



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROCESAMIENTO DIGITAL DE
IMAGENES LANDSAT CON
APLICACION A GEOHIDROLOGIA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERA EN COMPUTACION
P R E S E N T A N**

**MARTHA MAGDALENA CHAVEZ CORTES
MARIA DE LOS ANGELES FLORES ILLESCAS**

DIRECTOR: ING. J. ALEJANDRO JIMENEZ GARCIA

MEXICO, D. F.

1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

ANTECEDENTES.

INTRODUCCION.

CAPITULO UNO

1

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES.

1.1 TIPOS DE IMAGENES Y DEFINICION.

1.2 ELEMENTOS DEL PROCESAMIENTO DIGITAL
DE IMAGENES.

CAPITULO DOS

26

FUNDAMENTOS FISICOS PARA LA CREACION DE UNA
IMAGEN DIGITAL.

2.1 MECANISMOS DE FORMACION Y CAPTURA DE UNA
IMAGEN, MODELADO FISICO Y MATEMATICO.

2.2 DIGITIZACION Y CUANTIZACION DE UNA IMAGEN.

CAPITULO TRES

44

FORMALISMO MATEMATICO DE UNA IMAGEN.

3.1 CARACTERIZACION MATEMATICA DE UNA IMAGEN.

3.2 OPERADORES DE CAPTURA DE INFORMACION.

3.3 TRANSFORMACIONES A IMAGENES.

CAPITULO CUATRO 59

REALCE DE IMAGENES.

4.1 PANORAMA GENERAL DE LAS TECNICAS DE REALCE.

4.2 TECNICAS DE REALCE EN EL DOMINIO ESPACIAL.

CAPITULO CINCO 73

PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN.

5.1 TRANSFORMACIONES PROPUESTAS.

5.2 JUSTIFICACION MATEMATICA DE LAS TRANSFOR -
MACIONES PROPUESTAS PARA EL REALCE DE
BORDES.

5.3 ALGORITMOS DESARROLLADOS.

5.4 EQUIPO DE COMPUTO UTILIZADO.

CAPITULO SEIS 116

ANALISIS DE INDICADORES GEOHIDROLOGICOS DE LA
IMAGEN DEL VALLE DE LA PAZ - EL CARRIZAL.

6.1 DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO.

6.2 IMAGEN UTILIZADA.

6.3 RESULTADOS.

CAPITULO SIETE 127

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA.

ANTECEDENTES

No obstante que en general, la cantidad de agua en la tierra ha permanecido virtualmente constante durante la historia registrada, los diversos períodos de flujo y sequía que han sido afrontados por el hombre, han puesto a prueba su capacidad para controlar y manejar los recursos acuíferos a su disposición.

En México, el constante aumento de la población, - junto con la expansión de las áreas agrícolas irrigadas y el desarrollo industrial han puesto condiciones de degradación al sistema natural, tanto en los aspectos cualitativos como en los cuantitativos. Debido a estos problemas de magnitud creciente, es evidente que una política consistente para la administración racional de los recursos acuíferos es necesaria no nada más para sostener la expansión socio-económica del país, sino para evitar la degradación en aumento de nuestro ecosistema.

El reto consiste en enfrentar el problema de la distribución inadecuada del agua, tanto en espacio como en tiempo y suministrar la cantidad y calidad convenientes para satisfacer las demandas locales.

En general, alrededor del 20% de la superficie te -

rrestre es clasificada como árida, y un 15% adicional es clasificada como semiárida (Petror, 1976). En nuestro -- país cerca del 60% del territorio es clasificado como se miárido. De aquí que el agua haya sido el factor limitan te en el desarrollo de la agricultura y de muchas indus trias. Paradójicamente, ciertas áreas semiáridas son de vastadas periódicamente por flujos e inundaciones.

Los datos hidrológicos convencionales consisten ge neralmente en medidas puntuales y extrapolaciones de me didas puntuales para estimaciones volumétricas utilizan do modelos matemáticos. La ciencia relativamente nueva - de la percepción remota ha demostrado que puede estimar incluso a nivel regional, diversos atributos del terreno relacionados con procesos superficiales tanto estáticos como dinámicos. Estos procesos, modelados convenientemen te dan información valiosa de clases de cobertura y proporcian indicadores superficiales de diversas manifes taciones subterráneas, en particular las manifestaciones geohidrológicas y las petroleras.

El uso de los satélites para percepción remota - - (DSE/ONU 1984) ha crecido continuamente desde 1960. En - principio su uso se basó en la operación de satélites po lares de baja órbita: 800 - 1500 km y posteriormente en satélites ecuatoriales de gran altura, 400 km en órbitas

geoestacionarias. Las restricciones prácticas de estos satélites resultan generalmente en un compromiso entre el área sensada, la frecuencia de observación de áreas individuales y la resolución tanto espacial como espectral de los datos obtenidos.

Los satélites del "medio ambiente" observan una frecuencia relativamente alta: dos veces al día, pero a una resolución espacial baja: 1 km. Estos satélites han contribuido a la geohidrología a través de observaciones de diferentes aspectos climáticos y de fenómenos superficiales de gran escala. Por otro lado, los satélites de "recursos naturales", LANDSAT, hacen observaciones a una frecuencia relativamente baja: cada 18 días, pero a una resolución espacial relativamente alta: desde 80 m para el barredor multiespectral (MSS) del LANDSAT 4 hasta 30 m del mapeador temático (TM) del LANDSAT 5. Estos satélites han contribuido enormemente al mapeo de las condiciones del terreno en la evaluación de recursos naturales.

En los últimos años se han sumado a estos satélites que operan en la región óptica del espectro, varios satélites que trabajan en las bandas S y X; es decir en los 23 y 3 cm de longitud de onda respectivamente. Estos satélites de baja órbita hacen observaciones a una frecuencia relativamente baja, pero a una resolución alta: 20 -

25 m. Además de estas características, la independencia en el mecanismo de iluminación y la posibilidad de variar la dirección de polarización del haz incidente hacen de estos satélites un instrumento complementario muy valioso en la prospección geohidrológica (Farnsworth et al, 1984).

El procesamiento, análisis y descripción simbólica del gran volúmen de datos contenidos en las imágenes obtenidas por estos satélites, no sería posible si no se contara con las técnicas matemáticas adecuadas (Rosenfeld, Kak, 1982; González, Wintz, 1977), las arquitecturas de cómputo y los lenguajes de programación convenientes para la implantación de algoritmos eficientes (Pavlidis, 1982) y de propósito específico (Duff, Levialedi, 1983) para el procesamiento digital de imágenes y reconocimiento de patrones.

INTRODUCCION

La percepción remota basada en el procesamiento digital de imágenes multiespectrales es hoy en día una poderosa herramienta para el estudio de los recursos terrestres. El propósito de este proceso es derivar información acerca de la superficie terrestre y la condición de sus recursos midiendo las variaciones espectrales, espaciales y temporales de energía reflejada y emitida que proviene de una cierta área (Castleman, 1980).

Con el procesamiento digital de imágenes se han obtenido resultados relevantes en el tratamiento de datos espectrales ya que la imagen puede ser analizada, clasificada y descrita simbólicamente empleando únicamente las propiedades ópticas de los objetos terrestres a lo largo de la dimensión espectral y espacial. Por lo tanto el desarrollo de la percepción remota basada en el análisis digital, juega un papel importante para la identificación, evaluación, prospección y modelaje del medio ambiente con fines de explotación racional de los recursos terrestres.

En nuestro país la aplicación de las técnicas del procesamiento digital de imágenes, tienen su origen en la necesidad de analizar las condiciones de su superfi -

cie con el objeto de localizar, identificar y evaluar -- los recursos renovables y no renovables contenidos en ella.

Sin embargo, estas técnicas no han sido aplicadas - en la solución del problema que se refiere a la correcta administración de recursos hidrológicos tanto superficiales como del subsuelo en relación a una región específica.

Un caso particular de este tipo de análisis es la - zona de la cuenca de La Paz y el valle del Carrizal, Baja California Sur, debido a que este estado representa - un porcentaje considerable de las zonas semiáridas de - nuestro país.

Para efecto de que un sistema de procesamiento digital de imágenes resulte útil en la identificación de problemas de este tipo, se requiere proveer al geohidrólogo con elementos que le permitan identificar los trazadores e indicadores de las manifestaciones acuíferas y determinar así la posible existencia de mantos acuíferos superficiales y subterráneos en las imágenes procesadas co -- rrespondientes a las zonas de interés.

Dentro de este contexto, el objetivo de este traba-

jo es aplicar a la imagen LANDSAT, correspondiente a la zona mencionada, varias técnicas de procesamiento para obtener una imagen realzada, las cuales fueron implantadas en un solo módulo computacional que forma parte del paquete de procesamiento de imágenes ELAS de la Dirección de Geografía.

Los factores que tienen que ser considerados en el desarrollo de un algoritmo para el realce de imágenes difieren considerablemente de una aplicación a otra.

Las técnicas aplicadas aquí consisten en un realce de bordes y un realce de contraste. La primera permite resaltar los límites entre rasgos del terreno que presentan diferencias sutiles en los valores de brillantez a lo largo de sus bordes. Por otro lado, en el realce de contraste, se hace una modificación a la escala de niveles de gris de la imagen en cuestión para visualizar con más claridad las diferencias obtenidas en la transformación anterior.

El proceso de realce consiste entonces en hacer a la imagen procesada mejor, en un contexto predefinido, a la imagen original. El resultado de la aplicación de las transformaciones propuestas es una nueva imagen en la cual se realzan los patrones de textura asociados a la

red hidrológica.

Es así como se contribuye en la solución, a escala regional, de un problema de interés nacional utilizando las técnicas de realce para el procesamiento digital de imágenes, las cuales facilitan la interpretación y modelado del medio ambiente con fines predictivos y por lo tanto de planeación.

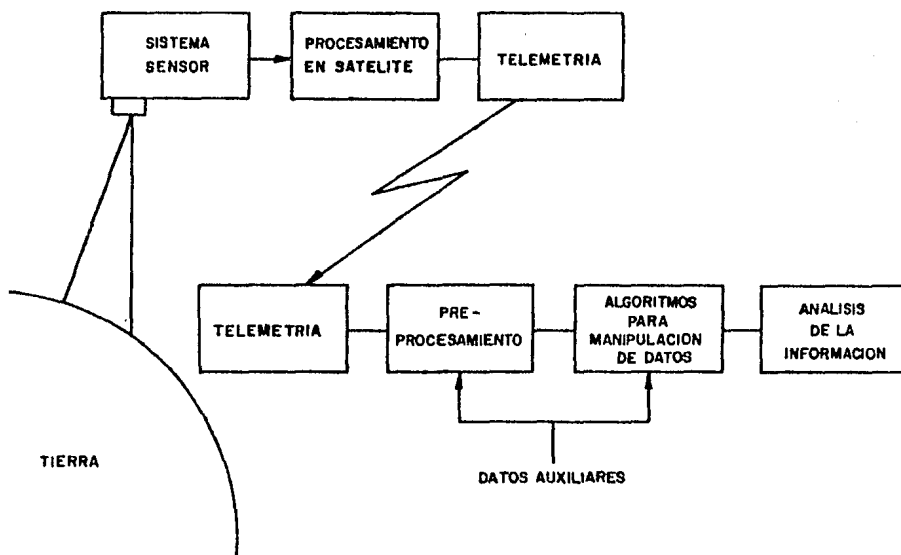


DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA ORGANIZACION DE UN SISTEMA DE PERCEPCION REMOTA Y PROCESAMIENTO DE DATOS.

CAPITULO UNO

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES

1.1 TIPOS DE IMAGENES Y DEFINICIONES.

Antes de dar una definición de lo que es el procesamiento digital de imágenes, es importante definir lo que es una imagen. Entre las diferentes definiciones se encuentra la que proporciona el diccionario Webster y dice lo siguiente: "Una imagen es una representación, semejanza o imitación de un objeto, una descripción gráfica o vívida, algo que sirve para representar a algo más".

De acuerdo a esto, una imagen contiene información descriptiva acerca del objeto que representa, la cual posteriormente se despliega en una fotografía, una pantalla o algún otro dispositivo de despliegue de tal manera que el ojo y cerebro humanos puedan visualizar el objeto de estudio.

Cabe hacer notar que siendo tan amplia la definición de imagen, muchas "representaciones" pueden no ser perceptibles al ojo humano, debido a esto las imágenes pueden ser clasificadas en diferentes tipos basándose en su forma o método de generación, tal y como se muestra en la fig. 1.1 (Castleman, 1980).

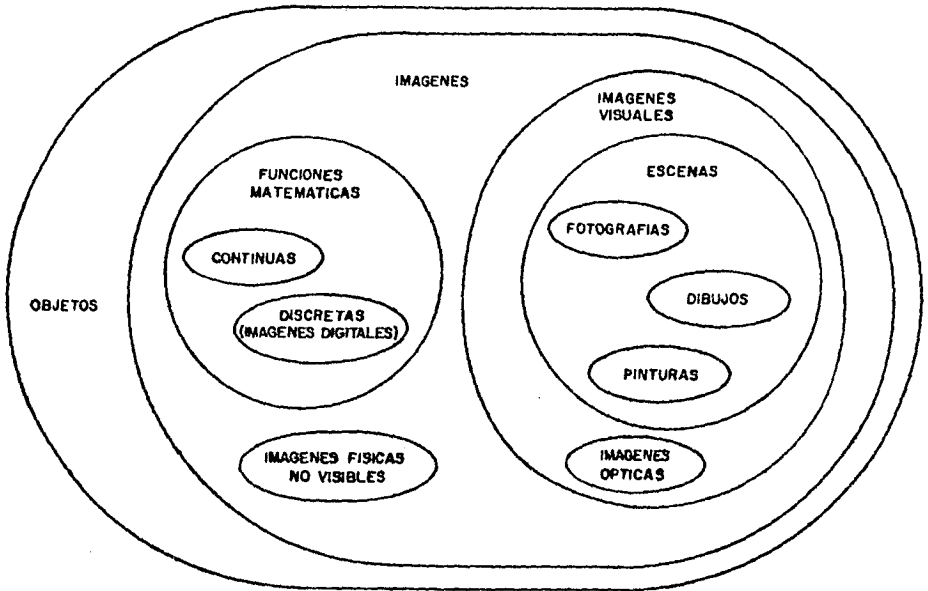


FIG. 1.1 DESCRIPCION SIMBOLICA DE LA REPRESENTACION DE OBJETOS POR DIFERENTES TIPOS DE IMAGENES.

Considerando el conjunto de todos los objetos, las imágenes forman un subconjunto existiendo una correspondencia entre cada imagen en el subconjunto y el objeto que representa. Dentro del conjunto de imágenes se encuentra un subconjunto muy importante, el cual representa todas las imágenes visi --

bles que a su vez contiene diferentes subconjuntos que son representativos de los diferentes métodos de generación. El primero incluye a las fotografías, los dibujos y las pinturas; el segundo contiene a las imágenes ópticas, esto es, aquellas formadas con lentes, rejillas y hologramas.

Las imágenes físicas son distribuciones de las propiedades físicas medibles. Dentro de este contexto se encuentran las imágenes ópticas las cuales son distribuciones espaciales de la intensidad de luz y también son visibles. Por otro lado, las imágenes físicas pueden ser no-visibles, dentro de estas se incluyen las distribuciones de temperatura, presión, altura y los mapas de densidad de población (Castleman, 1980).

Un subconjunto de las imágenes físicas son las imágenes multispectrales. Estas imágenes tienen más de una propiedad definida en cada punto. Por ejemplo, una imagen trispectral tiene tres valores de brillantez, uno para el rojo, otro para el azul y uno más para el verde. Estos valores representan la intensidad en diferentes regiones espectrales, las cuales son perceptibles al ojo humano como colores distintos.

El conjunto de las imágenes también incluye al subconjunto de las imágenes caracterizadas por álgebras abstractas o funciones matemáticas. Este subconjunto a su vez contiene a

las funciones continuas y a las funciones discretas o imágenes digitales. De éstas, solo las imágenes digitales pueden ser procesadas por computadora.

De acuerdo a lo anterior, es posible referirse al procesamiento digital de imágenes como el proceso en el que se somete a las representaciones numéricas de los objetos a una serie de operaciones para obtener el resultado deseado (Castleman, 1980).

El procesamiento de imágenes es, desde el punto de vista computacional, una rama de la teoría de graficación por computadora, basada en los datos contenidos en una imagen. En esencia el procesamiento digital de imágenes es una parte especial del procesamiento de señales en dos dimensiones (o algunas veces en tres). Las escenas se producen a partir de una cámara como sensor, ya sea en un sistema convencional basado en película fotográfica o en un barredor y son manipulados por computadora para que puedan proporcionar información valiosa al analista.

1.2 ELEMENTOS DEL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES.

Típicamente, los sistemas computacionales manejan las imágenes como arreglos o series de elementos. El número de elementos en un arreglo, determina la resolución espacial de

la imagen y el número de bits accesible a cualquier elemento del arreglo (o tamaño de palabra) determina el número de "colores" o escala de valores de gris que puede tener cada elemento. El elemento más pequeño de una imagen corresponde a un elemento único en el arreglo de datos. Este elemento se conoce como pixel, una abreviación de "picture element".

A pesar de que el tamaño de una imagen varía con la aplicación, tiene grandes ventajas seleccionar arreglos (matrices) cuadrados en tamaño y número de niveles de gris. Las elecciones más comunes para el número de pixels en una imagen se basan en potencias de dos (256 por 256, 512 por 512, 1024 por 1024). Por ejemplo, un tamaño típico comparable en calidad con una imagen monocromática de televisión es un arreglo de 512 x 512 con 128 niveles de gris (Star, 1985).

La operación de un sistema de procesamiento digital de imágenes de propósito general puede dividirse en tres categorías principales: la digitización, el procesamiento y el despliegue.

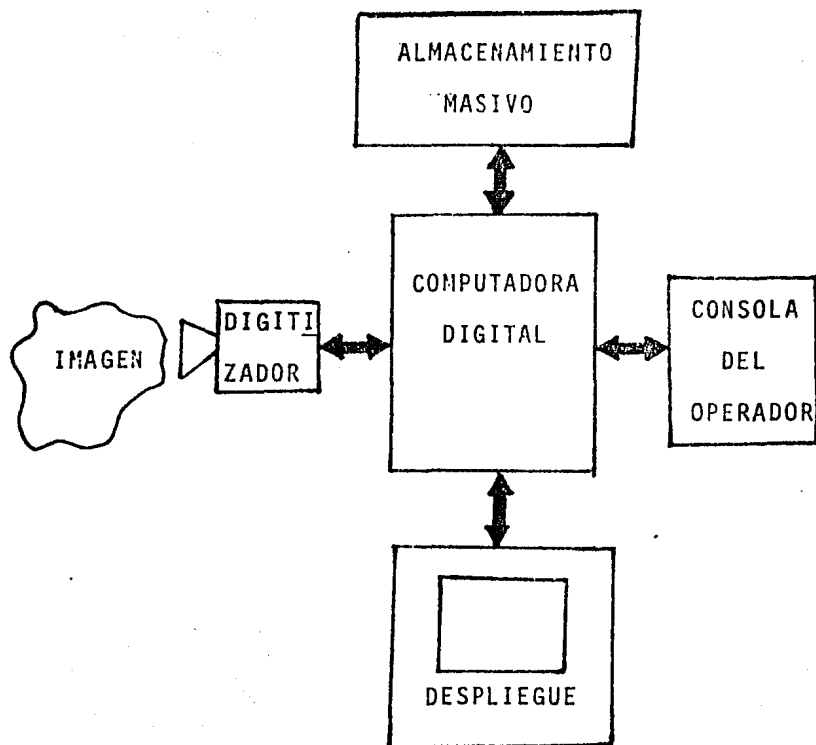


FIG. 1.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES.

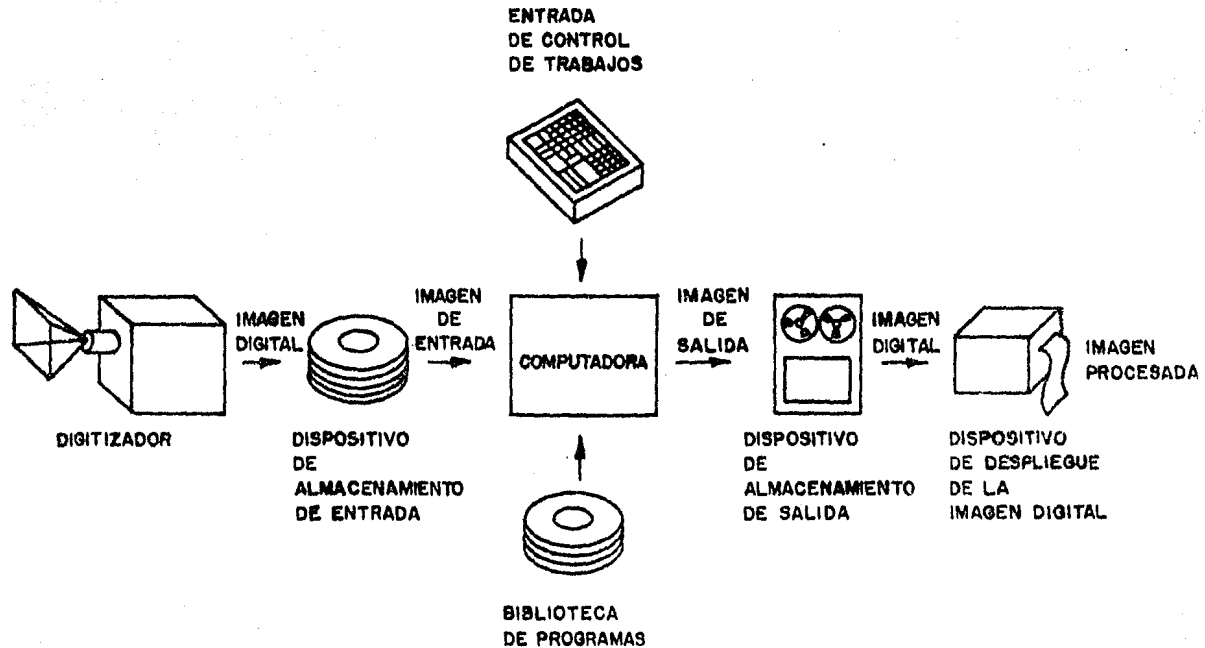


FIG. 1.2a SISTEMA DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMAGENES.

El proceso de digitización se refiere a la conversión de los datos de una imagen a una representación numérica adecuada para ser procesada por computadora. El término conversión se usa en sentido no destructivo ya que la imagen original no es destruida sino que se usa para guiar la generación de la imagen digital (Castleman, 1980).

Los cuatro pasos suficientes para generar una representación numérica de una imagen, y que constituyen el proceso de digitización son: El escudriñamiento (scanning), el muestreo (sampling), la transducción (si la hay) y la cuantización. El primero de estos se refiere al direccionamiento selectivo de localidades específicas dentro del dominio de la imagen o escena; cada una de las localidades direccionadas es un pixel. El segundo, el muestreo, se define como la medición de la brillantez del pixel para asociarlo a un nivel de gris determinado. El tercero, la transducción, se refiere al proceso de convertir la intensidad luminosa medida a un voltaje o corriente eléctricos y finalmente, la cuantización, es la representación de este valor de voltaje o corriente medido por un número entero asociado al nivel de gris correspondiente. La representación esquemática de este proceso se muestra en la fig. -

1.3

Para efectuar este proceso, un digitizador debe tener 5

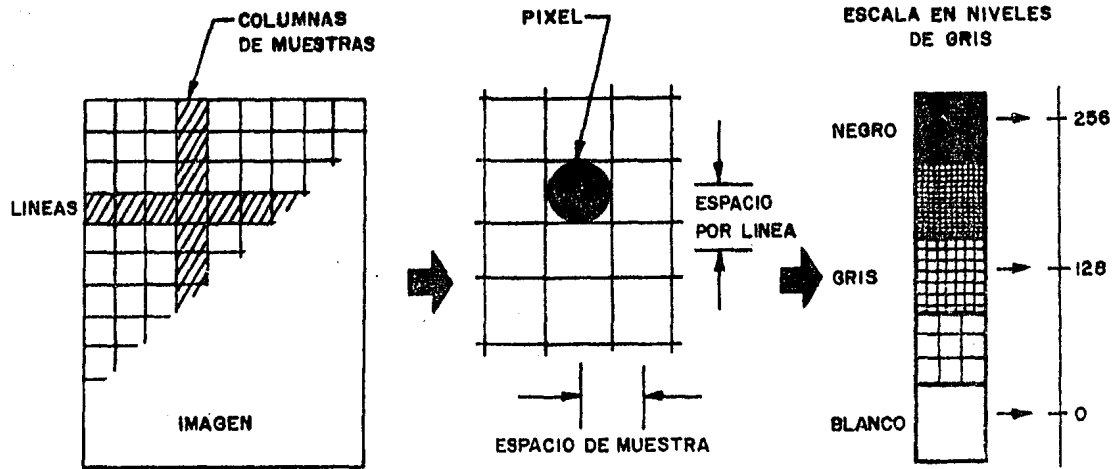


FIG. 1.3 PROCESO DE DIGITIZACION DE UNA IMAGEN.



FIG. 1.3a IMAGEN ORIGINAL



FIG. 1.3b ESQUEMA DE SUBDIVISION DE LA IMAGEN EN
PIXELS UTILIZANDO UNA REJILLA
CARTESIANA DE MUESTREO.

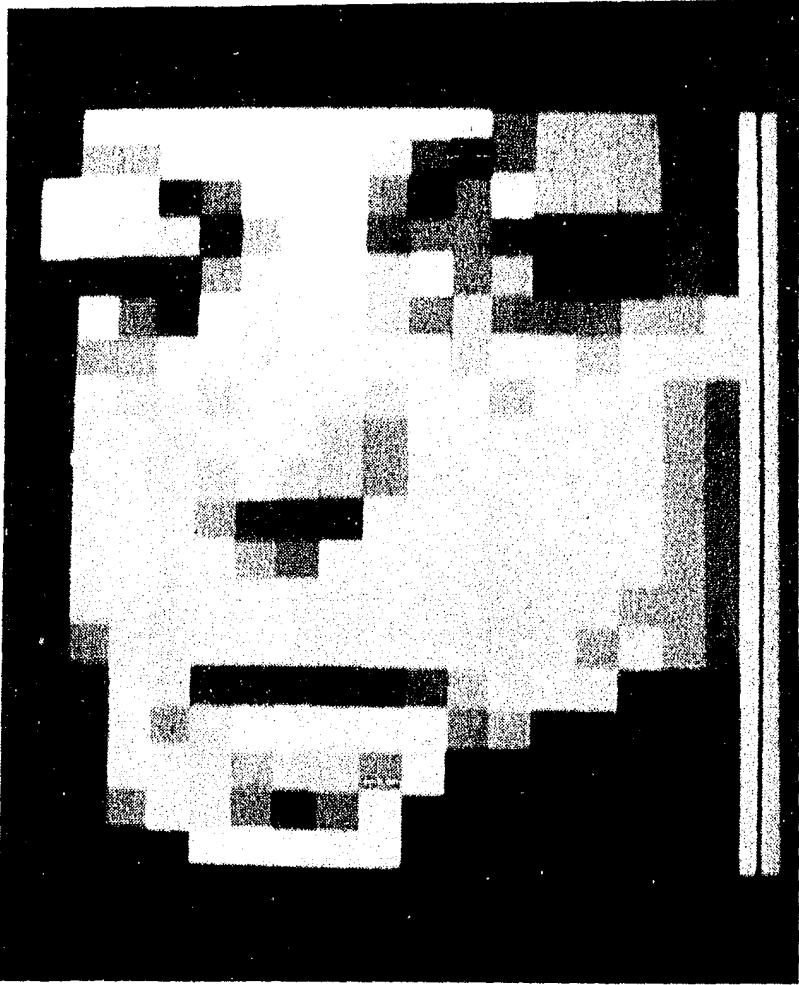


FIG. 1.3c REPRESENTACION DIGITAL DE LOS DATOS DE LA IMAGEN

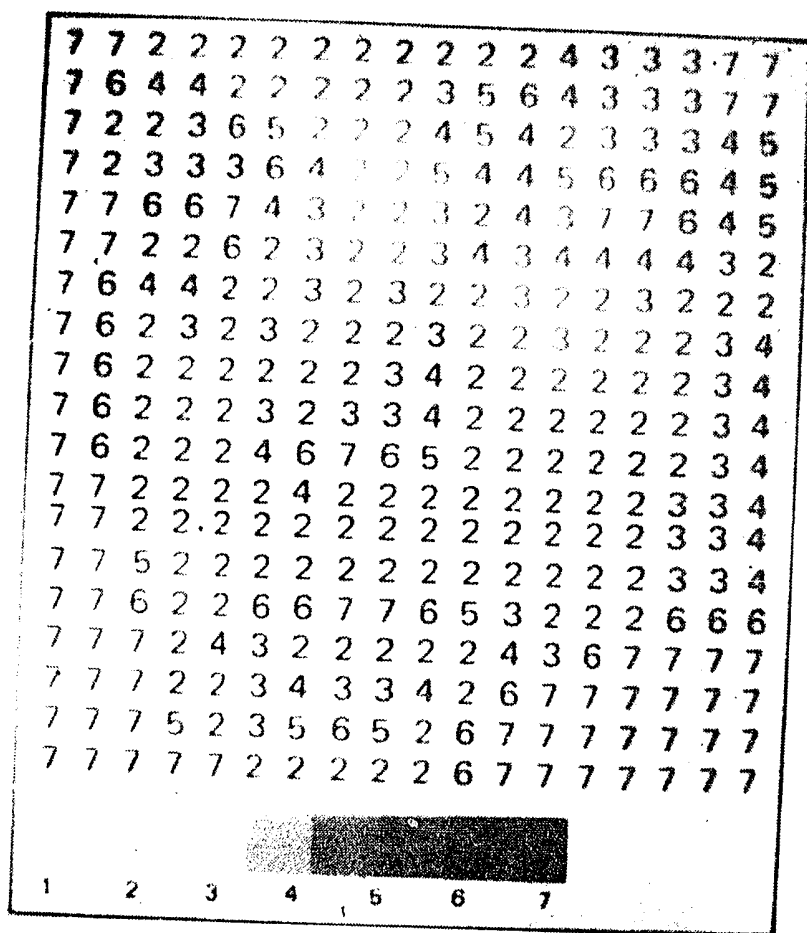


FIG 1.3d CUANTIZACION DE LA IMAGEN EN 7 TONOS DE GRIS.

elementos. El primero es una abertura de muestreo, la cual permite al digitizador acceder los pixels individualmente ignorando el resto de la imagen. El segundo elemento de un digitizador es un mecanismo para hacer un escudriñamiento de la imagen. Este proceso consiste en mover la abertura de muestreo sobre la imagen, siguiendo un patrón predeterminado. El escudriñamiento permite a la abertura de muestreo, direccionar los pixels en orden, uno a la vez.

El tercer elemento es un sensor, el cual puede medir la brillantez de la imagen en cada pixel a través de la apertura de muestreo. El sensor es, comunmente, un transductor que convierte la intensidad luminosa en un voltaje o corriente eléctricos. El cuarto elemento, un cuantizador, convierte la salida continua del sensor en un valor entero. Típicamente el cuantizador es un circuito electrónico llamado convertidor analógico-digital. Este dispositivo produce un número entero que es proporcional a la entrada de voltaje o corriente de acuerdo a una escala predeterminada. El quinto de estos elementos es un dispositivo de salida. Los valores de los niveles de gris producidos por el cuantizador deben de ser almacenados en un formato apropiado para el procesamiento por computadora subsecuente. Técnicamente, el dispositivo de salida podría ser omitido si la imagen hubiera sido procesada en línea. Sin embargo, la digitización de la imagen se hace, frecuentemente fuera de línea y el dispositivo de salida es necesario.

Este dispositivo puede ser cinta magnética, disco o tarjeta . Debido al tamaño de las imágenes digitales, los primeros dos formatos son los más utilizados (Castleman, 1980).

Entre los digitizadores más comunmente utilizados, se encuentran los microdensitómetros, los "flying spot scanners", los analizadores de imágenes (image dissectors) y los digitizadores de video. Los primeros dos dispositivos requieren que la imagen a ser digitizada esté en forma de transparencia -- (por ejemplo, en película negativa) o fotografía. Los analizadores de imágenes y los videos de televisión pueden aceptar imágenes grabadas de esta manera, pero también tienen la ventaja adicional de poder digitizar imágenes naturales que tengan la intensidad luminosa suficiente para excitar al detector (González, Wints, 1978).

El segundo paso en el procesamiento de imágenes digitales, es el procesamiento de la imagen por sí mismo, el cual se lleva a cabo en una computadora digital, mediante la aplicación de modelos y técnicas matemáticas, los cuales están implantados como rutinas de software.

En el diseño de un sistema de procesamiento de imágenes se requiere poner especial atención en las demandas genéricas de la aplicación, como son: un gran volúmen de datos, su es -

estructura multidimensional y baja precisión.

La arquitectura de mayor uso desde los 70's está formada por una minicomputadora convencional y una variedad de dispositivos periféricos estándares y especializados, dependiendo estos últimos en gran medida del tipo de formatos de salida y calidad de la imagen procesada que se requiera (Ekstrom, 1984)

Las limitaciones de estos sistemas se deben al gran volúmen de datos de las imágenes y la incompatibilidad entre la naturaleza serial del hardware y software y la naturaleza multidimensional de la mayoría de los algoritmos requeridos para el procesamiento, además de su bajo poder de cómputo para la ejecución de cálculos intensivos de alto volúmen. Por lo tanto, es muy común que se les adicione la gran capacidad de proceso de una macrocomputadora o de un procesador de arreglos. De esta forma se ha logrado obtener sistemas que proporcionen el medio ambiente requerido para la aplicación de las técni-cas de procesamiento digital de imágenes a problemas reales.

La situación ideal para llevar a cabo el procesamiento de la imagen, es la de tener todos los datos que la forman en memoria central y en segundo término, contar con la capacidad de procesamiento en procesamiento en paralelo. Debido a que el primero de estos requerimientos no es posible de obtener

por el gran volúmen de datos involucrados, los sistemas deben recurrir a una jerarquía de almacenamiento del siguiente tipo.

En el primer nivel habrá un volúmen relativamente pequeño (RAM) de datos presente en la memoria central de la computadora, rápidamente accesibles para ser procesados, los cuales serán alimentados desde unidades de almacenamiento secundario de acceso directo (disco) y moderadamente rápido, en las que se pueden almacenar grandes volúmenes de datos, o bien desde unidades de almacenamiento terciario lentos de acceso secuencial (cinta). Las características de esta jerarquía se muestran en la tabla 1.1 (Ekstrom, 1984).

DISPOSITIVOS	VELOCIDAD DE TRANS. KB/SEG	CAPACIDAD EN LINEA MB	COSTO \$/M ³
Cinta	40- 1000	40-9000	2 - 5
Disco	250- 2500	5-2500	7 -25
Ram	1000-10000	1-64	200-1000

FIG. 1.4 DISPOSITIVO DE ALMACENAMIENTO

Sin embargo, la naturaleza multidimensional de los datos de una imagen entra en conflicto con los dispositivos seriales como son los discos y cintas. El hardware está por lo tanto, limitado particularmente en su habilidad para llevar a cabo las transformaciones ejecutables por los algoritmos, los

cuales requieren de espacios multidimensionales para direccionar los datos y el costo del mapeo de esas coordenadas a direcciones unidimensionales puede ser sustancial.

Las transformaciones que se aplican sobre los datos de la imagen requieren de la interpolación hacia un nuevo arreglo de los datos contenidos en el anterior. Afortunadamente estos datos son de baja precisión y esta característica puede ser explotada para simplificar la implantación y utilizar por ejemplo un procesador de punto fijo para obtener una mayor eficiencia en el proceso.

La característica falta de complejidad en la mayoría de los algoritmos de procesamiento de imágenes debe entenderse por el hecho de que deben ser aplicados a millones de puntos. En la mayoría de los casos, una larga secuencia de pasos muy simples deben ser ejecutados para obtener a la salida un solo pixel. Conceptualmente, esta secuencia debe ser repetida un gran número de veces para procesar una imagen completa. El volumen de datos requiere un balance de costo-desempeño entre los extremos de un simple procesador que internamente procesa todos los puntos de datos serialmente (SISD) y un sistema masivo en paralelo que procesa todos los puntos de datos simultáneamente (SIMD).

Los algoritmos que se aplican pueden ser considerados de uno de dos tipos: procesamiento puntual y procesamiento espacial. Los algoritmos de procesamiento puntual ejecutan operaciones sobre cada pixel de la imagen sin tomar en cuenta los valores de los pixels vecinos. El caso contrario son los algoritmos de procesamiento espacial, en los cuales la salida es una función del valor del pixel de entrada y sus pixels vecinos; la definición de la vecindad depende del algoritmo en cuestión (Ekstrom, 1984).

Algunos ejemplos de las transformaciones aplicables durante el procesamiento de una imagen digital son: Las operaciones radiométricas, entre las que se encuentra el realce de contraste, particionamiento de densidad y el pseudo color. Las operaciones espaciales entre las que se incluye a los procedimientos de registro, el filtrado, la textura espacial, la extracción de rasgos y la clasificación, las operaciones a imágenes multidimensionales, la restauración y compresión de datos entre otras.

La dimensionalidad inherente de los algoritmos para el procesamiento de imágenes, afecta fuertemente la relación de costo-desempeño en el diseño de un sistema. El procesamiento puntual puede ser implementado fácilmente en sistemas unidimensionales utilizando E/S simple. Sin embargo, el procesa -

miento espacial requiere de más sofisticación. Afortunadamente los métodos de acceso de datos disponibles y la posibilidad de aplicar procesamiento en paralelo permiten diseñar sistemas eficientes en costo y desempeño.

Finalmente, el último paso en la secuencia del procesamiento digital de imágenes es el despliegue; que aunque indiscutiblemente es parte de la arquitectura del sistema de cómputo y podría haberse descrito en los párrafos previos, el grado de complejidad al que se ha llegado, merece que sea tratado por separado.

El proceso de despliegue permite que una imagen digital, pueda ser analizada e interpretada visualmente con propósitos de análisis digital. El sistema de despliegue produce una imagen en la cual la brillantez o densidad de cada pixel desplegado se controla directamente usando el nivel de gris correspondiente a ese pixel en la imagen digital.

Las características que determinan la calidad de un sistema de despliegue de imágenes digitales y su conveniencia en aplicaciones específicas son las siguientes: manejo de la imagen, resolución fotométrica y espacial, respuesta a bajas frecuencias y ruido (González, Wints, 1978).

La capacidad de un sistema de despliegue para el manejo de una imagen dada, depende de dos componentes: El primero se refiere al tamaño de la pantalla en sí mismo, el cual debe ser suficientemente grande para permitir el análisis e interpretación convenientes de la imagen. La segunda característica es el tamaño de la imagen digital más grande que el sistema de despliegue puede manejar. Es decir, la unidad de despliegue debe ser adecuada para el manejo del número de líneas y número de muestras por línea de la imagen más grande que pueda ser desplegada. Operaciones tales como desplegar una imagen por partes, y después volver a unirla, resultan demasiado tardadas e imprácticas. La línea en el procesamiento de imágenes actual es el manejo de imágenes sin afectar su precisión ni tamaño. Un tamaño de pantalla inadecuado puede reducir significativamente la efectividad de un sistema completo de procesamiento de imágenes.

En sistemas de despliegue, la resolución fotométrica se refiere a la precisión con la cual el sistema produce el valor de brillantez o densidad correcto en cada pixel. De interés especial es el número de niveles descritos de gris que el sistema puede generar. Esto depende, parcialmente, del número de bits utilizados para controlar la brillantez de cada pixel. Algunas unidades de despliegue son capaces de manejar datos de 4 bits solamente produciendo 16 niveles de gris diferentes,

mientras que otros manejan datos de 8 bits, obteniendo por lo tanto, 256 niveles de gris. Sin embargo, una cosa es diseñar un sistema que pueda manejar datos de ocho bits, y otra es desplegar realmente 256 niveles diferentes de gris. El número efectivo de niveles de gris, nunca es más que el número de niveles de gris de los datos digitales.

Si el ruido electrónico dentro del sistema de despliegue ocupa más de un nivel de gris, entonces el número efectivo de niveles de gris se reduce. Como regla general, el nivel de ruido RMS representa un límite suficientemente bajo para la resolución en la escala de gris. Se utiliza el nivel de ruido RMS ya que se asume que si el ruido tiene una distribución normal, entonces tendrá aproximadamente una desviación estándar de ± 1 el 68% del tiempo (Castleman, 1980).

Otra característica importante de los sistemas de despliegue es la linealidad de la escala de gris. Es decir, el grado en el que la brillantez o densidad es proporcional al nivel de gris de entrada. Cualquier dispositivo de despliegue tiene un nivel de gris de entrada que produce una curva de transferencia de densidad o brillantez. Para su operación adecuada, esta curva debe ser razonablemente lineal y constante de un caso a otro. No obstante, el usuario puede alterar la curva de transferencia para adecuar, a su gusto, la imagen

desplegada. Sin embargo, el procesamiento debe de ser hecho en la computadora, y no en el dispositivo de despliegue, el cual debe de presentar los datos al operador sin ningún "realce".

La respuesta a las frecuencias bajas es otra característica importante. En este punto se considera la habilidad del sistema de despliegue para reproducir grandes áreas en un nivel de gris constante, lo que se conoce como campos planos. Esta habilidad depende, principalmente, de la forma del punto de despliegue, del espaciamiento entre los puntos y de la amplitud y posición del ruido característicos del sistema de despliegue (Castleman, 1980).

Por otro lado, contrariamente al contenido de campos planos en el espectro de la imagen, se encuentran los detalles finos, esto es, la respuesta del sistema de despliegue a las frecuencias altas. El nivel de precisión con el que un sistema puede reproducir los detalles finos depende de la interacción entre puntos, la forma y espaciamiento de los mismos.

Finalmente, la última característica importante en un sistema de despliegue es el ruido. El ruido electrónico en un sistema de despliegue produce variaciones tanto en la intensidad como en la posición del punto. El ruido aleatorio en el

canal puede producir un efecto de sal y pimienta, particularmente visible en los campos planos. La regla mencionada en párrafos anteriores establece que el nivel efectivo de cuantización es aproximadamente igual a la amplitud del ruido RMS. Si el ruido es periódico y de intensidad razonablemente alta, puede producir una muestra sobrepuesta en la imagen desplegada. Si el ruido es periódico y sincrónico con deflexión en las señales vertical y horizontal, puede producir un patrón de barras. La calidad general de un sistema de despliegue es adecuada si todo el ruido, aleatorio y periódico, permanece en ó abajo de un nivel de gris de amplitud (González, Wints, 1978).

Ahora bien, existen dos tipos de sistemas de despliegue, sistema de despliegue volátil y sistema de despliegue permanente o dispositivos de formato duro. Los dispositivos de formato duro producen una imagen al alterar permanentemente las características de absorción de luz de un medio sensibilizado como papel o película fotográfica. Por otro lado, los sistemas de despliegue volátil producen una imagen en una pantalla pero la imagen solo permanece visible mientras la pantalla está activa.

Los sistemas volátiles más comunes utilizan un tubo de rayos catódicos (CRT), haciendo un barrido en forma de rastreador, mientras que la intensidad del punto en un pixel va

ría con la posición para producir la imagen, ya que el haz de rayos continuamente barre la misma, la pantalla debe ser continuamente "refrescada". El refresco se lleva a cabo en una imagen digital ya almacenada. Las pantallas pueden ser refrescadas digitalmente a partir de la imagen digital almacenada en una parte dedicada de la memoria principal, en un registro de corrimiento de estado sólido, en memoria de acceso aleatorio (RAM) o en disco. Un dispositivo de despliegue basado en un CRT debe de ser refrescada cada media hora antes de que la imagen se degrade significativamente. Dentro de esta categoría se encuentran los sistemas de despliegue fotocromático y los sistemas basados en rayos laser (González, Wints, 1978).

En la categoría de sistemas de despliegue permanente, se encuentra el sistema de grabación en película fotográfica utilizando un tubo de rayos catódicos. Este sistema consiste de una cámara fotográfica que se monta enfrente de un sistema de despliegue de CRT. Esta categoría incluye a todos los sistemas de impresión (González, Wints, 1978).

La rápida evolución de estos sistemas de procesamiento digital de imágenes, ha sido provocada por diversos factores. El principal de ellos es el rápido avance de la tecnología de semiconductores. La eficiencia y el costo de la memoria y los

elementos de proceso que forman una computadora han mejorado significativamente en la última década, permitiendo una aplicación práctica y efectiva en costo de las aplicaciones del procesamiento de imágenes a problemas reales.

Un segundo factor interrelacionado con el primero, es la madurez de la ciencia del procesamiento de imágenes. Durante la última década se ha dedicado un gran esfuerzo a la investigación y desarrollo de estas técnicas y su aplicación. Como resultado los algoritmos han sido refinados, las características de los datos han sido definidas y los problemas específicos han sido explícitamente descritos en términos de soluciones mediante técnicas de procesamiento de imágenes. Esto ha motivado el diseño de nuevas arquitecturas de sistemas adecuadas para lograr el procesamiento de imágenes de una manera efectiva en tiempo y costo.

Un tercer factor ha sido el crecimiento de la tecnología de percepción remota digital y comunicaciones. El volumen de datos capturado se ha incrementado en varias órdenes de magnitud. Los datos son generados por diversas técnicas a través del amplio espectro de longitudes de onda, radar de apertura sintético, rayos X y ultrasonido son algunos ejemplos.

Colectivamente estos factores han provocado un impulso comercial para el procesamiento de imágenes. La combinación de un incremento en la inversión comercial y el interés en nuevas aplicaciones acelerará el desarrollo de nuevas capacidades y de la configuración de arquitecturas cada vez más especializadas (Ekstrom, 1984).

CAPITULO DOS

FUNDAMENTOS FISICOS PARA LA CREACION DE UNA IMAGEN DIGITAL

2.1 MECANISMOS DE FORMACION Y CAPTURA DE UNA IMAGEN, MO DELADO FISICO Y MATEMATICO.

De nuestros cinco sentidos, la visión ocupa un lugar muy importante, ya que proporciona la mayor parte de la información que entra a nuestro cerebro a través de las imágenes que provienen del medio ambiente.

Con la palabra "imagen" pueden asociarse muchas ideas. Por ejemplo, nuestra asociación inherente con las percepciones visuales nos predisponen a concebir una imagen como un estímulo sobre la retina del ojo, en cuyo caso el mecanismo óptico gobierna la formación de la imagen. Partiendo de esto, podemos considerar al ojo, como el sistema natural para la obtención de imágenes, el --cual se constituye por dos subsistemas básicos: el sub -sistema de formación de imágenes representado por el iris y el cristalino, y el subsistema sensor o de registro de imágenes representado por la retina fig. 2.1.

Ahora bien, para fines prácticos, la imagen generada por este sistema no posee las características adecuadas para que pueda ser procesada digitalmente. De aquí que el hombre haya buscado otras alternativas para generar imágenes que pudieran ser transformadas y evaluadas de a --

cuendo con sus necesidades.

Actualmente, las imágenes son capturadas por sensores que operan en regiones de energía diferentes a las que utiliza el sistema visual humano (ej: radar de apertura sintética, holografía acústica y sistemas de radiación penetrante) pero que sin embargo, están constituidos por los mismos subsistemas que éste. Con base en esto, se puede representar inicialmente un sistema de captura de imágenes mediante un diagrama de bloques como el de la fig. 2.2.

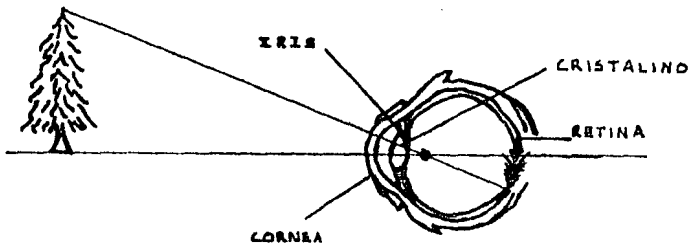


FIG. 2.1 EL OJO COMO SISTEMA DE FORMACION DE IMAGENES.

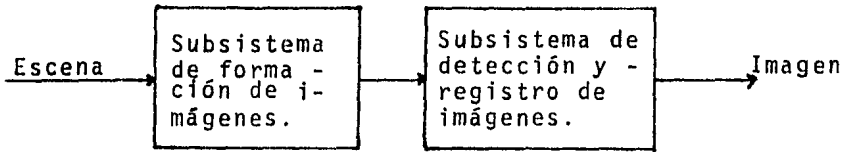


FIG. 2.2 REPRESENTACION EN DIAGRAMA A BLOQUES DEL PROCESO DE CAPTURA DE UNA IMAGEN.

A continuación se discuten en detalle cada uno de estos subsistemas.

2.1.1 SUBSISTEMA DE FORMACION DE IMAGENES.

Los elementos principales de un sistema de formación de imágenes están representados en forma esquemática en la fig. 2.3.

Como puede verse, se tiene un objeto $f(\xi, \eta)$ referido al sistema coordenado (ξ, η) , que se denomina plano --

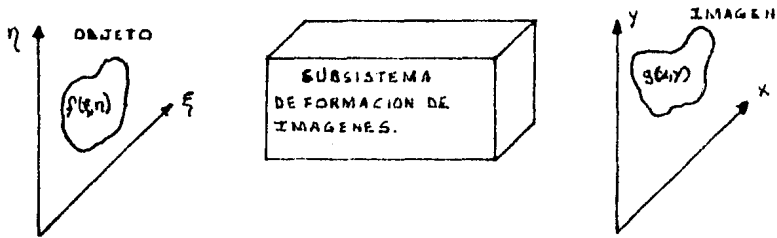


FIG. 2.3 ESQUEMA DE UN SISTEMA DE FORMACION DE IMAGENES

del objeto. El objeto es iluminado por una fuente de - - energía radiante. La energía reflejada, transmitida o emitida por el objeto se propaga a través del espacio. En un sistema de formación de imágenes, la "caja" en la fig. 2.3, intercepta la propagación de la energía radiante y la transforma de tal manera que en el plano de la imagen se forma la imagen del objeto. Con base en esto, se puede hacer referencia a una imagen como una función de intensidad de luz bidimensional, denotada por $g(x,y)$, donde el valor o amplitud de "g" en las coordenadas espaciales

(x,y) dan la intensidad de la imagen (nivel de gris) de tal punto (González, Wintz, 1978).

Es importante señalar que un sistema de formación - de imágenes posee una propiedad llamada de "vecindad" en el proceso en el cual se forma la imagen. Esto quiere decir que un punto (x,y) en el plano de la imagen es la imagen no solo de un punto (ξ,η) en el plano del objeto, sino que también puede ser una función de las contribuciones de otros puntos en la vecindad (posiblemente infinita) de (ξ,η) . La imagen $g(x,y)$ correspondiente a la distribución de energía radiante $f(\xi,\eta)$, de un objeto, es la acumulación de todas aquellas contribuciones infinitesimales. Partiendo de esto se puede describir a una imagen en forma general con la ecuación (Andrews, Hunt, - 1977).

$$g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x-\xi,y-\eta) f(\xi,\eta) d\xi d\eta \quad (1)$$

donde la función h determina cómo las componentes de energía radiante en la vecindad de un punto del objeto, contribuyen a la distribución de energía radiante en la vecindad de la imagen del punto del objeto. h , es la función de respuesta al impulso del sistema.

Tipos de sistemas para la formación de imágenes. Existen dos tipos de sistemas de formación de imágenes de uso común.

- a) Sistemas de radiación penetrante.- Los sistemas de radiación penetrante son básicamente de dos tipos: activos y pasivos. En un sistema activo, se tiene una - - fuente de iluminación como parte del sistema de formación de imágenes y por tanto, se tiene control sobre ella. La imagen se forma utilizando una placa negativa siguiendo el principio de operación de la cámara - - fotográfica como se muestra en la fig. 2.4.

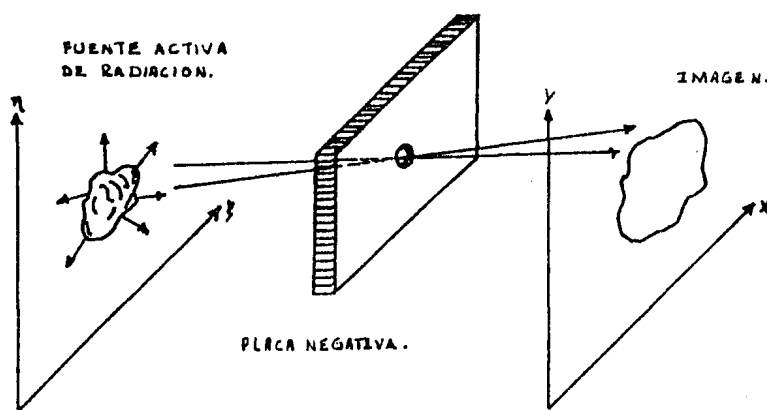


FIG. 2.4 SISTEMA ACTIVO DE FORMACION DE IMAGENES POR RADIACION PENETRANTE.

En un sistema pasivo, el objeto es iluminado por una fuente de radiación (haz corpuscular o radiación electromagnética) que no forma parte del sistema de formación de imágenes. Esta radiación penetra el objeto y la densidad relativa del material que lo constituye atenúa el haz de radiación, y una proyección a través del objeto es observada en el plano de la imagen (proceso que se muestra en la fig. 2.5). A este tipo de imágenes se les llama radiografías (Andrews, Hunt, 1977).

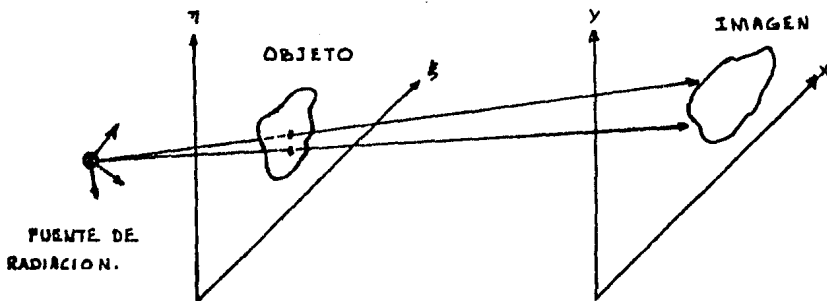


FIG. 2.5 SISTEMA PASIVO DE FORMACION DE IMAGENES POR PENETRACION DE RADIACION.

b) Sistemas ópticos.- La fig. 2.6 muestra un sistema óptico típico de formación de imágenes.

Un punto en el plano del objeto produce una pequeña mancha en el plano de la imagen, debido a que los rayos de luz provenientes del objeto se concentran y amplifican por medio del sistema apertura-lente. Este proceso generalizado a todos los puntos del objeto, da origen a la imagen (Slater, 1980), cuya representación matemática está dada por la ecuación (1).

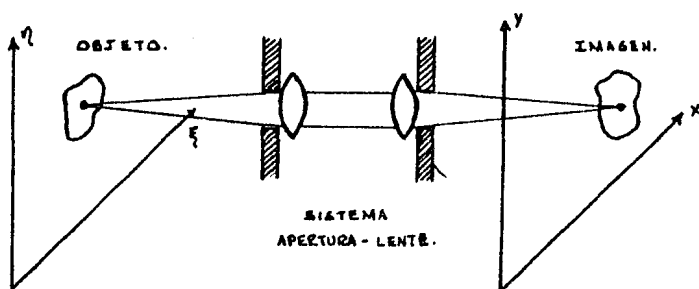


FIG. 2.6 SISTEMA OPTICO DE FORMACION DE IMAGENES.

Los sistemas ópticos producen dos efectos sobre la imagen: la llamada proyección y una degradación debido a los efectos de difracción y a las aberraciones de las lentes. La proyección se manifiesta por la inversión de la imagen y por efectos de amplificación (Castlëman, - -

1980). Por el contrario, el fenómeno de difracción se elimina en los sistemas de radiación penetrante debido a la naturaleza misma de penetración de la radiación y a las longitudes de onda extremadamente pequeñas que se manejan (Andrews, Hunt, 1977).

2.1.2 SUBSISTEMA DE DETECCION Y REGISTRO DE LA IMAGEN,

En cuanto al mecanismo de detección y registro de imágenes, éste se clasifica en dos tecnologías: fotográfica y no fotográfica (Lintz, Simonett, 1976).

La tecnología fotográfica tiene la cualidad de combinar la detección y captura en una misma entidad: la película. Algunos dispositivos que representan esta tecnología son la cámara aérea, la cámara panorámica y la cámara multibanda. Para registrar la imagen en película se utiliza el hecho de que las sales halógenas de la plata sufren cambios al ser expuestas a la luz; estos cambios causan la deposición de plata libre cuando las sales están sujetas a una reducción química. El patrón* de plata depositada en el acetato origina la imagen.

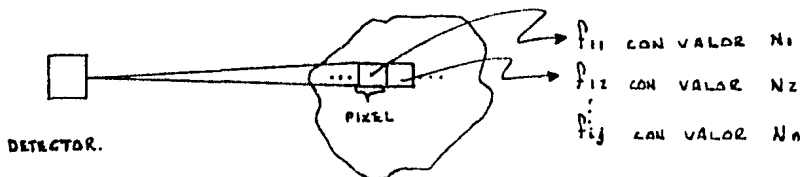
* Uno de los aspectos más interesantes del universo es que puede considerarse hecho de patrones. Un patrón es esencialmente un arreglo y está caracterizado por el orden de los elementos que lo constituyen y no por la naturaleza intrínseca de tales elementos.

Por otro lado, los sistemas no fotográficos requieren la separación de los procesos de detección y registro, sin embargo, tienen la ventaja de convertir la imagen a un formato digital que las hace adecuadas para el procesamiento por computadora.

Este tipo de dispositivos capta la intensidad de luz por medio de fotoemisión de electrones; usualmente están constituidos por tres subsistemas: óptico para formar la imagen, superficie fotoactiva para detectar la imagen y un barreador electrónico para leer la imagen formada sobre la superficie fotoactiva. Algunos ejemplos de estos dispositivos son el barreador multiespectral, el barreador en el infrarrojo y el espectroradiómetro (Slater, 1980).

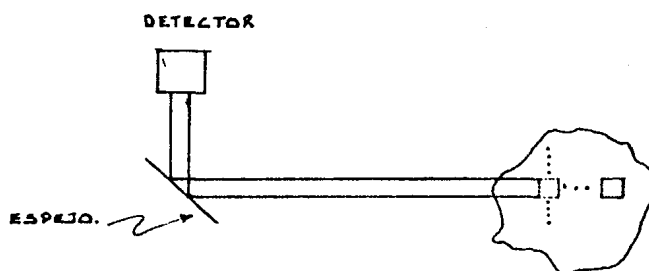
Es importante señalar que al utilizar este tipo de sistemas la imagen se crea utilizando alguno de los siguientes esquemas:

a) Un elemento a la vez.



En este esquema, la imagen se va formando elemento por elemento. El detector se posiciona en una línea del plano del objeto y la va barriendo pixel a pixel, obteniendo para cada uno de ellos un valor de radiancia; esto se hace hasta terminar la línea. El detector cambia de línea y repite el procedimiento hasta cubrir la escena.

b) Línea por línea.

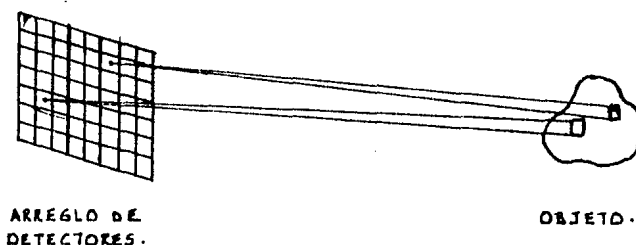


En este esquema, la imagen se genera línea por línea. El detector barre el plano del objeto en líneas normales a la plataforma donde opera el sensor, por medio de un espejo oscilante a una velocidad tal, que se generan líneas de barrido continuas.

El espejo oscilante proporciona el movimiento de barrido normal a la trayectoria de la luz de la plataforma mientras que ésta se mueve adelantando el patrón de ba -

rrido. La velocidad de barrido se ajusta para que las líneas de barrido sean adyacentes y sin traslape. El resultado es una imagen gráfica de la radiancia de la escena (Lintz, Simonett, 1976).

c) Toda la imagen a la vez.



En este esquema, la imagen se forma de un solo golpe. Esto se debe a que los detectores actúan en forma paralela; y como cada sensor detecta la radiancia de un solo pixel, entonces la información emerge del arreglo toda a la vez, dando origen así a la imagen (Manual of Remote Sensing, 1975).

Por otro lado, el proceso de detección y registro de la imagen no puede separarse de la introducción de ruido a este proceso, ya que los datos muestreados son alterados por el ruido causado por el sensor o en general por el sistema electrónico. Puede suceder que haya -

también presente algún mecanismo de degradación diferente al ruido (Andrews, Hunt, 1977).

En los sensores no fotográficos se tienen dos fuentes de ruido: el ruido debido a las fluctuaciones estadísticas de la emisión de electrones; y el ruido debido a las fluctuaciones térmicas de los electrones de los circuitos que muestrean y procesan la corriente de fotoelectrones.

En el caso de los sistemas fotográficos, el ruido se debe a las fluctuaciones de la amplitud de la distribución de los granos de plata que dan origen a la imagen (Andrews, Hunt, 1977).

Con base en toda la información anterior, se puede resumir el proceso de captura de una imagen en el siguiente diagrama de bloques.

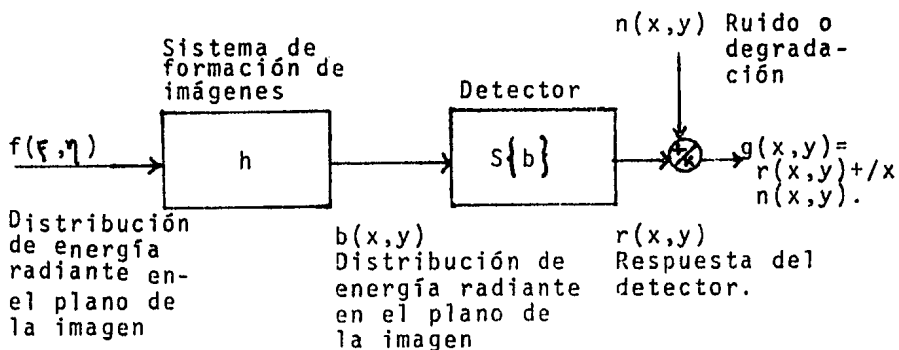


FIG. 2.7 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE CAPTURA DE UNA IMAGEN.

De acuerdo con el diagrama anterior, la distribución de energía radiante $f(\xi, \eta)$ del objeto es transformada por un sistema (generalmente lineal) con una función de respuesta al impulso h , en la distribución de energía radiante $b(x, y)$ de la imagen. Esta distribución de energía es transformada a su vez por la respuesta del detector S . Las intensidades detectadas no pueden registrarse sin ruido por lo tanto, se agrega un término de ruido que puede ser aditivo o multiplicativo. La imagen resultante es $g(x, y)$.

2.2 DIGITIZACION Y CUANTIZACION DE UNA IMAGEN.

Para que una imagen pueda procesarse por computadora, es necesario convertirla a un formato digital. Con este fin, después de que la imagen ha sido formada y registrada, ésta debe discretizarse y cuantizarse.

El proceso de discretización consiste en obtener una aproximación de la imagen continua $g(x, y)$ por medio de un conjunto de muestras igualmente espaciadas, ordenadas en forma de un arreglo de $N \times M$ elementos, en donde cada muestra es una cantidad discreta. Considerando un formato de discretización cartesiano, una imagen discretizada puede representarse como aparece en la fig. 2.8. Una vez que la imagen ha sido discretizada, las --

muestras resultantes deben asociarse a un nivel de gris determinado. Para esto, debe cuantizarse la imagen. La cuantización entonces consiste en dividir el rango de valores de los elementos discretos de la imagen en intervalos asociados con un nivel de gris. Todos los valores -- dentro de un mismo intervalo se representan por un solo nivel. De esta manera, si se divide el rango de valores -- en dos intervalos, tendremos sólo dos niveles de gris. Por tanto, los elementos de la imagen digital tomarían -- los valores 1 ó 0 tal y como se muestra en la fig. 2.9.

$$g(x,y) \approx \begin{bmatrix} g(0,0) \dots\dots\dots g(0,M-1) \\ \vdots \\ g(N-1,0) \dots\dots\dots g(N-1,M-1) \end{bmatrix}$$

FIG.2.8 REPRESENTACION DE UNA IMAGEN DISCRETIZADA.

$$g(x,y) \approx \begin{bmatrix} 0 \ 1 \ 0 \dots\dots\dots 1 \ 1 \\ \vdots \\ 0 \ 0 \ 1 \dots\dots\dots 0 \ 1 \end{bmatrix}$$

FIG. 2.9 REPRESENTACION DE UNA IMAGEN DIGITAL.

Una vez que la imagen continua se ha discretizado, podemos referirnos a ella como una imagen digital. Luego entonces, se le puede considerar como una matriz cuyos - índices de renglones y columnas identifican un punto en la imagen, y el valor del elemento correspondiente de la matriz identifica el nivel de gris en tal punto. Los elementos de este arreglo digital son llamados elementos de la imagen o pixels.

Es importante hacer notar que los procesos anteriormente descritos dependen del número de muestras y niveles de gris que se manejen. Es práctica común en el procesamiento digital de imágenes hacer que estas cantidades sean números enteros potencias de dos, esto es:

$$N = 2^n \quad (2)$$

$$G = 2^m \quad (3)$$

donde

N = número de muestras

G = número de niveles de gris

El número b, de bits utilizados para almacenar una imagen digitizada está dado por

$$b = N \times M \times m \quad (4)$$

donde

m = número de bits por muestra

La resolución de la imagen digital está íntimamente ligada con los valores de N y m , sin embargo, su elección depende de los requerimientos de la aplicación, ya que el incremento de estos valores aumenta los requerimientos de almacenamiento y proceso como puede verse en la tabla 2.1. Para una imagen LANDSAT se manejan típicamente 256 niveles de gris y 7,637,760 pixels (González, Wintz, 1978; Manual of Remote Sensing, 1975).

N^m	1	2	3	4	5	6	7	8
32	128	256	512	512	1,024	1,024	1,024	1,024
64	512	1,024	2,048	2,048	4,096	4,096	4,096	4,096
128	2,048	4,096	8,192	8,192	16,384	16,384	16,384	16,384
256	8,192	16,384	32,768	32,768	65,536	65,536	65,536	65,536
512	32,768	65,536	131,072	131,072	262,244	262,244	262,244	262,244

TABLA 2.1 NUMERO DE BYTES DE 8-BITS DE ALMACENAMIENTO PARA VARIOS VALORES DE N Y m.

CAPITULO TRES

FORMALISMO MATEMATICO DE UNA IMAGEN

3.1 CARACTERIZACION MATEMATICA DE UNA IMAGEN.

Dentro de las actividades principales del proceso de procesamiento digital de imágenes se encuentran:

- La transformación adecuada de la información bidimensional respectiva, para relacionarla a un marco de referencia adecuado para una transformación específica, y
- la extracción particular de ciertas características de una imagen partiendo de dichas transformaciones, con el objeto de apoyar una interpretación humana de tal información.

Para realizar cualquiera de estas dos actividades, es necesario poder referirse a la información bidimensional de alguna forma. Es decir, definirla en base a especificaciones que nos permitan manipularla de una manera u otra. Ahora bien, esto se hace extensivo al proceso de transformación que se desee aplicar.

Dentro del contexto, del procesamiento digital de imágenes este problema es reconocido como "caracterización matemática". Esta caracterización consiste en modelar matemáticamente

ticamente la escena o el sistema físico que se desea utilizar para los fines ya mencionados. Dicho modelo implica necesariamente una simplificación o idealización de los parámetros y variables que definen tal sistema (Lira, 1984).

Existen dos enfoques para la solución de este problema, una descripción determinista y una descripción estadística de tipo estocástico. En una descripción determinista se suponen o se conocen el valor de cada punto de la escena o imagen y la relación con sus vecinos; y a partir de éstos se define una función matemática $Z=f(x,y)$ donde Z es ta definida $\forall x,y \in D$, donde D es un dominio de R^2 . Dicha función es la relación que define la imagen correspondiente a la escena, es decir, la imagen es la representación o modelo matemático de una escena del mundo físico.

En una descripción estadística no se conoce una relación matemática que proporcione una relación definida y única entre los puntos de la escena, sino que ésta se describe por medio de propiedades promedio, utilizando las funciones de distribución y densidad, que son de tipo probabilístico. En esta descripción, la variable Z se define como una variable aleatoria (Pratt, 1978).

Como ya se mencionó anteriormente, la imagen siempre se obtiene a través de un mecanismo que captura la información de la escena. Luego entonces, el proceso de captura -

es una operación realizada sobre la escena y el sistema de captura es un operador que transforma la información del marco de la escena al de la imagen.

Como una imagen es la representación espacial de la energía radiante de la escena, la función que la describe en forma más general, depende de las coordenadas espaciales (x,y) , del tiempo y del parámetro λ , que en el caso de radiación electromagnética, es la longitud de onda utilizada en el proceso de captura de información. La función f está acotada ya que los valores que puede tener son finitos y dependen de la escala utilizada para medirlos. Escrita en su forma más general es entonces

$$f_{\min} \leq f(x,y,t,\lambda) \leq f_{\max}$$

Los valores x,y también están acotados y su intervalo de validez depende del tamaño espacial de la imagen y del sistema de coordenadas que se utilice para representar x,y entonces

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$$

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$$

Los parámetros λ y t pueden tomar cualquier valor a partir de cero:

$$0 \leq \lambda \leq \infty$$

$$0 \leq t \leq \infty$$

La función f puede verse como un campo escalar o vectorial. Si la imagen es multiespectral en relación al parámetro λ , es decir, si f está definida para un conjunto de valores λ , es vectorial, si esta definida para un solo valor de λ , entonces el campo se escalar.

3.2 OPERADORES DE CAPTURA DE INFORMACION.

La captura de una imagen tiene básicamente su razón de ser, en la necesidad de referir la información de una escena a un marco de referencia simple y de más fácil manejo que el de la escena misma, o a partir del cual el tratamiento y extracción de patrones de la escena sea posible por métodos matemáticos, físicos y computacionales.

El sistema de captura puede verse como un operador caracterizado por la función de respuesta al impulso. El instrumento es, pues, un transformador de información que simplifica la escena y la presenta en un formato adecuado para su manejo, interpretación y modelaje físico posterior (Lira, 1984).

Esta transformación es en su forma más general, el ma

peo de un conjunto de funciones de entrada $f_i(x,y)$ a un conjunto de funciones de salida $g_j(x,y)$ donde $i=1,2,\dots,n$. Dicho mapeo puede representarse por un conjunto de operadores O_j para $j=1,2,\dots,m$, los cuales relacionan las funciones de entrada con las de salida de la siguiente manera (Pratt, 1978):

$$\begin{aligned} g_1(x,y) &= O_1\{f_1(x,y), f_2(x,y), \dots, f_n(x,y)\} \\ g_2(x,y) &= O_2\{f_1(x,y), f_2(x,y), \dots, f_n(x,y)\} \\ &\vdots \\ g_m(x,y) &= O_m\{f_1(x,y), f_2(x,y), \dots, f_n(x,y)\} \end{aligned}$$

Cabe mencionar aquí que los operadores O_j no sólo pueden representar la transformación escena \longrightarrow imagen, sino también la transformación imagen \longrightarrow imagen.

Los operadores O_j pueden tomar varias formas en lo que se refiere a su representación matemática o estimación física. De esta forma se puede hablar de una función Sinc, una función de Bessel o bien de la función delta de Dirac como ejemplos de operadores.

Para entender el proceso mencionado, elijamos por sim-
pleza el operador de singularidad delta de Dirac. Existen

otros operadores de singularidad pero el de Dirac está relacionado con el problema de muestreo de información y de ahí su importancia, ya que el muestreo de una escena es el principio de su análisis (Lira,1984).

La función delta de Dirac es un operador que en dos dimensiones se define como sigue:

$$\delta(x-\xi, y-\eta) = \begin{cases} \infty & x=\xi, y=\eta \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

y posee las siguientes propiedades fundamentales:

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x,y) dx dy = 1 \quad \forall \epsilon > 0 \text{ y } \epsilon \text{ infinitamente pequeño} \\ \text{b)} \quad & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) \delta(x-\xi, y-\eta) d\xi d\eta = f(x,y) \end{aligned}$$

Esta relación se conoce como la propiedad de Sifting y es básica para entender el proceso de captura o transformación de una imagen, puesto que de todos los valores para los que está definida la función f se selecciona uno de ellos: el que corresponde al punto (x,y) y esto es la

esencia de la captura de información. Esto quiere decir - que una función de entrada al sistema de imágenes puede re presentarse por una suma de funciones delta con factores - de peso $f(\xi, \eta)$.

Un caso de mapeo de especial interés porque permite - visualizar al proceso de captura es aquel donde se tiene - una relación unívoca entre las funciones de entrada y la - de salida.

$$g(x,y) = Of(x,y) \quad (5)$$

donde el operador O es lineal aditivo.

La relación (1) en combinación con la propiedad de - Sifting proporciona la siguiente caracterización para una imagen continua:

$$g(x,y) = O \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \eta) \delta(x-\xi, y-\eta) d\xi d\eta \right\} \quad (6)$$

Suponiendo que el operador O es lineal y que la pro - piedad de aditividad es válida para integrales, entonces - se tiene

$$g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ f(\xi,\eta) \delta(x-\xi, y-\eta) \right\} d\xi d\eta \quad (7)$$

lo que significa que la imagen g es formada por la suma de las contribuciones de todos los valores de la función f transformada por 0.

Puesto que $f(\xi,\eta)$ es independiente de (x,y) por ser un operador lineal, la imagen g puede escribirse como

$$g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi,\eta) \left\{ \delta(x-\xi, y-\eta) \right\} d\xi d\eta \quad (8)$$

$$\text{El término } h(x,y,\xi,\eta) = \left\{ \delta(x-\xi, y-\eta) \right\} \quad (9)$$

se conoce como la función de dispersión de punto (point-spread function) o como la respuesta del sistema (0) a la función impulso. Sustituyendo la ecuación (5) en la (4) obtenemos la expresión:

$$g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\xi,\eta) h(x,y,\xi,\eta) d\xi d\eta \quad (10)$$

la cual es llamada integral de superposición o integral de Fredholm del primer tipo, y donde se debe cumplir que:

$$f(\xi,\eta) \neq 0 \quad (\xi,\eta)$$

$$\begin{aligned}
 g(x,y) &\geq 0 \quad \forall (\xi,\eta) \\
 h(x,y) &\geq 0 \quad \forall (x,y,\xi,\eta) \\
 \iint f(\xi,\eta) d\xi d\eta &= \iint g(x,y) dx dy \quad \delta \\
 \iint h(x,y,\xi,\eta) dx dy &= 1 \quad \forall (\xi,\eta)
 \end{aligned}$$

Esta relación establece que si la respuesta de 0 a un impulso es conocida, entonces la respuesta a cualquier entrada $f(\xi,\eta)$ puede calcularse por medio de la ecuación -- (10). En otras palabras, un sistema lineal 0 está completamente caracterizado por su respuesta al impulso (González, Wintz, 1978; Andrews, Hunt, 1977).

El modelo descrito en la fig. 3.2a y la ecuación (10) es referenciado como un sistema continuo-----continuo par -- tiendo del análisis y notación empleada.

La descripción de la función h en términos de las -- coordenadas (x,y,ξ,η) es la más general y permite a h va -- riar con respecto a la posición tanto en el plano del objeto como en el plano de la imagen. No obstante, muchos sistemas de captura y/o transformación de imágenes, actúan uniformemente a través de los planos mencionados, de tal -- forma que para el caso en que 0 es lineal (invariante frente a translaciones) se tiene que,

$$0 \left\{ \delta(x-\xi, y-\eta) \right\} = h(x-\xi, y-\eta) \quad (11)$$

entonces la ecuación (6) se reduce a una expresión de convolución bidimensional entre h y f ,

$$g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x-\xi, y-\eta) f(\xi,\eta) d\xi d\eta \quad (12)$$

lo cual significa que el sistema de captura, analiza en un proceso de barrido punto a punto, la escena a través del plano (ξ,η) de acuerdo al diagrama de la figura 3.1.

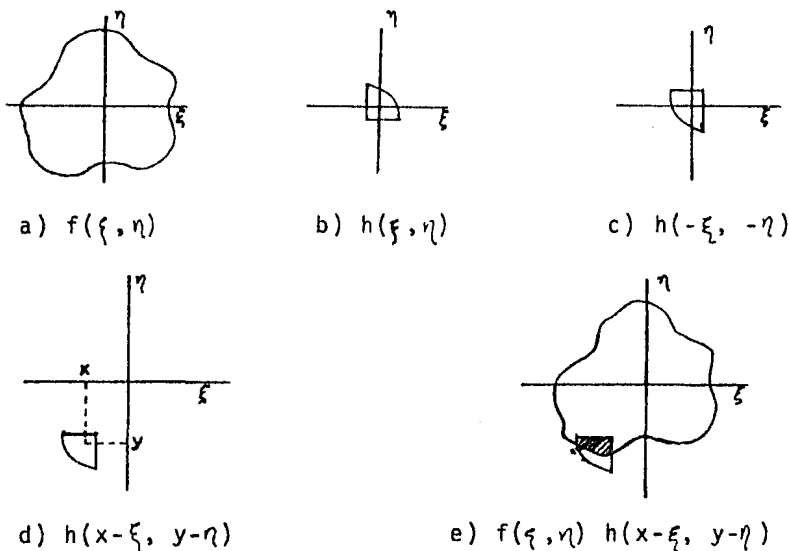


FIG. 3.1 EJEMPLO GRAFICO DE UNA CONVOLUCION BIDIMENSIONAL

El área sombreada, representa la suma de la energía radiante de la escena multiplicada por la función de respuesta del detector.

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que la convolución es la caracterización "natural" del proceso físico de captura de la imagen. De hecho, esta es la forma en que trabaja un escudriñador (scanner).

El escudriñador está caracterizado por una función de respuesta al impulso h . En el proceso de captura éste se posiciona en un punto de la escena y obtiene el valor de la imagen en ese punto en función de h y de los valores de los puntos en la vecindad del punto en cuestión. Después, el escudriñador se desplaza al siguiente punto y se repite el procedimiento hasta cubrir la escena.

De aquí que la integral sobre la región sombreada de la fig. 3.1 corresponda al valor de la imagen $g(x,y)$ en las coordenadas del punto (x,y) . Entonces, la función completa $g(x,y)$ se calcula recorriendo secuencialmente la funcción de respuesta al impulso a través de la función de entrada e integrando simultáneamente la región traslapada.

Sin embargo, el modelo continuo \longrightarrow continuo no es -- útil para el procesamiento digital por computadora. Matemáticamente hablando, un objeto continuo $f(\xi,\eta)$ que no tenga una descripción determinista, como es el caso de una imagen, no puede representarse en la computadora y, consecuentemente, solo es posible obtener aproximaciones del obje -

to. Además, si se desean utilizar algunas técnicas del análisis numérico y de algebra lineal en el procesamiento, un modelo más útil es el dado por un sistema discreto — discreto, como se muestra en la figura 3.3b (Andrews, Hunt, 1977).

Para este modelo la ecuación de Fredholm está dada por

$$g_{ij} = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M f_{k,l} h_{i,j,k,l} \quad (12)$$

donde se debe cumplir que

$$\begin{aligned} f_j &\geq 0 & \forall_j &= 1, 2, \dots, M^2 \\ g_i &\geq 0 & \forall_i &= 1, 2, \dots, N^2 \\ h_{ij} &\geq 0 & \forall_i &= 1, 2, \dots, N^2 \\ & & \forall_j &= 1, 2, \dots, M^2 \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^{N \times M} h_{ij} = 1 \quad \forall_j = 1, 2, \dots, N \times M \quad \delta$$

$$\sum_{j=1}^{N \times M} f_j = \sum_{i=1}^{N \times M} g_i$$

En un sistema discreto — discreto, la función f asu-

me valores discretos en un intervalo finito. Partiendo de esto, el conjunto de números

$$f = f_{ij}, \text{ con } i, j \in E$$

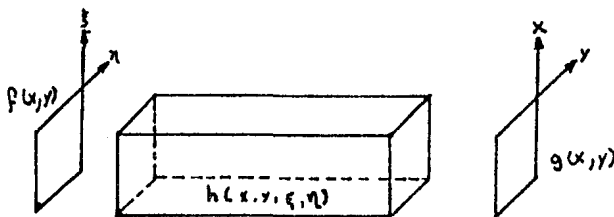
donde

$$E = \left\{ i, j / i, j \in \mathbb{Z}, 0 \leq i \leq N-1, 0 \leq j \leq M-1 \right\}$$

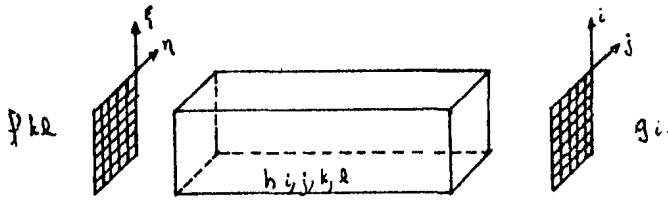
y

$$f \in J_m \equiv \left\{ x / x \in \mathbb{N}, 0 \leq x \leq 2^m - 1 \right\}$$

representa la colección de elementos de una imagen de $N \times M$ que pertenece a un campo aleatorio bidimensional discreto. N es el conjunto de los números naturales y m toma valores del 1 al 7 en general.



(a) MODELO CONTINUO - CONTINUO



(b) MODELO DISCRETO - DISCRETO

FIG. 3.3 MODELOS LINEALES TIPICOS DE FORMACION DE IMAGENES

3.3 TRANSFORMACION A IMAGENES.

Como ya se había mencionado los operadores O_j , también pueden representar una transformación del tipo imagen \rightarrow imagen. De hecho, cuando se utiliza un modelo discreto \rightarrow discreto, lo que se está haciendo es aplicar una transformación bidimensional a una imagen de entrada para obtener una imagen de salida modificada. Entonces, dicha transformación puede verse también como un mapeo de las funciones de entrada $f_i(x,y)$ a un conjunto de funciones de salida $g_j(x,y)$ pero ahora a través de una expresión matemática que define la relación entre los elementos de la imagen de entrada y los de la imagen de salida.

La relación que expresa a una transformación es análoga a la que representa al sistema discreto \rightarrow discreto como puede verse a continuación:

$$T(u,v) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{M-1} F(j,k) A(j,k,u,v) \quad (13)$$

En esta expresión, $A(j,k,u,v)$ es denominado el kernel de la transformación y representa la función matemática - que sintetiza la imagen original para un dominio fijo de transformación de coordenadas.

Una transformación bidimensional se usa en el procesamiento de imágenes para realzar, restaurar, codificar y - describir imágenes entre otros.

CAPITULO CUATRO

REALCE DE IMAGENES

4.1 PANORAMA GENERAL DE LAS TECNICAS DE REALCE.

Siempre que se obtiene una imagen o bien, cuando se transforma una imagen de una forma a otra como por ejemplo, obtener una copia, transmitirla o desplegarla, la "calidad" de la imagen de salida disminuye con respecto a la escena o a la imagen de entrada. Esto se debe, a que la atmósfera, los dispositivos de despliegue y los dispositivos de captura causan efectos de degradación en la imagen cuando ésta proviene de un sensor satelitario.

Partiendo de esto, muchas técnicas de realce están diseñadas para compensar los efectos de un proceso (conocido, medido o estimado) específico de degradación. Por otro lado, el objetivo principal de un realce, es el procesar una imagen dada, de tal forma que el resultado sea más adecuado que la imagen original para una aplicación específica. La palabra específica es importante ya que establece que el objetivo de un realce de imágenes es dependiente del contexto de la aplicación. De aquí que un método puede resultar "ad hoc" para realzar las imágenes de cierta clase, pero esto no indica que sea la mejor aproximación para imágenes de otro tipo. En general, al aplicar, una

técnica de realce se suprimen características seleccionadas de una imagen o se resaltan aquellas que están a expensas de otras. Desde este punto de vista, el realce puede verse como un énfasis selectivo y supresión de información en la imagen, con el objeto de incrementar su utilidad en una aplicación específica.

Un realce de imágenes es necesario o deseable en alguno de los siguientes casos (Ekstrom, 1984):

a) Cuando hay pérdida del contraste en la imagen. Esto puede suceder cuando se graba una imagen que posee un amplio rango dinámico de energía en un medio que por el contrario posee un rango dinámico estrecho como pueden ser la película fotográfica o el papel térmico. Otra causa de la pérdida de contraste es la presencia de elementos muy reflectivos (nubes o nieve) en el momento de filmar la escena. Para mejorar la calidad de la imagen, ésta se puede realzar incrementando el contraste local y reduciendo el rango dinámico.

b) Cuando hay degradación en la imagen como consecuencia de la presencia de algunos tipos de ruido como lo son: el ruido aleatorio, el ruido convolucional (blurring), el ruido sal-pimienta y el llamado ruido moteado.

Una imagen degradada por uno de éstos factores puede

realzarse por medio de un filtraje que minimice los efectos de la degradación.

c) Cuando se despliegan datos bidimensionales que no son imágenes en el sentido convencional, sino gráficas. La apariencia de éste tipo de despliegues puede mejorarse y la información que contiene puede hacerse más comprensible si se realiza con una escala de grises y/o color en una impresión de tipo electrostático.

Básicamente, las técnicas de realce pueden dividirse en tres clases: técnicas de realce general, técnicas de --realce selectivo y técnicas de restauración (ver fig. 4.1)

Primero, las técnicas de realce general, tienen como objetivo mejorar la apariencia visual general de la ima --gen. No presuponen algún tipo de degradación y se basan en las propiedades de vecindad de los elementos de la imagen.

Segundo, las técnicas de realce selectivo tienen el --mismo objetivo que las anteriores. Tampoco presuponen un --proceso de degradación, pero se basan en el manejo de los parámetros estadísticos de la imagen para lograr el real --ce. Estas técnicas siempre tienen el efecto de realzar una cierta clase de patrones (espaciales o espectrales) a costa de otras clases.

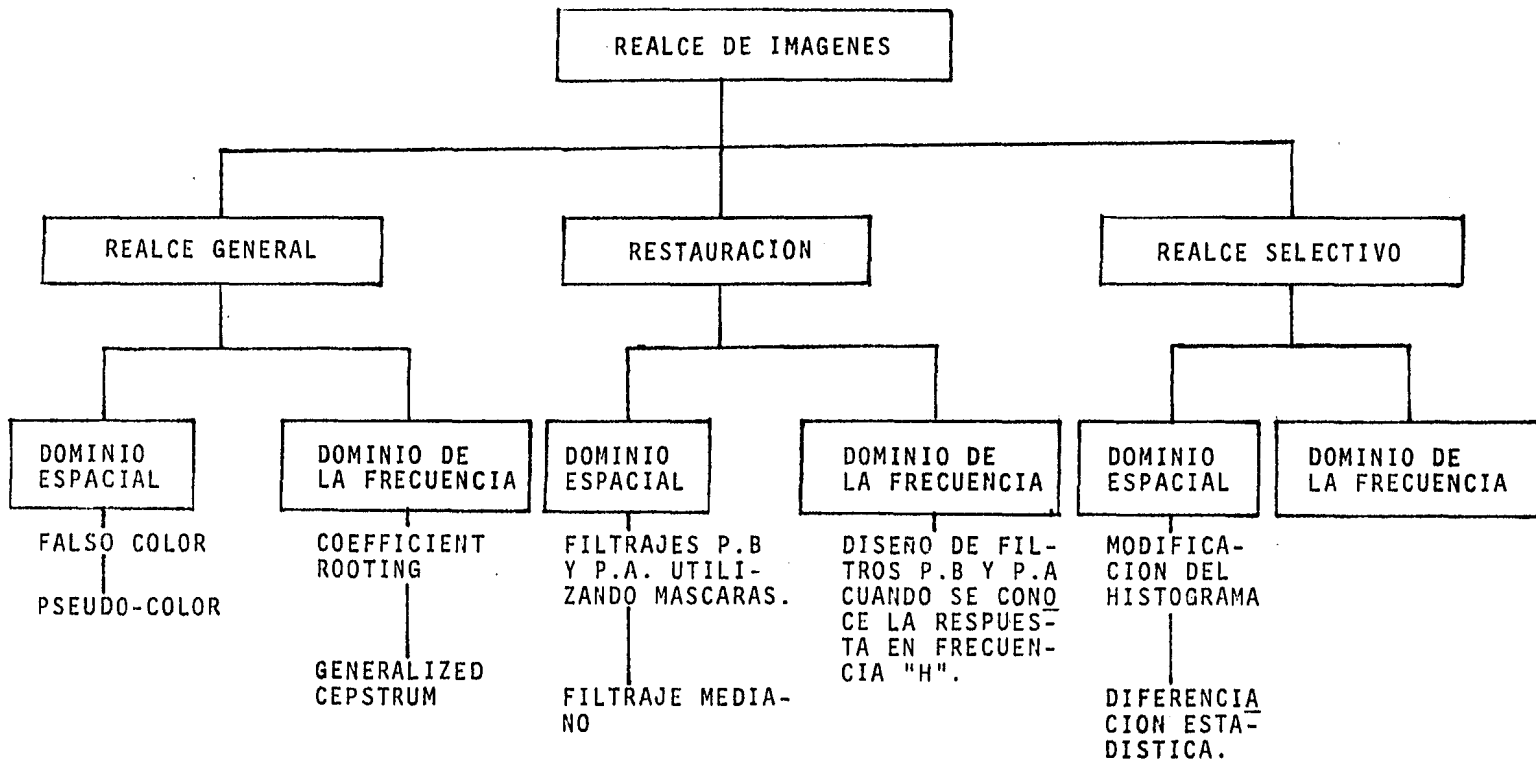


FIG. 4.1 TIPOS DE REALCE Y TECNICAS TRADICIONALES.

Tercero, las técnicas de restauración constituyen métodos de realce en las que sí se presupone una degradación. Su propósito es obtener la imagen original de un objeto, a partir de una imagen dada y la función de respuesta al impulso que caracteriza al dispositivo o transformación que causó la degradación. Este tipo de técnicas se basan en el modelado matemático del proceso de degradación y, a partir de esto, en la aplicación de una transformación inversa a la imagen preprocesada para obtener así la imagen original.

Las clases de realce anteriormente descritas, pueden desarrollarse principalmente de dos formas: utilizando métodos en el dominio de la frecuencia o bien, utilizando métodos en el dominio espacial. Las técnicas de procesamiento en la primera categoría están basadas en modificaciones que se hacen a la transformada de Fourier de una imagen. El dominio espacial, por otro lado, se refiere al plano de la imagen en sí mismo y, las aproximaciones en esta categoría se basan en el manejo directo de los pixels de una imagen. Algunos ejemplos de los métodos en el dominio de la frecuencia son los llamados "generalized cepstrum" y "coefficient rooting" (Pratt, 1978). Sin embargo, en este trabajo se hizo uso exclusivo de algunas técnicas en el dominio espacial, de las cuales se habla a continuación.

4.1 TECNICAS DE REALCE EN EL DOMINIO ESPACIAL.

4.1.1 REALCE GENERAL.

- Falso Color: Entre los usos comunes de esta técnica se encuentran: el proporcionar una imagen con objetos que posean tonos de color diferente al esperado (falso color) para que resulten más llamativos a la vista. Otro es colorear una imagen determinada para optimar la sensibilidad del observador humano. Por ejemplo, se sabe que la respuesta a la luminancia de los conos y bastones en la retina es mayor en la región verde del espectro visible. Entonces, - si un objeto que normalmente es rojo se colorea en verde, éste puede ser más fácilmente detectable, y por último producir una imagen con apariencia de color natural.

El falso color es un tipo de realce que consiste de un mapeo punto a punto de una imagen en color original descrita por tres colores primarios, a un espacio de color definido por el despliegue de valores triestímulo que son -- funciones lineales o no lineales de los valores de los -- pixels de la imagen original.

En un mapeo de este tipo, los valores triestímulos de despliegue rojo, verde y azul están relacionados con planos F_i de una imagen en color natural de la siguiente for-

ma:

$$R_D = O_R \{ F_1, F_2, \dots \} \quad , \quad G_D = O_G \{ F_1, F_2, \dots \}$$

$$B_D = O_B \{ F_1, F_2, \dots \}$$

donde $O_R(\cdot)$, $O_G(\cdot)$, $O_B(\cdot)$ son operadores funcionales generales.

Una forma general (lineal) de mapear una imagen natural a una imagen en falso color se define como:

$$\begin{bmatrix} R_D \\ G_D \\ B_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_S \\ G_S \\ B_S \end{bmatrix}$$

donde R_S , G_S y B_S son los valores triestímulos del sensor y R_D , G_D y B_D son los valores triestímulos del despliegue.

Una característica de este método es que la asignación de colores no implica un análisis previo de la imagen -- (Pratt, 1978).

- Pseudo-color: El pseudo color es otra técnica de mapeo de color, que está diseñada para realzar la detectabilidad de objetos dentro de una imagen. Sin embargo, en este método, la imagen original no es una imagen en color sino que son arreglos bidimensionales de valores que se convierten a un plano en color de acuerdo a una función preestablecida.

Esta función es arbitraria pero se propone bajo un criterio que parte del análisis previo de la imagen. En términos generales, el mapeo en pseudocolor para un plano de datos $F(j,k)$ está definido como

$$\begin{aligned} R(j,k) &= O_R \{ F(j,k) \} \\ G(j,k) &= O_G \{ F(j,k) \} \\ B(j,k) &= O_B \{ F(j,k) \} \end{aligned}$$

donde $R(j,k)$, $G(j,k)$ y $B(j,k)$ son los valores triestímulos o funciones arbitrarias y $O_R(\cdot)$, $O_G(\cdot)$ y $O_B(\cdot)$ son operadores lineales o no lineales.

Este mapeo define un plano en color tridimensional en forma paramétrica, en términos de los valores de los datos del plano $F(j,k)$ (Pratt, 1978).

4.1.2 REALCE QUE PRESUPONE DEGRADACION.

- Filtraje paso bajas: Una imagen puede estar sujeta a los efectos del ruido o a la interferencia provenientes de varias fuentes; como son un sistema de muestreo o canal de transmisión muy pobre.

La presencia de ruido en una imagen, provoca que ésta se degrade de alguna forma y en consecuencia pierde su calidad (entre otros) en cuanto a apariencia visual, dificultándose con esto el análisis analógico o digital de la misma. Entonces, es claro que a partir de estas observaciones es necesario que se "limpie" la imagen para que resulte de utilidad. Al respecto, se sabe que la energía de una imagen se concentra principalmente en las componentes de baja frecuencia. Sin embargo, la energía de degradación relacionada con los bordes, los detalles finos de la imagen y con un factor muy importante, "el ruido", está asociada a las componentes de alta frecuencia.

Partiendo de esto, una forma lógica de disminuir el ruido (limpiar la imagen) es atenuar las componentes de alta frecuencia que provocan el problema. Esto puede lograrse fácilmente aplicando un filtraje espacial. Específicamente una "función ventana o "función máscara" que haga un suavizamiento (smoothing) del ruido contenido en la ima --

gen.

Una imagen filtrada, utilizando la técnica de la función ventana se forma por la convolución discreta del arreglo F de entrada de $N \times M$ elementos con un arreglo de convolución H de $L \times L$ elementos de acuerdo con la relación

$$G(m_1, m_2) = \sum_{(n_1-k_1, n_2-k_2)} \sum F(k_1, k_2) H(n_1-k_1, n_2-k_2) \quad (14)$$

donde

F = arreglo de datos que representa la imagen de entrada.

H = función ventana

G = arreglo de datos que representa la imagen filtrada.

La función H para filtraje paso bajas, debe contener solo elementos positivos. Algunos ejemplos de funciones ventana son :

$$H = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} ; H = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} ; H = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Una desventaja del filtraje paso bajas, es que disminuye el ruido a expensas de reducir un poco la cantidad de información en la imagen, provocando que la imagen se vea borrosa. No obstante, hay una mejora en la calidad de la imagen para ciertas aplicaciones en morfometría de patrones espaciales.

- Filtraje paso altas: El filtraje paso altas es una técnica de realce que enfatiza las componentes de alta frecuencia de una señal. Debido a que dichas componentes corresponden a los bordes o detalles finos de una imagen, el filtraje paso altas incrementa el contraste local y por consiguiente afina la imagen. Además, es útil para reducir la apariencia borrosa de una imagen, sobre todo en varias aplicaciones de identificación de patrones lineales.

El filtraje paso altas al igual que el filtraje paso bajas puede lograrse por medio de una convolución discreta entre la imagen y el arreglo de convolución que representa a la función ventana. Para este tipo de realce las funciones ventana de uso más frecuente son (Pratt, 1978 ; Ekstrom, 1984) :

$$H = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} ; H = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} ; H = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 5 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

- Filtrado mediano: El filtrado mediano es un proceso no lineal útil en la reducción del ruido llamado sal-pi mienta. Esta técnica consiste en deslizar por toda la imagen una ventana que comprende un número impar de píxeles. El píxel central en la ventana se reemplaza por el valor mediano de los píxeles dentro de la ventana. La mediana de una secuencia discreta a_1, a_2, \dots, a_n para n impar, es el miembro de la secuencia para la cual $(n-1)/2$ elementos son menores o iguales en valor y, $(n-1)/2$ elementos son mayores o iguales en valor.

El filtrado mediano en algunos casos suprime el ruido pero en otros puede inhibir la señal de interés. (Pratt, 1978).

4.1.3 REALCE SELECTIVO.

- Modificación del histograma: Esta técnica es una forma simple y efectiva de modificar el rango dinámico o contraste de una imagen.

Por ejemplo , una imagen que por alguna causa posea - un histograma de luminancias con valores sesgados hacia - los niveles de gris más oscuros, en general proporciona - poca información, debido a que los detalles en las regio - nes oscuras frecuentemente no se perciben. Una forma de - realzar esta clase de imágenes es la técnica llamada modi - ficación del histograma en la cual la imagen original es - reescalada para que el histograma de dicha imagen se com - porte de una manera específica.

En este método, la escala de gris de una imagen se - cambia a otra diferente de acuerdo a una transformación - dada. La transformación $n_y = T[n_x]$ relaciona una intensi - dad de entrada n_x con una intensidad de salida n_y la cual se representa a menudo con una gráfica o una tabla.

Para cada pixel en la imagen de entrada la intensidad correspondiente de salida se obtiene de la gráfica, de la tabla o de la función misma; dando como resultado una ima - gen realzada.

- Filtrado paso altas por el método de "Diferencia -- ción Estadística": Esta técnica involucra en su forma más general la generación de una imagen, dividiendo cada valor de los pixels entre la desviación estándar $\sigma(j,k)$ de acuer - do con la relación:

$$G(j,k) = \frac{F(j,k)}{\sigma(j,k)} \quad (15)$$

donde la desviación estándar

$$\sigma^2(j,k) = \frac{\sum_j \sum_k [F(j,k) - \bar{F}(j,k)]^2}{\underbrace{j,k}_{N(j,k)}} \quad (16)$$

se calcula sobre una vecindad $N(j,k)$ del pixel en las coordenadas (j,k) . La función \bar{F} es el valor medio de la imagen original en el punto (j,k) (Pratt, 1978).

CAPITULO CINCO

PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN

El procesamiento de la imagen tiene como fin, obtener una imagen realzada en donde se enfaticen los patrones de -- textura asociados a la red hidrológica y a los lineamientos del terreno, de una imagen LANDSAT.

La filosofía de la transformación general de la imagen, consiste en crear una nueva imagen que contenga únicamente los pixels que representan los patrones de textura de la red hidrológica y de los lineamientos (a este tipo de imágenes se les llama comunmente "subimágenes"). Una vez que se tienen aislados dichos patrones, se sobreponen la imagen original y la subimagen, logrando con ésto otra imagen, en donde se enfatizan los cauces y los lineamientos dentro del contexto de la imagen original. La fig. 5.1 muestra equemáticamente este proceso.

Por último, se modifica el contraste de la imagen para mejorar su calidad visual y para efectos de despliegue en un monitor.

5.1 TRANSFORMACIONES PROPUESTAS.

La esencia del procesamiento de una imagen, radica en -

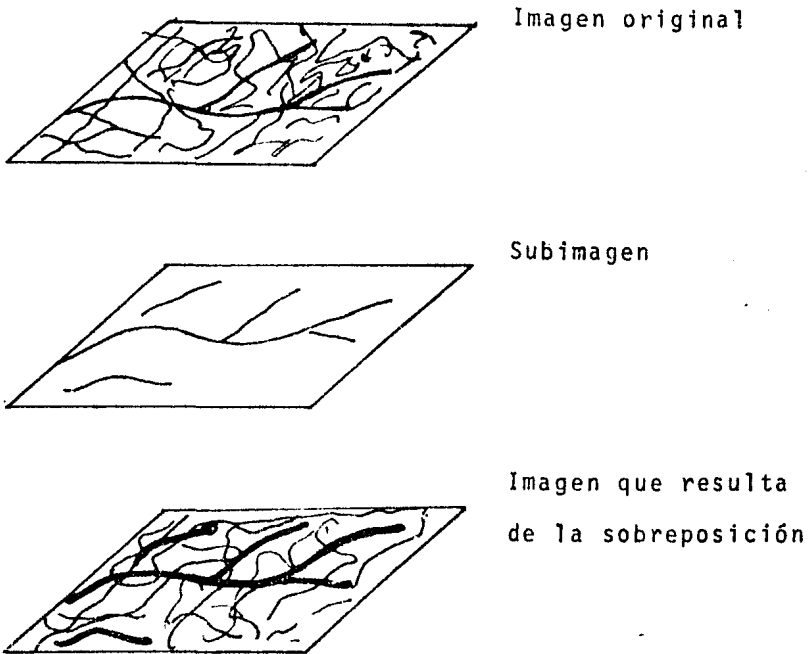


FIG. 5.1 ESQUEMA DE LA TRANSFORMACION GENERAL DE LA IMAGEN.

la aplicación de una o varias transformaciones a una imagen de entrada para obtener una imagen de salida modificada.

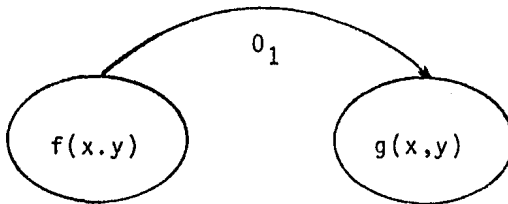
De acuerdo con ésto, en este trabajo se obtiene la imagen realizada a partir de cuatro transformaciones, que son:

- 1) Filtrado paso-bajas.
- 2) Filtrado paso-altas.
- 3) Sobreposición de imágenes.
- 4) Modificación de contraste.

Todas ellas basadas en los métodos propuestos por W.G. Rhode et. al (1977), en donde las tres primeras transformaciones constituyen lo que ellos llaman "Algoritmo de Realce de Bordes" y la cuarta representa un "Algoritmo de Realce de Contraste Lineal".

Dichas transformaciones pueden visualizarse de acuerdo a los siguientes diagramas:

1) Filtrado paso-bajas



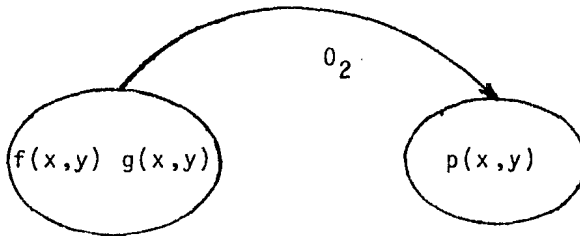
donde

$$g(x,y) = O_1 \{ f(x,y) \}$$

y

$$O_1 = \frac{1}{R} \sum_{(n,m) \in S} f(n,m)$$

2) Filtrado paso-altas



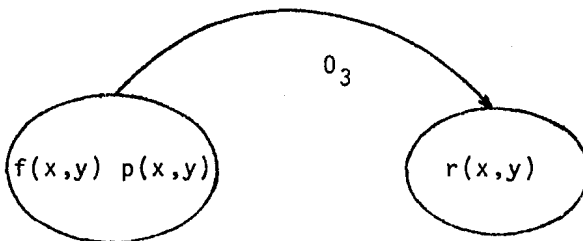
donde

$$p(x,y) = O_2 \{ f(x,y), g(x,y) \}$$

y

$$O_2 = f(x,y) - g(x,y)$$

3) Sobreposición de imágenes



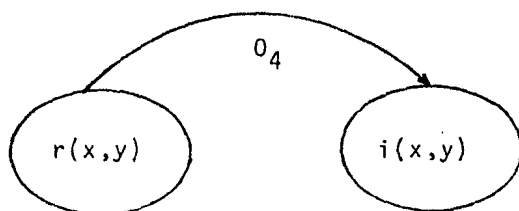
donde

$$r(x,y) = O_3 \{ f(x,y), p(x,y) \}$$

y

$$O_3 = f(x,y) + p(x,y)$$

4) Modificación de contraste



donde

$$i(x,y) = O_4 \{ r(x,y) \}$$

y

$$O_4 = \frac{r(x,y) - \text{MIN}}{\text{MAX} - \text{MIN}} \times 127$$

Se sabe que una imagen está caracterizada por su espectro de frecuencias espaciales donde las altas y bajas frecuencias están determinadas por una cierta frecuencia de corte.

Partiendo de esto, se puede decir que el contenido total de frecuencias de una imagen (CTF) está determinado por la suma de las componentes de alta frecuencia (CAF) y de las componentes de baja frecuencia (CBF), esto es (Pratt, 1978)

$$\text{CTF} = \text{CAF} + \text{CBF} \quad (17)$$

Como ya se mencionó anteriormente, los bordes y detalles finos de la imagen (entre los que se encuentran los cau

ces y lineamientos) están particularmente relacionados con las componentes de alta frecuencia. Ahora bien, como lo que nos interesa es aislar justamente estos rasgos, entonces debemos aislar las componentes de alta frecuencia; para lo cual se requiere necesariamente de un filtraje paso-altas.

Para lograrlo, el procedimiento que se siguió en este trabajo consiste primero en obtener las componentes de baja frecuencia de la imagen y después restárselas al contenido total de frecuencias, lo cual puede expresarse formalmente como:

Dadas dos imágenes $f(x,y)$ (imagen original) y $g(x,y)$ (imagen que contiene las componentes de baja frecuencia) de $N \times M$ elementos, el procedimiento consiste en generar una imagen $p(x,y)$ cuyo valor de gris en cada punto (x,y) se obtiene calculando la diferencia entre los valores de gris de los pixels de f y g . Es decir, la imagen p se obtiene usando la relación:

$$p(x,y) = f(x,y) - g(x,y) \quad (18)$$

para $x=0,1,\dots, N-1$ e $y=0,1,\dots, M-1$

Para obtener la imagen que contenga las bajas frecuencias se utiliza un filtraje paso-bajas siguiendo el método -

del promedio de los elementos vecinos a un pixel, que consiste en lo siguiente:

Hacer que cada pixel de la imagen original sea el pixel central de una región de la imagen definida previamente por una ventana, y sustituir su valor por el promedio de los - - pixels que se encuentran dentro de la ventana, como se observa en la fig. 5.2.

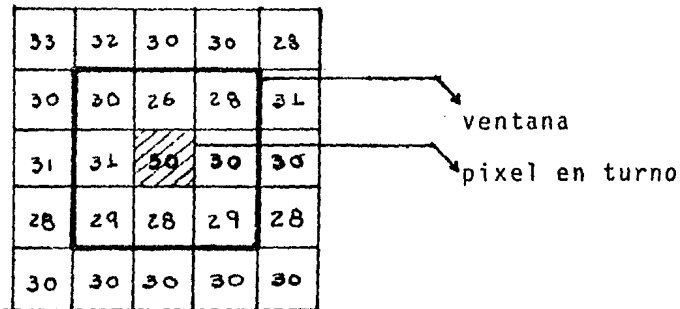


FIG. 5.2 EJEMPLIFICACION DEL FILTRAJE PASO-BAJAS.

Esto se puede expresar formalmente como sigue:

Dada una imagen $f(x,y)$ de $N \times M$ elementos, el procedimiento es generar una imagen $g(x,y)$ cuyo nivel de gris en cada punto (x,y) se obtiene promediando los valores de gris de los puntos de f contenidos en una vecindad de (x,y) predefinida por una ventana. Es decir, la imagen g se obtiene usando

la siguiente relación:

$$g(x,y) = \frac{1}{R} \sum_{(n,m) \in S} f(n,m) \quad (19)$$

para $x=0,1,\dots,N-1$ e $y=0,1,\dots,M-1$. S, es el conjunto de coordenadas de los puntos en la vecindad del punto (x,y) y R es el número total de puntos definidos por las - - coordenadas en S.

Una vez que se han aislado los patrones deseados, se ha ce la sobreposición de imágenes sumando simplemente los valo res de los pixels de la imagen original con los de la subimagen obtenida, lográndose con ésto una imagen $r(x,y)$.

La modificación del contraste se logra asignando nuevos valores de brillantez para cada pixel de la imagen que resulta de la sobreposición, con la siguiente ecuación lineal:

$$i(x,y) = \frac{r(x,y) - \text{MIN}}{\text{MAX} - \text{MIN}} \times 127 \quad (20)$$

donde

$i(x,y)$ = valor de brillantez del pixel en la ima -
gen realizada

$r(x,y)$ = valor de brillantez del pixel en la ima -
gen que resulta de la sobreposición

MIN = valor mínimo de brillantez en la imagen - -
 $r(x,y)$

MAX = valor máximo de brillantez en la imagen - -
 $r(x,y)$

A todos los pixels con valores de brillantez iguales a MIN se les asigna el valor 0 y a todos los pixels iguales a MAX se les asigna el valor 127.

Todos los pixels con valores intermedios a MIN y MAX - tienen un factor aplicado que expande linealmente el rango - de valores de brillantez entre 0 y 127 (W.G. Rhode et.al, - 1977).

5.2 JUSTIFICACION MATEMATICA DE LAS TRANSFORMACIONES PROPUESTAS PARA EL REALCE DE BORDES.

El modelo propuesto por W.G. Rhode et. al, para el realce de bordes puede expresarse como:

$$g(n_1, n_2) = 2f(n_1, n_2) - \sum_{m_1=-a}^a \sum_{m_2=-b}^b f(n_1-m_1, n_2-m_2) \quad (21)$$

a partir del cual, se derivan dos hipótesis:

- 1) Sustituir cada pixel de la imagen por el promedio de las intensidades de los pixels sobre una ventana -- (-a,a;-b,b), es equivalente a un filtraje paso-bajas de la imagen.
- 2) Sustituir un pixel de la imagen por el resultado de

la resta entre el pixel original y su valor promedio es equivalente a hacer un filtraje paso-altas de la imagen.

A continuación se demuestra la validez de ambas hipótesis.

Demostración.

Dado que el proceso de captura de una imagen es de naturaleza estocástica, que la imagen puede representarse como un campo aleatorio y el sistema en general puede considerarse lineal e invariante con respecto al tiempo debido a que las características de la escena y del sensor no cambian, al menos durante la captura de la imagen, se puede recurrir a las siguientes propiedades (todas ellas válidas para un sistema lineal invariante en el tiempo) para fundamentar la demostración.

- 1) La transformada digital de Fourier (TDF) en dos dimensiones puede ser definida como la secuencia de valores equidistantes de la transformada Z de la secuencia finita $\{X(n_1, n_2)\}$, $n_1=1, \dots, N_1$; $n_2=1, \dots, N_2$ sobre los círculos $Z_1 = e^{j\omega_1}$, $Z_2 = e^{j\omega_2}$, esto es:

$$X(k_1, k_2) = \sum_{n_1=1}^{n_1} \sum_{n_2=1}^{n_2} X(n_1, n_2) \exp\left(-\frac{2\pi j k_1 n_1}{N_1}\right) \exp\left(-\frac{2\pi j k_2 n_2}{N_2}\right)$$

con $k_1=1, \dots, N_1$ y $k_2=1, \dots, N_2$

- 2) La secuencia $\{X(k_1, k_2)\}$ representa unívocamente a la secuencia $\{X(n_1, n_2)\}$, la cual puede ser recordada a partir de $\{X(k_1, k_2)\}$ a través de la relación

$$X(n_1, n_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{k_1=1}^{N_1} \sum_{k_2=1}^{N_2} X(k_1, k_2) \exp\left(\frac{2\pi j k_1 n_1}{N_1}\right) \exp\left(\frac{2\pi j k_2 n_2}{N_2}\right)$$

con $w_1 = \frac{2\pi n_1}{N_1}$ y $w_2 = \frac{2\pi n_2}{N_2}$

- 3) Teorema de convolución circular.

Si las secuencias

$$\begin{cases} \{X_1(k_1, k_2)\} & , & k_1=1, \dots, N_1 \\ \{X_2(k_1, k_2)\} & , & k_2=1, \dots, N_2 \end{cases}$$

son las TDF de las secuencias

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1(n_1, n_2) \\ x_2(n_1, n_2) \end{array} \right\}, \quad \begin{array}{l} n_1=1, \dots, N_1 \\ n_2=1, \dots, N_2 \end{array}$$

entonces la TDF

$$X_3(k_1, k_2) = X_1(k_1, k_2) X_2(k_1, k_2)$$

corresponde a la secuencia

$$\left\{ x_3(n_1, n_2) \right\}, \quad n_1=1, \dots, N_1 \text{ y } n_2=1, \dots, N_2$$

dada por

$$x_3(n_1, n_2) = \sum_{m_1} \sum_{m_2} x_1(m_1, m_2) x_2(n_1 - m_1, n_2 - m_2)$$

$$\sum_{m_1} \sum_{m_2} x_1(n_1 - m_1, n_2 - m_2) x_2(m_1, m_2)$$

Si se forma una nueva secuencia de acuerdo a la relación

$$x_3(n_1, n_2) = x_1(n_1, n_2) x_2(n_1, n_2)$$

entonces tendrá una TDF dada por

$$\begin{aligned} X_3(k_1, k_2) &= \sum_{e_1} \sum_{e_2} X_1(e_1, e_2) X_2(k_1 - e_1, k_2 - e_2) \\ &= \sum_{e_1} \sum_{e_2} X_1(k_1 - e_1, k_2 - e_2) X_2(e_1, e_2) \end{aligned}$$

Para un sistema lineal invariante con respecto al tiempo, el teorema básico de convolución es válido. Es decir, -- que si $\{f(n_1, n_2)\}$ es la secuencia que representa la imagen de entrada y $h(n_1, n_2)$ es la función filtro estable, entonces la secuencia de salida correspondiente a la imagen filtrada se escribe como sigue

$$y(n_1, n_2) = \sum_{m_1} \sum_{m_2} h(m_1, m_2) f(n_1 - m_1, n_2 - m_2) \quad (21)$$

donde $y(n_1, n_2)$ representa la interacción de un pixel sobre sus vecinos, determinada por la regla h . Para un filtro paso-bajas, la TDF de la función filtro cumple con las siguientes condiciones

$$H_b(w_1, w_2) = \begin{cases} 1 & \text{para } w_1, w_2 \leq w^c \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

donde $w_1 = 2\pi j(v_1/N)$ y $w_2 = 2\pi j(v_2/N)$

Una forma útil de recortar las series de Fourier que proporciona h y definir así la frecuencia de corte w^c , es la introducción de una ventana (Pratt, 1978), cuyas propiedades son

$$w(m_1, m_2) = \begin{cases} 1 & -a \leq m_1 \leq a \\ & -b \leq m_2 \leq b \\ 0 & \text{de otra forma} \end{cases}$$

En este proceso, la función de respuesta al impulso se trunca por medio de la multiplicación espacial con la ventana w ; entonces la función filtro se aproxima como

$$h_w(m_1, m_2) = h(m_1, m_2) w(m_1, m_2) \quad (22)$$

Entonces

$$y(n_1, n_2) = \sum_{m_1} \sum_{m_2} f(n_1 - m_1, n_2 - m_2) h_w(m_1, m_2) \quad (23)$$

$$y(n_1, n_2) = \sum_{m_1} \sum_{m_2} f(n_1 - m_1, n_2 - m_2) h(m_1, m_2) w(m_1, m_2) \quad (24)$$

Esta última ecuación puede expresarse de otra forma si

se manipulan sus elementos. Elijamos primero el término h_w y operemos sobre él de la siguiente forma:

Aplicando la TDF a h_w se tiene que

$$\text{TDF} \left\{ h_w(m_1, m_2) \right\} = \text{TDF} \left\{ h(m_1, m_2) \right\} * \text{TDF} \left\{ w(m_1, m_2) \right\} \quad (25)$$

$$= H_b(v_1, v_2) * W(v_1, v_2) \quad (26)$$

$$= \sum_{k_1} \sum_{k_2} W(v_1, v_2) H_b(v_1 - k_1, v_2 - k_2) \quad (27)$$

pero

$$W(v_1, v_2) = \frac{1}{N^2} \sum_{m_1} \sum_{m_2} w(m_1, m_2) \exp(-2\pi j/N (v_1 m_1 + v_2 m_2)) \quad (28)$$

entonces

$$\begin{aligned} \text{TDF} \left\{ h_w(m_1, m_2) \right\} &= \frac{1}{N^2} \sum_{k_1} \sum_{k_2} \left(\sum_{m_1} \sum_{m_2} w(m_1, m_2) \right. \\ &\quad \left. \exp(-2\pi j/N (v_1 m_1 + v_2 m_2)) \right) \\ &\quad H_b(v_1 - k_1, v_2 - k_2) \end{aligned} \quad (29)$$

$$= \frac{1}{N^2} \sum_{k_1} \sum_{k_2} \left(\sum_{m_1} \sum_{m_2} w(m_1, m_2) \exp(-2\pi j/N((v_1 - k_1)m_1 + (v_2 - k_2)m_2)) \right) H_b(v_1, v_2) \quad (30)$$

haciendo uso de las propiedades de H_b se tiene que

$$H_b(v_1 - k_1, v_2 - k_2) = 1 \quad \text{para} \quad w_1, w_2 \leq w^c$$

con lo cual la expresión (30) se reduce a

$$\begin{aligned} \underline{TDF} \left\{ h_w(m_1, m_2) \right\} &= \frac{1}{N^2} \sum_{k_1} \sum_{k_2} \left(\sum_{m_1} \sum_{m_2} w(m_1, m_2) \right. \\ &\quad \left. \exp(-2\pi j/N((v_1 - k_1)m_1 + (v_2 - k_2)m_2)) \right) \end{aligned} \quad (31)$$

reacomodando esta última ecuación nos queda

$$\begin{aligned} \underline{TDF} \left\{ h_w(m_1, m_2) \right\} &= \frac{1}{N^2} \sum_{m_1} \sum_{m_2} (w(m_1, m_2) \\ &\quad \exp(-2\pi j/N (v_1 m_1 + v_2 m_2)) \\ &\quad \exp(2\pi j/N (k_1 m_1 + k_2 m_2))) \end{aligned} \quad (32)$$

Por otro lado

$$\text{TDF} \{ y(n_1, n_2) \} = \text{TDF} \{ h_w(m_1, m_2) \} \text{TDF} \{ f(n_1, n_2) \} \quad (33)$$

sustituyendo TDF $h_w(m_1, m_2)$ en la ecuación (33)

$$\begin{aligned} \text{TDF} \{ y(n_1, n_2) \} &= \frac{1}{N^2} \left(\sum_{m_1} \sum_{m_2} w(m_1, m_2) \right. \\ &\quad \left. \exp(-2\pi j/N (v_1 m_1 + v_2 m_2)) \right. \\ &\quad \left. \sum_{k_1} \sum_{k_2} \exp(2\pi j/N (k_1 m_1 + k_2 m_2)) \right) \\ &\quad \text{TDF} \{ f(n_1, n_2) \} \end{aligned} \quad (34)$$

$$= \frac{1}{N^2} \text{TDF} \{ w(m_1, m_2) \} \text{TDF} \{ f(n_1, n_2) \}$$

$$\sum_{m_1} \sum_{m_2} \sum_{k_1} \sum_{k_2} \exp(2\pi j/N (k_1 m_1 + k_2 m_2)) \quad (35)$$

Aplicando TDF^{-1} a la ecuación (35) se tiene que

$$y(n_1, n_2) = \frac{1}{N^2} \sum_{m_1} \sum_{m_2} f(n_1 - m_1, n_2 - m_2) w(m_1, m_2) \sum_{k_1} \sum_{k_2} \exp(2\pi j/N (k_1 m_1 + k_2 m_2)) \quad (36)$$

pero como $w(m_1, m_2) = 1$ para $-a \leq m_1 \leq a$, $-b \leq m_2 \leq b$, la expresión (36) queda como

$$y(n_1, n_2) = \frac{1}{N^2} \sum_{m_1=-a}^a \sum_{m_2=-b}^b f(n_1 - m_1, n_2 - m_2) \sum_{k_1} \sum_{k_2} \exp(2\pi j/N (k_1 m_1 + k_2 m_2)) \quad (37)$$

donde el término exponencial representa una fase no óptica, que puede tomarse como la unidad, ya que para efectos de procesamiento ésta no se considera.

Finalmente, la expresión (37) se reduce al promedio de las intensidades de los pixels sobre la ventana $(-a, a; -b, b)$, esto es:

$$y(n_1, n_2) = \frac{1}{N^2} \sum_{m_1=-a}^a \sum_{m_2=-b}^b f(n_1 - m_1, n_2 - m_2) \quad (38)$$

con lo cual queda demostrada la primera hipótesis.

Por otro lado, sabemos que

$$H_b(v_1, v_2) + H_a(v_1, v_2) = 1 \quad (39)$$

de donde

$$H_a(v_1, v_2) = 1 - H_b(v_1, v_2) \quad (40)$$

luego entonces, para un filtraje paso-altas se debe cumplir que:

$$\text{TDF} \left\{ f_1(n_1, n_2) \right\} = (H_a(v_1, v_2)) (\text{TDF} \left\{ f(n_1, n_2) \right\}) \quad (41)$$

$$= (1 - H_b(v_1, v_2)) (\text{TDF} \left\{ f(n_1, n_2) \right\}) \quad (42)$$

$$= \text{TDF} \left\{ f(n_1, n_2) \right\} - (H_b(v_1, v_2))$$

$$(\text{TDF} \left\{ f(n_1, n_2) \right\}) \quad (43)$$

Aplicando la TDF^{-1} a la ecuación (43)

$$f_1(n_1, n_2) = f(n_1, n_2) - h_w(m_1, m_2) * f(n_1, n_2) \quad (44)$$

pero como

$$y(n_1, n_2) = h_w(m_1, m_2) * f(n_1, n_2)$$

entonces la ecuacion (44) se transforma en

$$f_1(n_1, n_2) = f(n_1, n_2) - \frac{1}{N^2} \sum_{m_1=-a}^a \sum_{m_2=-b}^b f(n_1-m_1, n_2-m_2) \quad (45)$$

El filtraje paso-altas queda expresado entonces como la resta del promedio de las intensidades de los pixels sobre la ventana $(-a, a; -b, b)$, a las intensidades de los pixels de la imagen original. Con esto, queda demostrada la segunda hipótesis.

Por último, la sobreposición de la subimagen $f_1(n_1, n_2)$ y de la imagen original $f(n_1, n_2)$, expresada por la suma de sus elementos, da origen a las siguientes expresiones

$$g(n_1, n_2) = f(n_1, n_2) + f_1(n_1, n_2) \quad (46)$$

$$g(n_1, n_2) = f(n_1, n_2) + f(n_1, n_2) - \frac{1}{N^2} \sum_{m_1=-a}^a \sum_{m_2=-b}^b f(n_1-m_1, n_2-m_2) \quad (47)$$

$$g(n_1, n_2) = 2f(n_1, n_2) - \frac{1}{N^2} \sum_{m_1=-a}^a \sum_{m_2=-b}^b f(n_1-m_1, n_2-m_2) \quad (48)$$

Esta última ecuación es el modelo del cual se partió. - Por lo tanto, el procedimiento empleado si constituye un filtraje espacial y es válido para cualquier sistema lineal invariante con respecto al tiempo.

Complemento a la justificación matemática.

Se presupone un sistema computacional optimado en donde se implantan dos algoritmos uno utilizando el método de realce tradicional y el otro empleando el método propuesto aquí. Dichos algoritmos se suponen también optimados, entonces a manera de comparación de un método y otro se evalúan el número de operaciones totales, encontrándose que para el método propuesto el número de operaciones es considerablemente menor.

- 1) Método tradicional (usando funciones máscara para filtrar la imagen)

Para una imagen de $M \times M$ elementos y una función máscara de $N \times N$ elementos.

Tipo de operacion	F.P.B.	F.P.A.	MIN-MAX	R.C.L.
sumas	N^2M^2	N^2M^2	-	-
restas	-	-	-	M^2+1
multiplicaciones	N^2M^2	N^2M^2	-	M^2
divisiones	M^2	M^2	-	M^2
comparaciones	-	-	$2M^2-1$	-

$$\text{total sumas} = 2N^2M^2$$

$$\text{total restas} = M^2+1$$

$$\text{total multiplicaciones} = 2N^2M^2+M^2$$

$$\text{total divisiones} = 3M^2$$

$$\text{total comparaciones} = 2M^2-1$$

Para una imagen de 800 x 800 pixels y una función máscara de 3 x 3 elementos:

$$\text{total sumas} = 11,520,000$$

$$\text{total restas} = 6,400,001$$

$$\text{total multiplicaciones} = 12,160,000$$

$$\text{total divisiones} = 1,920,000$$

$$\text{total comparaciones} = 1,279,999$$

$$\text{total de operaciones aritméticas} = 26,240,001$$

$$\text{total de operaciones lógicas} = 1,279,999$$

2) Método propuesto

Para una imagen de $M \times M$ elementos y una ventana de $N \times N$ pixels.

Tipo de operacion	F.P.B.	F.P.A.	MIN-MAX	R.C.L.
sumas	$N^2 M^2$	M^2	-	-
restas	-	M^2	-	$M^2 + 1$
multiplicaciones	$N^2 M^2$	-	-	M^2
divisiones	M^2	-	-	M^2
comparaciones	-	-	$2M^2 - 1$	-

$$\text{total sumas} = N^2 M^2 + M^2$$

$$\text{total restas} = 2M^2 + 1$$

$$\text{total multiplicaciones} = N^2 M^2 + M^2$$

$$\text{total divisiones} = 2M^2$$

$$\text{total comparaciones} = 2M^2 - 1$$

Para una imagen de 800×800 pixels y una ventana de 3×3 pixels:

$$\text{total sumas} = 6,400,000$$

$$\text{total restas} = 1,280,001$$

$$\text{total multiplicaciones} = 6,400,000$$

$$\text{total divisiones} = 1,280,000$$

$$\text{total comparaciones} = 1,279,999$$

total de operaciones aritméticas = 16,640,000

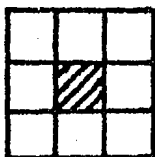
total de operaciones lógicas = 1,279,999

El método propuesto reduce en un 36.58% el número de operaciones aritméticas a ejecutar.

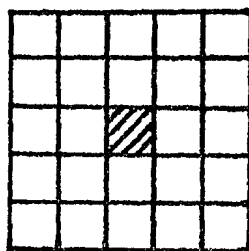
5.3 ALGORITMOS DESARROLLADOS.

El procesamiento de la imagen se realiza aplicando las transformaciones en un proceso iterativo en el que se toman una a una las líneas de la imagen y se procesan uno a uno los pixels en la línea.

Dado que las transformaciones que se aplican son transformaciones espaciales, el procesamiento de cada pixel requiere de la presencia de los pixels vecinos. Esta vecindad está determinada por el grado de precisión que se desee obtener en el procesamiento, siendo lo más común el uso de vecindades de tamaño 1 y 2. A continuación se muestran éstas.



Vecindad de tamaño 1

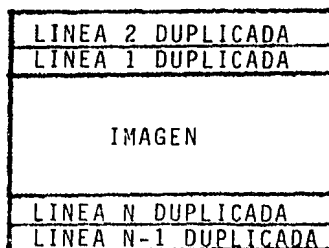
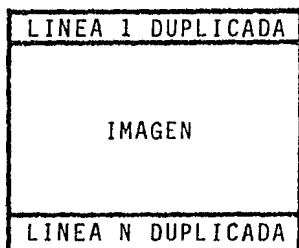


Vecindad de tamaño 2

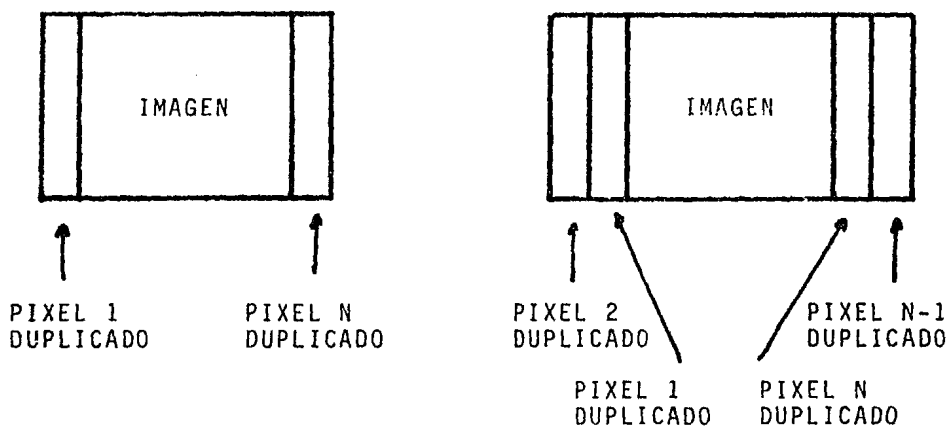
Como consecuencia de lo anterior, el procesamiento de una línea requiere de la presencia de una o dos líneas anteriores y una o dos líneas posteriores, dependiendo del tamaño de vecindad deseado. Con esto, se tiene para cada uno de los pixels de la línea en proceso, el conjunto de pixels que forman su vecindad y al cual se le dá el nombre de ventana. Se puede asumir entonces, que las ventanas pueden ser de tamaño 3 o 5, dependiendo del número de líneas requeridas para formarlas y que en una ventana dada, la línea de interés es siempre la que está en el centro.

Se requiere especial atención para el caso de la falta de pixels vecinos para los pixels de la primera y última líneas de la imagen y de los extremos izquierdo y derecho de cada línea. Para resolver ésto, en un paso previo a este módulo, se duplican la primera y última líneas, cuando se vaya a procesar con vecindad de 1 y las dos primeras y las dos últimas, cuando sea con vecindad de 2.

Gráficamente se vé de la siguiente forma:



Por otro lado, el problema de los pixels laterales se resuelve dentro de la rutina, duplicando uno o dos pixels (dependiendo de la vecindad) de cada extremo de cada una de las líneas, como se muestra:



De esta forma, se logra tener las vecindades requeridas para todos los pixels de la imagen y así poderles aplicar las transformaciones definidas, de la siguiente forma.

Filtraje paso-bajas.

Esta transformación consiste simplemente en la sustitución del pixel en cuestión, por el promedio de los valores de los pixels de su vecindad (incluyéndolo), y por lo tanto su aplicación estriba en obtener la suma de todos estos --

pixels y luego dividir ésta entre el número de pixels sumados (este número es siempre igual al cuadrado del tamaño de la ventana).

Filtraje paso-altas.

La aplicación de esta transformación se lleva a cabo restando el valor obtenido para el pixel en el paso anterior del valor original del pixel.

Sobreposición de la imagen.

Como el nombre lo indica, en este caso se pretende encimar la nueva imagen a la original, lo cual se logra sumando el valor del pixel obtenido del filtraje paso-altas, al valor del pixel en la imagen original.

Estas tres transformaciones se aplican secuencialmente a cada uno de los pixels de cada una de las líneas de la imagen, en un proceso iterativo, cuyo resultado es el realce de bordes de la imagen.

La transformación correspondiente al realce de contraste se lleva a cabo en un proceso posterior, en el que se recorre la imagen que resultó del proceso anterior, pixel por

pixel, aplicándoles las operaciones requeridas. La razón de no incluir esta transformación junto con las anteriores es - que para ésta se requiere conocer los valores mínimo y máximo de todos los pixels de la imagen y estos no se pueden obtener hasta no haberla recorrido por completo una vez.

La aplicación de esta transformación consiste en obtener el intervalo de niveles de gris contenidos en la imagen, mediante la resta de su valor máximo y mínimo, así como su correspondencia con una escala de valores de 0 a 127. Posteriormente, aquellos pixels que sean mayores a 128 se asignan a los valores negativos que les corresponden de acuerdo a su complemento a dos. Finalmente, se hace una asignación de estos valores a un nuevo nivel de gris que va desde el blanco (nivel cero) hasta el negro (nivel 127).

A continuación se describe el contexto en el que se conjugar los procesos descritos en los párrafos anteriores, para formar el algoritmo de realce.

Como ya se había mencionado el procesamiento de la imagen se realiza línea por línea, para lo cual se requiere que con cada línea a procesar estén presentes las líneas adyacentes que forman su vecindad. Para esto se utiliza un arreglo como el que se muestra.

VENTA(5,3244)

	1	2		3244
1				
2				
3				
4				
5				

La forma en que se cargan las líneas de la imagen a este arreglo depende del tamaño de las ventanas con las que se está trabajando. Si es el caso de ventanas de tamaño 3, las líneas se cargarán de la siguiente forma.

	1			3244
1				
2				
3				
4				
5				

En este caso, no se utilizan los dos últimos renglones del arreglo y se deja una columna vacía a la izquierda, para la posterior creación de la vecindad de los pixels del extremo izquierdo de la línea. Para el lado derecho, la columna - requerida queda libre por el hecho de que la imagen de mayor tamaño tiene 3240 pixels por línea y por lo tanto el arreglo no se llena en la dimensión horizontal tampoco.

En el caso de utilizar ventanas de tamaño 5, la situación sería la siguiente:

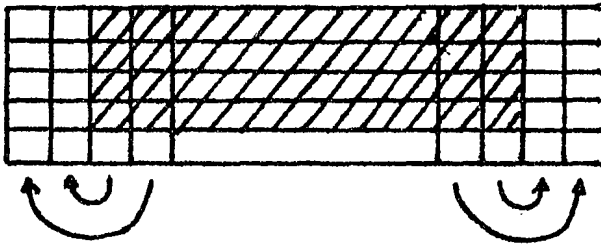
	1	2		3243	3244
1					
2					
3					
4					
5					

Aquí se ve como las líneas se cargan a partir de la tercera columna, dejando el espacio requerido a la izquierda. - El espacio del lado derecho sigue garantizado aún para la imagen de mayor tamaño.

Para ejemplificar la secuencia de ejecución del algoritmo se asumirá el uso de ventanas de tamaño 5.

El primer paso en la ejecución es la carga de la primera línea, junto con las líneas adyacentes que forman su vecindad, excepto la última de ellas, esto es:

A continuación se copian los valores extremos de las líneas cargadas:



En este punto, se tiene la primera línea de la imagen, en el centro del arreglo, junto con casi toda la vecindad requerida (falta la última línea de ésta) para el procesamiento de todos sus píxeles. El siguiente paso es el inicio del proceso iterativo que dará como resultado el realce de bordes de la imagen. Los pasos de este proceso son:

Carga de la última línea de la vecindad.

Copia de los píxeles extremos de esta línea.

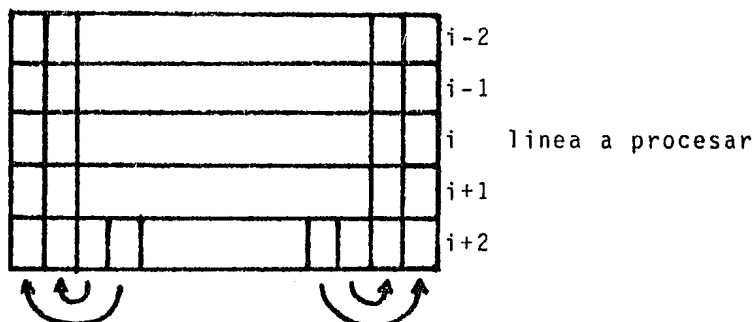
Aplicación del filtraje paso-bajas.

Aplicación del filtraje paso-altas.

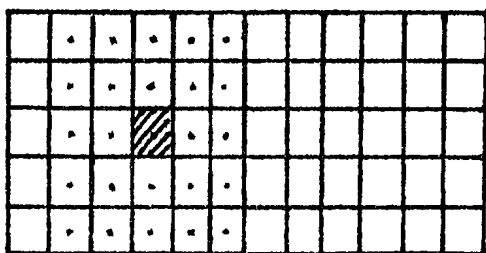
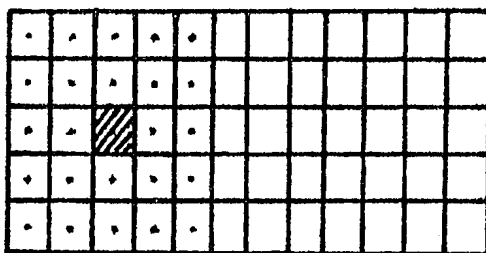
Sobreposición de la imagen.

Corrimiento de líneas, hacia arriba.

En un instante cualquiera de la iteración, este proceso se vería de la siguiente forma:



En este punto ya se tiene absolutamente completa la vecindad para todos los pixels de la linea y por lo tanto se procede a procesarlos uno a uno, tomando las ventanas correspondientes, de esta forma:



Para cada pixel de la línea se llevan a cabo las operaciones equivalentes a los siguientes procesos.

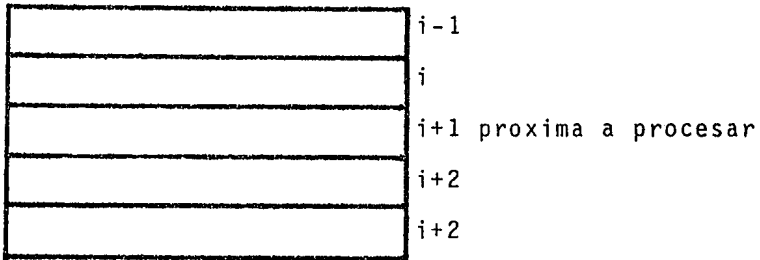
Suma del pixel con todos los pixels que forman su vecindad.

Filtraje paso-bajas.

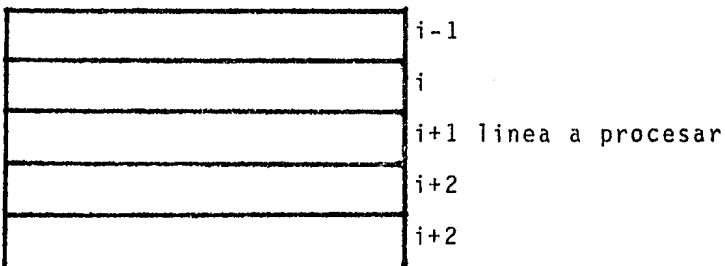
Filtraje paso-altas.

Sobreposición de la imagen.

Una vez que se han transformado todos los pixels de la línea se procede a recorrer las líneas un renglón hacia arriba en el arreglo, para así preparar la vecindad de la siguiente línea.



Y así, la siguiente iteración empezará:



De esta forma el proceso continúa hasta transformar todas las líneas de la imagen.

Cada una de las nuevas líneas obtenidas de la transformación anterior es enviada a un archivo de salida y poste -- riormente vuelta a leer para aplicarle la transformación de realce de contraste, de nuevo en un proceso iterativo pixel por pixel.

A continuación, se presenta el algoritmo completo escrito en FORTRAN 7.


```

C      esta la linea de interes en la ventana ( es la linea
C      central ). Si TAMVEN=3, entonces LINEA=2 Si TAMVEN=5
C      entonces LINEA=3.
C
C      INICIALIZACION DE CONSTANTES.
C
C      IF (TAMVEN.EQ.3) THEN
C          VALLAT=1
C      ELSE
C          VALLAT=2
C      ENDIF
C      PRIPIX=VALLAT+1
C      ULTPIX=NUMPIX+VALLAT
C      LINEA=VALLAT+1
C      DENOM=TAMVEN**2
C      MIN=127
C      MAX=-128
C
C      Se carga la primera ventana (excepto la ultima linea) de
C      la imagen, dejando vacias tantas columnas del arreglo,
C      como valores laterales (VALLAT) se vayan a requerir. La
C      ultima linea de la ventana se carga dentro del proceso
C      iterativo.
C
C      DO 20 I=1,TAMVEN-1
C          DO 10 J=1,NUMPIX
C              CALL 1LBYTE(PIXEL,ENT,INI+J-1)
C              VENTA(I,VALLAT+J)=PIXEL
10      CONTINUE
20      CONTINUE
C
C      Se copian los valores de los pixels extremos de cada linea,
C      para crear la vecindad lateral requerida. Si el tamaño de
C      la ventana es tres la vecindad es igual a uno y por lo tanto
C      se copia un pixel de cada extremo. Si la ventana es de cinco
C      se requieren copiar dos pixels de cada extremo, puesto que la
C      vecindad es igual a dos.
C
C      IF (TAMVEN.EQ.3) THEN
C          DO 30 I=1,2
C              VENTA(I,PRIPPIX-1)=VENTA(I,PRIPPIX)
C              VENTA(I,ULTPIX+1)=VENTA(I,ULTPIX)
30      CONTINUE
C      ELSE
C          DO 40 I=1,4
C              VENTA(I,PRIPPIX-1)=VENTA(I,PRIPPIX)
C              VENTA(I,PRIPPIX-2)=VENTA(I,PRIPPIX+1)
C              VENTA(I,ULTPIX+1)=VENTA(I,ULTPIX)
C              VENTA(I,ULTPIX+2)=VENTA(I,ULTPIX-1)
40      CONTINUE

```

ENDIF

C
C
C Se aplican las transformaciones a cada una de las lineas de
C la imagen, en forma iterativa. Para esto, se requiere que en
C cada iteracion se tenga una ventana (subsecuente) de la imagen
C en la cual la linea de interes es la central. Esto ultimo se
C logra, en la primera iteracion, completando la primera ventana
C mediante la carga de la linea faltante y posteriormente, para
C las iteraciones restantes, recorriendo la ventana recién proce-
C sada un renglon hacia arriba (lo que deja una ventana incom-
C pleta como en el primer caso) y leyendo una nueva linea en la
C siguiente iteracion.
C

DO 110 I=1,NUMLIN

Se carga la ultima linea de la ventana a procesar.

DO 50 J=1,NUMPIX

CALL ILBYTE(PIXEL,ENT,INI+J-1)

VENTA(TAMVEN,VALLAT+J)=PIXEL

50 CONTINUE

C
C Se copian los valores de los pixels de los extremos de la
C linea recién leida.

IF (TAMVEN.EQ.3) THEN

VENTA(TAMVEN,PRIPIX-1)=VENTA(TAMVEN,PRIPIX)

VENTA(TAMVEN,ULTPIX+1)=VENTA(TAMVEN,ULTPIX)

ELSE

VENTA(TAMVEN,PRIPIX-1)=VENTA(TAMVEN,PRIPIX)

VENTA(TAMVEN,PRIPIX-2)=VENTA(TAMVEN,PRIPIX+1)

VENTA(TAMVEN,ULTPIX+1)=VENTA(TAMVEN,ULTPIX)

VENTA(TAMVEN,ULTPIX+2)=VENTA(TAMVEN,ULTPIX-1)

ENDIF

C
C REALCE DE BORDES.

C Para cada uno de los pixels en la linea.

DO 80 P=PRIPIX,ULTPIX

C Se suma el valor del pixel con los valores de los
C pixels vecinos. El tamaño de la vecindad es igual
C al numero de valores laterales y es hacia la iz-
C quierda, la derecha, arriba y abajo.
C

SUMA=0

DO 70 REN=1,TAMVEN

DO 60 COL=(P-VALLAT),(P+VALLAT)

SUMA=SUMA+VENTA(REN,COL)

60 CONTINUE

70 CONTINUE

C
C FILTRADO PASO BAJAS
C

```

C
      BORDES(P)=FLOAT(SUMA)/DENOM+0.5
C
C
C      FILTRADO PASO ALTAS
C
C
C      BORDES(P)=VENTA(LINEA,P)-BORDES(P)
C
C
C      SOBREPONICION DE IMAGENES
C
C
C      BORDES(P)=VENTA(LINEA,P)+BORDES(P)
C
C
C      Se obtienen los valores minimo y maximo de todos
      los pixels.
      IF (MIN.GT.BORDES(P)) MIN=BORDES(P)
      IF (MAX.LT.BORDES(P)) MAX=BORDES(P)
C
C      Se envia al archivo de salida,el pixel recién calculado
      CALL ISBYTE(BORDES(P),SAL,P-VALLAT-1)
80      CONTINUE
C
C      Se recorre la ventana una linea hacia arriba (para formar
      la siguiente ventana junto con la linea que sera leida en
      la siguiente iteracion).
      DO 100 J=2,TAMVEN
      DO 90 K=1,ULTPIX+VALLAT
      VENTA(J-1,K)=VENTA(J,K)
90      CONTINUE
100     CONTINUE
110     CONTINUE
C
C
C      REALCE DE CONTRASTE.
C
C
C      Elongacion del histograma a 128 niveles de gris.
      INTER=(FLOAT(MAX)-FLOAT(MIN))/127
      IF (INTER.NE.0.0) THEN
      DO 120 I=1,NUMPIX
      CALL ILBYTE(PIXEL,SAL,I-1)
      IF (PIXEL.GT.128) PIXEL=PIXEL-256
      NIVGRIS=(PIXEL-MIN)/INTER+0.5
      CALL ISBYTE(NIVGRIS,BANDA,I-1)
120     CONTINUE
      ENDIF
      RETURN

```

5.4 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE COMPUTO UTILIZADO.

5.4.1 HARDWARE

En la fig. 5.3 se muestra la configuración del sistema, en la cual destacan los siguientes componentes:

- Procesador PERKIN ELMER 8/32.

Es un procesador de 32 bits, con 32 registros internos, microprogramado, con capacidad de hasta 1 MB de memoria (aunque esta configuración solo cuenta con 512 KB) y con un bus de acceso directo a memoria al cual se le pueden colgar hasta 7 dispositivos.

- Unidades de disco CDC 9766.

Unidades con capacidad de almacenamiento de 256 MB y con capacidad de doble puerto, lo que permite conectarlas a dos diferentes controladores, conectados a su vez a dos procesadores distintos.

- Unidades de cinta.

Unidades de 9 pistas a 800 y 1600 bpi.

- Unidad de despliegue COMTAL 8000.

Esta unidad está compuesta por un módulo de lógica, un módulo de memoria y un monitor de despliegue de alta resolución de 512 X 512 pixels.

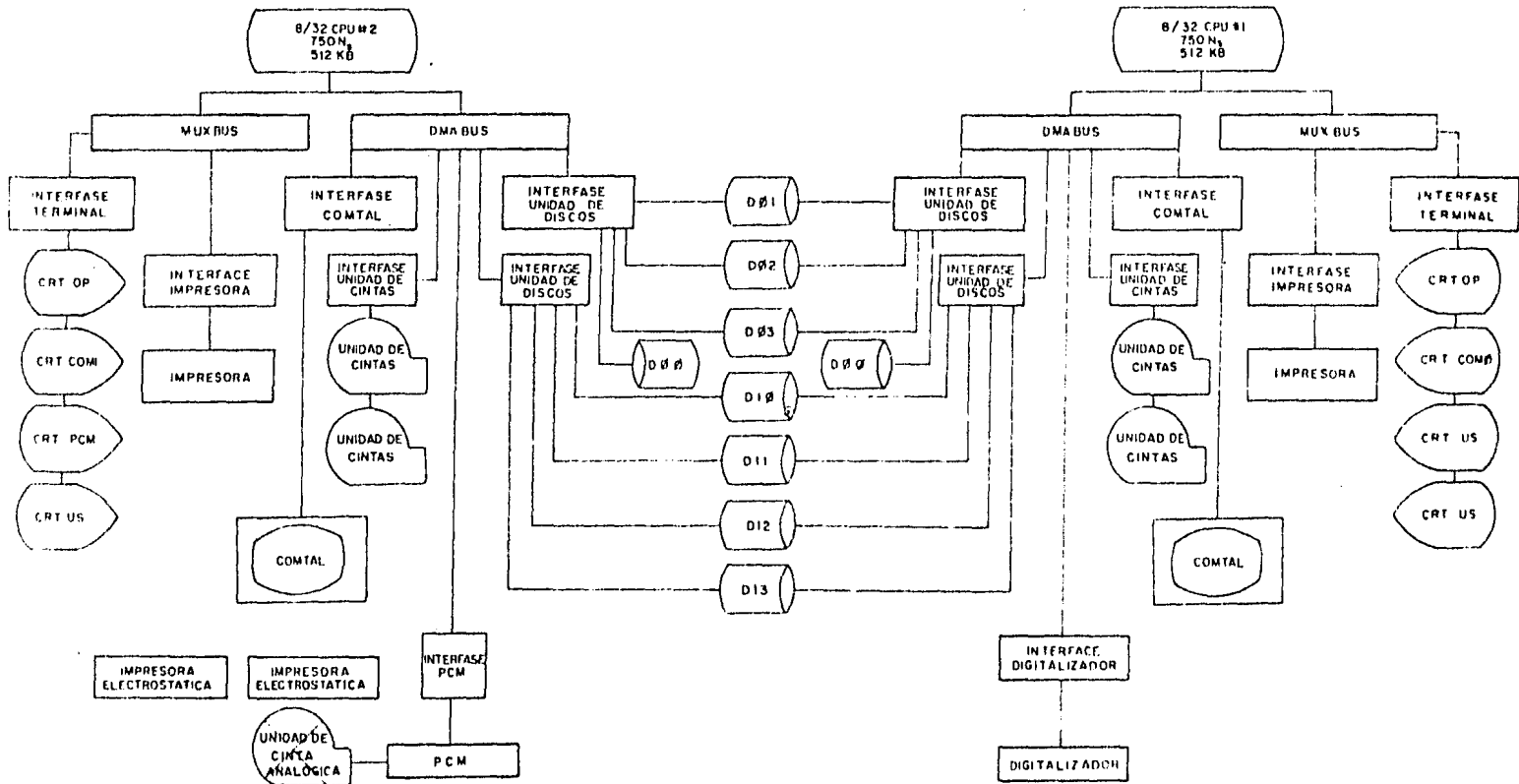


FIG. 5.3 SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE IMAGENES

- Graficador electrostático.

Este es un graficador fuera de línea, con interfaz para unidad de cinta y con una resolución de 200 puntos por pulgada, horizontal y verticalmente.

- Consola de operación.

- Impresora de línea.

- 3 terminales de vídeo.

Cabe aclarar que uno de los dos procesadores que forman la configuración, cuenta con un módulo para decodificar información procedente del barredor multiespectral DEADDAULUS.

5.4.2 SOFTWARE

El algoritmo se desarrolló en FORTRAN 7, llamado así por ser un subconjunto de FORTRAN 77. Se utilizó este lenguaje por el simple hecho de que el paquete para procesamiento de imágenes disponible está escrito en FORTRAN IV y se tenía el objetivo de que la implantación de este algoritmo resultara en una subrutina más de este paquete llamado ELAS.

Dada la amplia modularidad del paquete no hubo necesidad de modificar o desarrollar rutinas especiales o adicionales.

les a la contenida en este trabajo, puesto que las unicas -
rutinas que se requirieron, para leer y escribir las imágenes
(pixel por pixel) ya estaban disponibles.

CAPITULO SEIS

ANALISIS DE INDICADORES GEOHIDROLOGICOS DE LA IMAGEN DEL VALLE DE LA PAZ-EL CARRIZAL.

6.1 DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Nombre : Valle de La Paz-El Carrizal, B.C.S.

Localización : La zona de estudio queda ubicada dentro de la llamada Región del Cabo, en el sur de la península de Baja California entre los paralelos 23° 30' y 24° 15' de latitud norte, y entre los meridianos 110° y 110° 40' de longitud al oeste de Greenwich.

El valle de La Paz corresponde a la cuenca del arroyo del mismo nombre, el cual drena hacia el Golfo de California, por la Bahía de La Paz. El valle del Carrizal, se localiza en la cuenca del arroyo del mismo nombre que en parte drena hacia el Océano Pacífico y en otra hacia el Golfo de California. Esta zona corresponde a la región -sombreada de la fig. 6.1 (S.R.H., 1974).

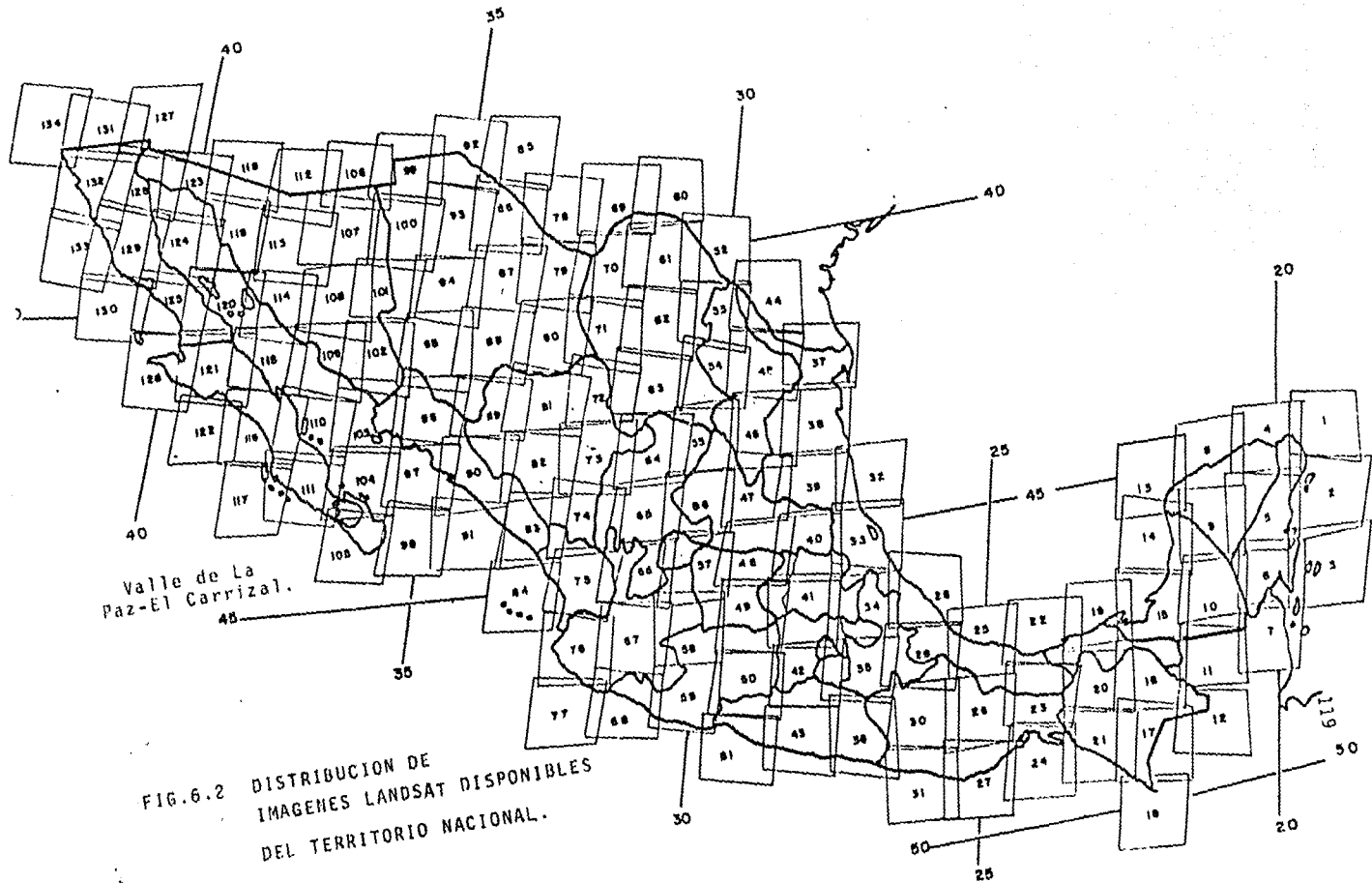
Area : 1.900 km² corresponden a las cuencas estudiadas de La Paz y El Carrizal con superficies de 947 Km² y de 553 Km² respectivamente (Dumon, Hernández, 1985).

Síntesis hidrológica del sitio de prueba : El estado de Baja California Sur es una zona árida por su baja precipitación. Esto se explica por la presencia de la cordillera que aisla a la vertiente oriental y que impide que penetren los vientos que contienen mayor humedad, provenientes del Pacífico. Además, sobre las crestas montañosas convergen y chocan los aires secos del Golfo de California y los nubosos del Océano Pacífico. Las pequeñas precipitaciones pluviales labran insignificantes arroyos y uno que otro manantial. Debido a lo anterior, en la península no existen ríos de importancia en forma permanente, a excepción de la desembocadura del Río Colorado.

Hay profundos barrancos; algunos de los cuales son hechos por el agua de lluvia que corre hacia el mar, y otros que corresponden a los arroyos que vacían en el Golfo de California, en la Laguna Salada y en el Océano Pacífico. Por lo general, estos arroyos se pierden antes de vaciarse en sus respectivos desagües a causa de la sequedad del suelo por donde atraviesan, y por la gran evaporación que sufren. Las aguas subterráneas están subexplotadas con excepción de la zona circundante a la ciudad de La Paz (Dumon, Hernández, 1985).

6.2 IMAGEN UTILIZADA.

En la fig 6.2 se muestra la distribución de imágenes LANDSAT disponibles del territorio nacional. Como --



mo puede observarse, EL Valle de La Paz-El Carrizal está comprendido por dos imágenes. Debido a esto, la imagen - procesada corresponde a la unión de las áreas útiles de ambas. Dichas imágenes son la DL 104 PR 36 R 43 y la DL 105 PR 36 R 44, las dos tomadas el día 5 de Noviembre de 1978, con un contenido del 10% de nubes.

6.3 RESULTADOS

Con el propósito de mostrar los resultados del módulo de realce, se obtuvieron cinco impresiones electrostáticas, las cuales se describirán a continuación.

En la fig. 6.3 se muestra una imagen en blanco y negro (en 16 niveles de gris) del sitio de prueba, donde se muestra la información del primer componente de la -- transformación de componentes principales. En ella, las líneas que crecen en forma arborecente representan los -- cauces de la red hidrológica.



FIG. 6.3

En la fig. 6.4 se muestra el resultado del filtraje paso altas sobre la imagen de la fig. 6.3. Como puede observarse en esta imagen se pierde el contexto de la imagen original y prevalecen todos los perfiles, cumpliéndose con esto el objetivo del filtraje.

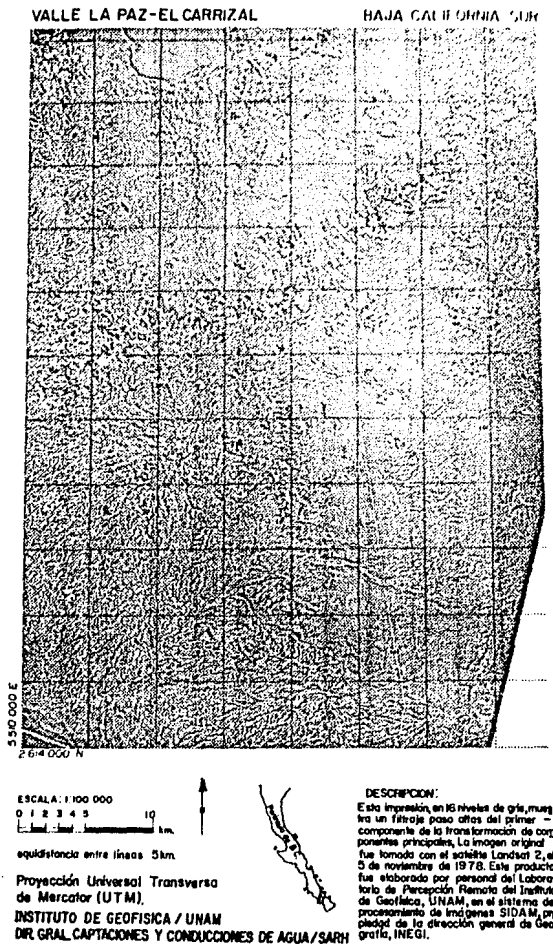


FIG. 6.4

En la fig. 6.5, se muestra la imagen transformada - que resulta de la aplicación completa del módulo de realce. En ella se puede observar en primer término una mejora en el realce general de la imagen ya que las zonas - de la fig. 6.3 que aparecen oscuras, se tornan contrastantes. Asimismo, en la parte occidente de la imagen donde aparecen las áreas con mayor densidad de drenaje se observa una mejor definición de los cauces principales y los más pequeños aparecen en forma más precisa.

Si una imagen contiene un porcentaje menor de información, como es el caso de la fig. 6.6 (segunda componente de la transformación de componentes principales) el realce de la imagen se hace más evidente.

Los resultados de la aplicación del módulo de realce a la fig. 6.6 se muestran en la fig. 6.7, en la cual se demuestra con mayor claridad la eficiencia del mismo.

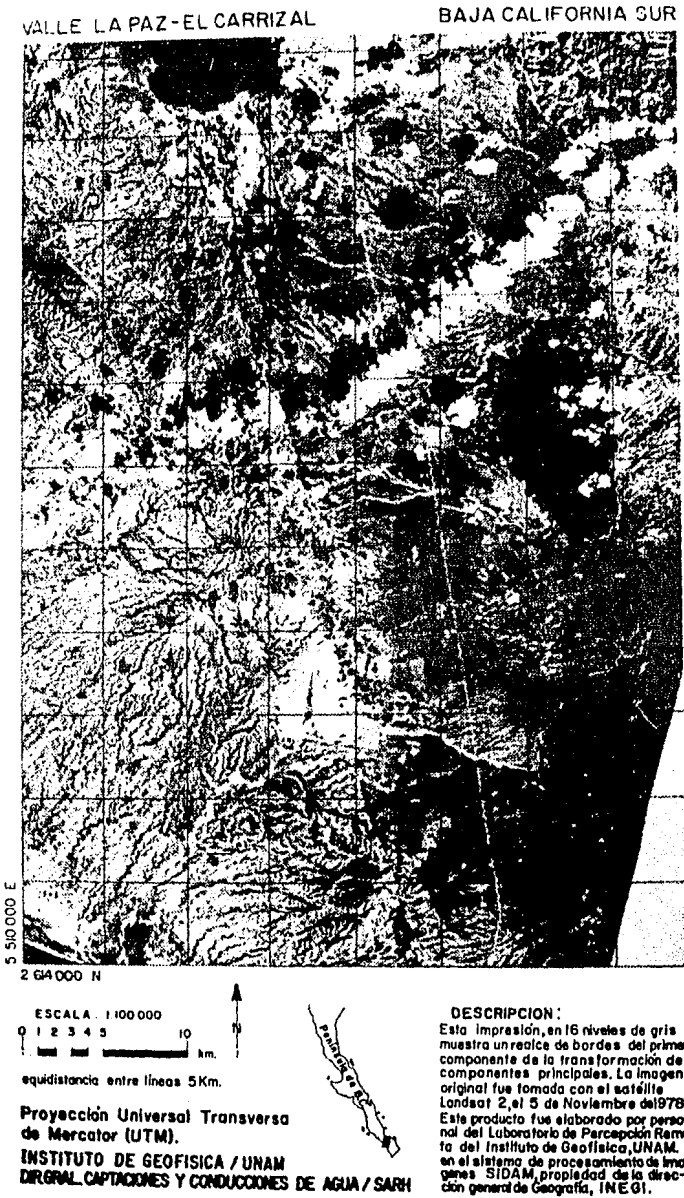
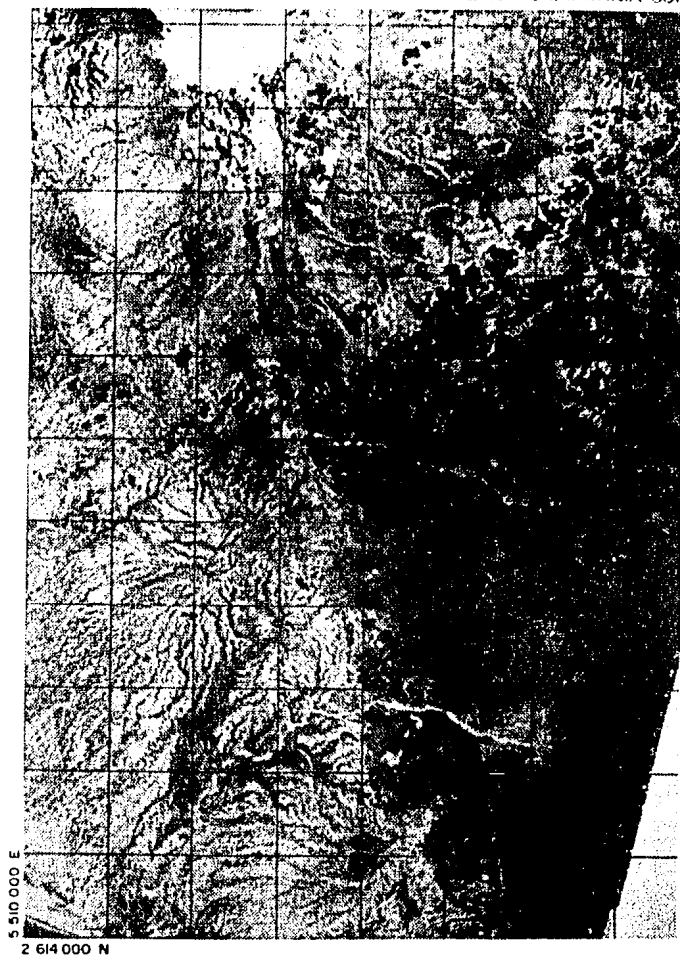


FIG. 6.5

VALLE LA PAZ-EL CARRIZAL

BAJA CALIFORNIA SUR



5 510 000 E

2 614 000 N

ESCALA : 1 : 100 000

0 1 2 3 4 5 10
Km.

equidistancia entre líneas 5 km

Proyección Universal Transversa
de Mercator (UTM).

INSTITUTO DE GEOFISICA / UNAM

DIR. GRAL. CAPTACIONES Y CONDUCCIONES DE AGUA / SARH



DESCRIPCION:

Esta impresión, en 16 niveles de gris, muestra el segundo componente de la transformación de componentes principales. La imagen original fue tomada con el satélite Landsat 2, el 5 de Noviembre de 1978. Este producto fue elaborado por personal del Lab. de Percepción Remota del Instituto de Geofísica, UNAM, en el sistema de procesamiento de imágenes — SIDAM, propiedad de la dirección general de Geografía, INEGI.

FIG. 6.6

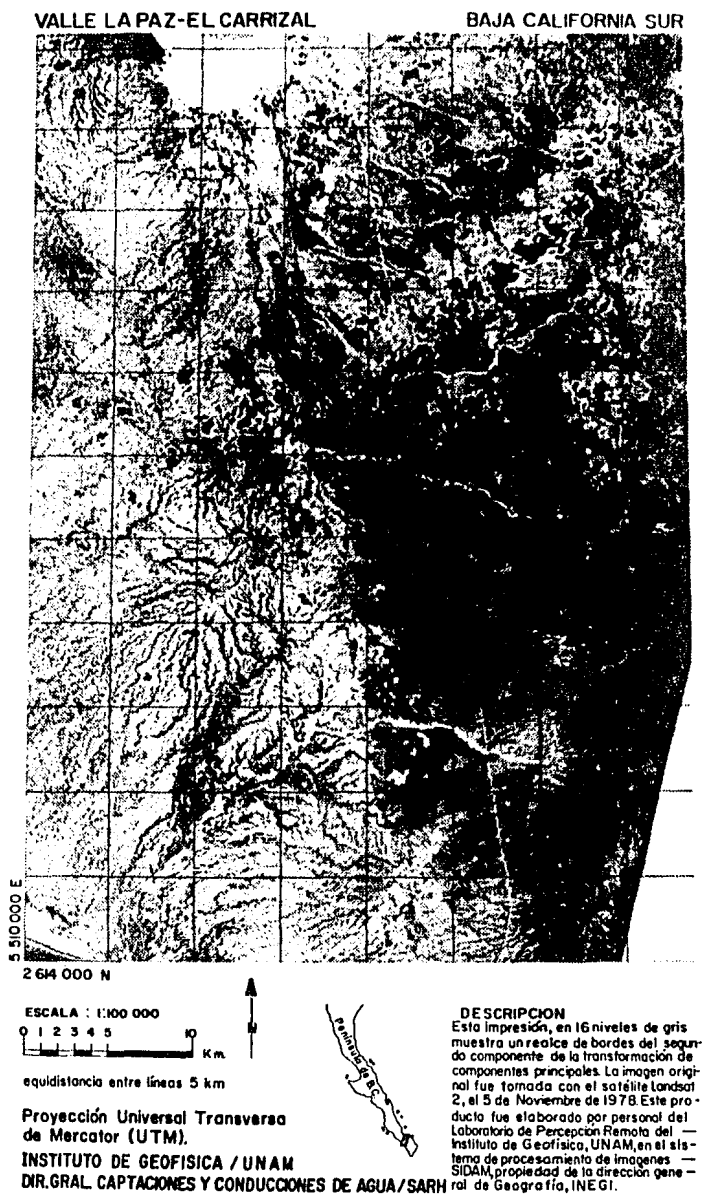


FIG. 6.7

CAPITULO SIETE

CONCLUSIONES

- Si bien este trabajo no es novedoso en virtud de que no se inventó una nueva técnica de realce de imágenes, sino que se utilizó el algoritmo propuesto por W. G. Rhode et. al, 1977, éste resulta valioso por dos importantes razones.

Primera, el trabajo está enfocado hacia un problema real que afecta a nuestro país, y contribuye en su solución.

Segunda, la técnica utilizada se fundamentó en un desarrollo matemático, elaborado por las autoras, que demuestra la razón de ser del algoritmo y que no se había realizado hasta ahora. Con esto, se responde a uno de los principales objetivos de una carrera de ingeniería: "Desarrollar la capacidad para pensar en fenómenos físicos en función de abstracciones útiles" (Krick, 1980).

-El continuo desarrollo de las técnicas de Percepción Remota y de las aplicaciones del Procesamiento Digital de Imágenes, presenta a la ciencia de la computación un amplio panorama de investigación, puesto que discubren la necesidad de crear sistemas de cómputo orientados exclusivamente al procesamiento de imágenes dada la cantidad y naturaleza de los datos que involucra. Asimismo

mo, surge la necesidad de contar con software más especializado para la ejecución rápida y eficaz de un proceso.

Con base en lo anterior, se podrían obtener más y mejores resultados y se abriría la posibilidad de crear técnicas de análisis más sofisticadas, que permitirían resolver un rango más amplio de problemas en distintas áreas, dentro de las cuales seguiría estando en primer plano la prospección de recursos naturales renovables y no renovables.

- En este trabajo se muestran algunos avances en el desarrollo de algoritmos para el procesamiento digital de imágenes y su aplicación a los datos obtenidos por sensores remotos. De esta forma se demuestra que el desarrollo de proyectos de investigación contribuye a una mejor planeación y aprovechamiento de los recursos con los que cuenta el país.

BIBLIOGRAFIA

H.C. Andrews, B.R.Hunt, 1977. Digital Image Restoration. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA.

R.N. Brancewell, 1978. The Fourier Transform and its Applications. McGraw-Hill, New York, USA.

K.R. Castleman, 1980. Digital Image Processing. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

DSE/ONU , 1984. Interregional Expert Meeting on Use of Satellite Imaging Radar and Thematic Mapping Data in Natural Resources Development. Proceedings, Berlin-West.

M.J.B. Duff, S. Levialdi, 1981. Languages and Architectures for Image Processing. Academic Press Inc., London, England.

M.J.B. Duff, 1983. Computing Structures for Image Processing. Academic Press, Inc., New York, USA.

C. Dumon, B. Hernández, 1985. Análisis fisicoquímico del terreno del valle de La Paz-El Carrizal. En: Proyecto "Geohidrología del valle de La Paz- El Carrizal, B.C.S". Instituto de Geofísica, UNAM, México.

M. P. Ekstrom, 1984. Techniques of Image Processing. Academic Press, Inc., Orlando, Florida, USA.

Eros Data Center, 1980. Geological Remote Sensing Techniques: An Advanced Course. Eros Data Center, Sioux Falls, South Dakota, USA.

R.K. Farnsworth, E.C. Barret, M.S. Dhanjn, 1984. Application of Remote Sensing to Hydrology Including Ground Water, Technical Documents in Hydrology. IHP-II Project A.1.5., UNESCO, Paris.

G. Fraysse, 1980. Remote Sensing Application in Agriculture and Hydrology. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands

R. González, P. Wintz, 1978. Digital Image Processing. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, USA.

N. T. Kottegoda, 1980. Stochastic Water Resources Technology. The McMillan Press Ltd., London, England.

E. W. Krick, 1980. Fundamentos de Ingeniería: Métodos, Conceptos y Resultados. Limusa, México.

J. Lintz Jr., D.S. Simonett, 1976. Remote Sensing of Environment. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, USA.

J. Lira, M. Balcázar-García, 1983. Image Processing Techniques for the evaluation of electromechanical etch spots. In: Nuclear Tracks, Vol. 7., No.3, pp. 101-107. Pergamon Press, Oxford, London, England.

J. Lira, J. Blásquez, 1984. Estado actual, perspectivas y desarrollo del Laboratorio de Percepción Remota. Instituto de Geofísica, UNAM., México.

J. Lira, 1984. Notas al curso: Procesamiento Digital de Imágenes. Maestría en computación. Instituto de Geofísica, UNAM, México.

Manual of Remote Sensing. 1975. Vol. I, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, USA.

T. Pavlidis, 1980. Algorithms for Graphics and Image Processing. Computer Science Press, Rockville, USA.

M. P. Petrov, 1976. Deserts of the World. John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

W. K. Pratt, 1978. Digital Image Processing. John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

W. G. Rhode, J. K. Lo, R. A. Pohl, 1977. Eros Data Center LANDSAT Digital Enhancement Techniques and Imagery Availability. In: Canadian Journal of Remote Sensing, Vol.4, No.1, pp 63-76. Ottawa, Canada.

A. Rosenfeld, A. C. Kak, 1976. Digital Picture Processing. Academic Press Inc., New York, USA.

F. F. Sabins Jr., 1978. Remote Sensing Principles Interpretation. W. H. Freeman and Company, San Francisco, USA.

SARH: Subsecretaría de Construcción, 1974. Estudio Geohidrológico del valle de La Paz-El Carrizal, B.C.S. Técnicas Modernas de Ingeniería S.A., México, D.F.

P. N. Slater, 1980. Remote Sensing: Optics and Optical Systems. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, USA.

J. L. Star, 1985. Introduction to Image Processing. In: Byte Computing and Sciences, Vol. 10. No. 2, pp. 163-170. McGraw-Hill Inc., New Hampshire, USA.