterse a una limitación (en negro y azul).

- Procedimiento 2 - La aplicación de la Erosión (Fig. 4) disminuye la anchura de las redes (el canal aparece incluso cortado en algunos lugares) y alisa el fondo por extensión de los valores bajas (en gris azulado).

- Procedimiento 3, encadenamiento de tres transformaciones:

a) la Apertura, mediante la supresión de los picos de tamaño 1, disminuye los contrastes en los valores elevados, lo cual reduce la diferencia existente entre los tonos de gris del canal y los del fondo. Los puntos aislados de tamaño inferior al elemento estructurante no pudieron eliminarse;

b) la Erosión en apertura (Fig. 5, p. 21): se disminuye la anchura de las redes, pero éstas no aparecen homogéneas ya que los tonos de gris correspondientes no se alisan. En cambio, el fondo (los valores bajos en la imagen original) pasó a ser más homogéneo;

c) el Gradiente morfológico de la Fig. 6 realza todos los contrastes locales, cualquiera que sea el lugar que ocupen los tonos de gris correspondientes en la escala de valores. Las redes y los puntos aislados aparecen con

Figure 3, and especially Figure 6 (Procedures 1 and 3 in Table B), can be considered satisfactory.

II. The aid in the classification of multiple networks has been achieved by a procedure applied to a nearby zone, that of the Panihari township. The zone contains several more or less rankable categories of networks: Ghagghar River, main and secondary irrigation canals, macadam roads, unpaved roads, paths. The absence of contrasts on all the bands of this scene precludes any good legibility of the linear sets. Moreover, the background heterogeneity masks their continuity (Figure 7). As above, an attempt is made to enhance the networks, restore the continuities and smooth the background.

The regional trend, identified by the major networks and the dune structure, is approximately NE-SW. This was considered in selecting the operations, by starting the sequence by the application of a directional filter, and then by performing the morphological transformations by an anisotropic structuring element, the oriented segment of size one (see procedures Table C, p. 23).

- The directional filter - A "northwest" gradient filter is applied to the basic image (Figure 7), obtained by convolution using the following mask:

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{matrix}$$

This filter accentuates the linearities in the NE-SW direction without thickening the line (Figure 8) (see orientation diagram, page 18). The following processings were carried out of this image:

- Procedure 1 - Erosion (Figure 9, p. 23) has the effect of widening the dark networks (in black). It reveals the thin dark and indistinct lines in Figure 8. On the other hand, the light linearities (in red, Figure 8) parallel to the regional trend have been blurred.

- Procedure 2 - Opening (Figure 10) serves to eliminate the isolated and light points (in red) and smooths the background, making the networks more distinct.

- Procedure 3, chaining of two transformations:

a) Closing (Figure 11) accentuates the continuity of the dark networks without changing the others;

b) A Top hat transformation is obtained (Figure 12) by arithmetic subtraction between the Closing and its original image.

- Results: The directional filter improves the legibility of all the networks trending NE-SW in the image by enhancing the corresponding grey levels. Erosion and opening do not emphasize the same networks, but both clearly identify indistinct networks in the dune area of the unprocessed image (Figure 7). The closing enhances the continuity of the main canal and the Top hat transformation reveals the continuity of the networks in the north of the area, while causing the networks of the dune area to disappear (Figure 12).

CONCLUSION

The use of the tools of mathematical morphology transforms the image while preserving and even emphasizing certain structures. This is confirmed either by a strengthening of the contrast and of the continuity of the lines, or by background smoothing without alteration of the structures investigated. The procedures applied caused the appearance of indistinct linear structures on the unprocessed LANDSAT image. According to the hypotheses suggested by the archaeologists, some of these lines correspond to ancient irrigation networks, now inoperative and materialized on the ground by slopes.

mayor nitidez. La diferencia entre los tonos de gris de las dos redes aparece acentuada, sin que haya alteración de su anchura respecto a la Figura 2.

- Resultados: si se toma como criterios de satisfacción 1) la diferenciación de dos redes según sus tonos de gris, 2) su nitidez con respecto al fondo, en tal caso se puede considerar satisfactoria la Fig. 3 y, principalmente, la Fig. 6 (procedimientos 1 y 3 de la Tabla B).

II. La ayuda a la clasificación de redes múltiples es el procedimiento aplicado a una zona muy cercana, la del pueblo de Panihari. Esta zona engloba varias categorías de redes de mayor o menor importancia: río Ghagghar, canales de riego principales y secundarios, carreteras pavimentadas, otras sin pavimentar y caminos. La ausencia de contrastes en todas las bandas de esta escena impide una correcta observación de los conjuntos lineales. Además, la heterogeneidad del fondo enmascara su continuidad (Fig. 7). Al igual que en el caso anterior, se trata de realzar las redes, restablecer las continuidades existentes y alisar el fondo.

La orientación regional, puesta de manifiesto por las mayores redes y la estructura dunaria, es aproximadamente NE-SW. Esta orientación se tuvo en cuenta para la elección de las operaciones que era preciso efectuar, comenzando la secuencia por la aplicación de un filtro direccional y, efectuando, acto seguido, las transformaciones morfológicas en tonos de gris mediante un elemento estructurante anisótropo, el segmento orientado de tamaño 1 (véanse los procedimientos en la Tabla C, p. 23).

- El filtro direccional - A la imagen original (Fig. 7) se aplica un filtro-gradiente denominado "noroeste", obtenido por convolución por medio de la siguiente máscara:

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{matrix}$$

Este filtro acentúa las linealidades en la dirección NE-SW sin engrosar el trazo (Fig. 8) (véase el esquema de las orientaciones en la pág. 18). La imagen se somete a los siguientes tratamientos:

- Procedimiento 1 - La Erosión (Fig. 9, p. 23) provoca una ampliación de las redes de color oscuro (en negro) y realza las líneas sutiles de color oscuro que se distinguen mal en la Fig. 8. En cambio, se difuminaron los lineamientos claros (en rojo, en la Fig. 8) paralelos a la orientación regional.

- Procedimiento 2 - La Apertura (Fig. 10) permite suprimir los puntos aislados y claros (en rojo) y alisa el fondo y, de esta forma, hace las redes más patentes.

- Procedimiento 3, encadenamiento de dos transformaciones:

a) el Cierre (Fig. 11) acentúa la continuidad de las redes de color oscuro, sin modificar las redes restantes;
b) se efectúa un Sombrero de copa (Fig. 12), obtenido por sustracción aritmética entre el Cierre y su imagen original.

- Resultados: el filtro direccional aumenta la legibilidad de todas las redes de orientación NE-SW en la imagen, realzando los tonos de gris correspondientes. La Erosión y la Apertura no realzan las mismas redes, pero ambas operaciones ponen de manifiesto las redes que aparecen poco nítidas en el área de dunas de la imagen sin tratar (Fig. 7). El Cierre realza la continuidad del canal principal y el Sombrero de copa hace aparecer la continuidad de las redes del norte de la zona y, al mismo tiempo, hace desaparecer las redes del área de dunas (Fig. 12).

CONCLUSIÓN

La utilización de los medios que brinda la Morfología Matemática transforma la imagen y, además, conserva e incluso pone de relieve ciertas estructuras. El realce se obtiene ya sea por refuerzo del contraste y de la continuidad de las líneas, o bien mediante alisado del fondo sin que haya alteración de las estructuras buscadas. Los procedimientos aplicados hicieron aparecer diversas estructuras lineales imprecisas en la imagen de LANDSAT que no se sometió a tratamiento: según las hipótesis de los arqueólogos, algunas de esas líneas corresponden a antiguas redes de riego que no están en funcionamiento actualmente y que se traducen en el terreno por la aparición de taludes.



TIRÉ À PART

**Photo
Interprétation**

**images aériennes
et spatiales**

EDITIONS TECHNIP

B 26579
ex 1 P154