

**ERROR DE No. \_\_\_ DE PAGINA**

1179

9  
20)

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**MAESTRIA EN EXPLORACION DE RECURSOS ENERGETICOS DEL  
SUBSUELO**

**CAPTURA, PROCESAMIENTO E INTERPRETACION DE IMAGENES:  
GEOFISICAS, TELEDETECCION, TOPOGRAFICAS Y GEOLOGICAS  
DEL AREA GUAXCAMA  
(PLATAFORMA SAN LUIS POTOSI-VALLES)**

**MARCO ANTONIO RODRIGUEZ URIBE**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D.F. AGOSTO DE 1994.



## **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.

## **DEDICATORIA**

**A MI ESPOSA MA. DE JESUS POR SU APOYO, COMPRENSION Y CARIÑO.**

**A MIS HIJAS MA. DE JESUS Y CLAUDIA PATRICIA.**

**A MIS PADRES MANUEL Y RAMONA.**

**A MIS HERMANOS:**

**ERNESTO**

**VICTOR**

**CARMEN**

**LUIS**

**VIRGINIA Y**

**MARGARITA.**

**A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a las autoridades de la Gerencia de Exploración de la Región Norte de Petróleos Mexicanos por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo. En especial a los Ingenieros Jorge C. Tovar R. y Alfredo E. Guzman B. por su constante y decidido apoyo.

Lo mismo para las personas que en una o en otra forma colaboraron con sus atinadas sugerencias y orientaciones en la elaboración de este trabajo, Ing. Oscar Trejo e Ing. Joel Flores. y en especial a los Doctores Raymundo Martínez y Rene Chavez por su inapreciable paciencia y apoyo en la conducción del mismo.

**CAPTURA, PROCESAMIENTO E INTERPRETACION DE IMAGENES: GEOFISICAS,  
TELEDETECCION, TOPOGRAFICAS Y GEOLOGICAS DEL AREA GUAXCAMA.  
(PLATAFORMA SAN LUIS POTOSI-VALLES).**

**CONTENIDO**

**RESUMEN**

	<b>PAGINA</b>
<b>CAPITULO I</b>	
INTRODUCCION	6
I.1.- ANTECEDENTES	7
I.2.- OBJETIVOS	8
I.3.- ORGANIZACION DE LA INVESTIGACION	9
<b>CAPITULO II</b>	
FUNDAMENTOS TEORICOS	10
II.1.- OBTENCION DE IMAGENES	11
II.2.- DESPLIEGUE	13
II.3.- TECNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMAGENES	22
II.3.1.- TECNICAS DE CONTRASTE	24
II.3.1.1.- ILUMINACION ARTIFICIAL	27
II.3.1.2.- FILTRADO	30
II.3.2.- ANALISIS MULTIVARIABLE	30
II.3.2.1.- REGRESION MULTIPLE	31
II.3.2.2.- ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	35
II.3.3.- ANALISIS VISUAL ASISTIDO POR COMPUTADORA	39
II.4.- ANALISIS DE PAQUETERIA DE SISTEMAS DE PROCESAMIENTO NUMERICO DE IMAGENES DIGITALES	44
II.4.1.-DESCRIPCION DE LA ARQUITECTURA DE SISTEMAS DE PROCESAMIENTO NUMERICO DE IMAGENES DIGITALES UTILIZADAS	51
<b>CAPITULO III</b>	
APLICACIONES AL AREA GUAXCAMA. (PLATAFORMA S.L.P.-VALLES)	54
III.1.- GEOLOGIA DE LA PLATAFORMA SAN LUIS POTOSI-VALLES	54
III.1.1.- GEOLOGIA SUPERFICIAL DEL AREA GUAXCAMA	54
III.1.2.- CARTOGRAFIA DE LINEAMIENTOS	56
III.1.3.- PALEOGEOGRAFIA	58

III.1.4.- ANALISIS ECONOMICO	65
III.2.- GEOFISICA	72
III.2.1.- ANALISIS Y PROCESADO DE DATOS AEROMAGNETICOS	72
III.2.2.- ANALISIS Y PROCESADO DE DATOS GRAVIMETRICOS	74
III.2.3.- INFORMACION GEOLOGICA	75
III.2.4.- INFORMACION TOPOGRAFICA	75
III.2.5.- IMAGENES DE SATELITE	77
III.3.- TELEDETECCION	78
III.3.1.- PROCEDIMIENTOS ANALITICOS DE INTERPRETACION POR FOTOGEOLOGIA	78
III.3.2.- INTERPRETACION DE LAS IMAGENES DE SATELITE	80
III.4.- METODOLOGIA DE LA INTEGRACION E INFERENCIA INTERPRETATIVA	81
III.4.1.- INTERPRETACION DEL DESPLIEGUE DE LAS IMAGENES DIGITALES PROCESADAS	82
III.4.2.- INTERPRETACION DE IMAGENES COMPUESTAS	105
<b>CONCLUSIONES</b>	126
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	132
<b>APENDICES</b>	
A.- PROCESAMIENTOS CLASICOS APLICADOS A LAS IMAGENES DIGITALES	1A
B.- OBTENCION DE IMAGENES MEDIANTE ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	1B
C.- FILTRADO	1C
D.- BREVE DESCRIPCION DE LAS FORMACIONES GEOLOGICAS Y GEOLOGIA ESTRUCTURAL	1D
E.- IMAGENES COMPUESTAS	1E

**CAPTURA, PROCESAMIENTO E INTERPRETACION DE IMAGENES: GEOFISICAS,  
TELEDETECCION, TOPOGRAFICAS Y GEOLOGICAS DEL AREA GUAXCAMA.  
(PLATAFORMA SAN LUIS POTOSI-VALLES).**

**RESUMEN**

Se aplicó el Procesamiento Digital de Imagen a datos geofísicos (gravimetría y magnetometría), geológicos (litología), topográficos (modelos numéricos de terreno), y teledetección (dos canales de la imagen Landsat-MSS) del área Guaxcama y se realizaron inferencias interpretativas.

La primera parte del trabajo consistió en obtener las imágenes correspondientes a cada una de las variables citadas mediante técnicas de configuración (Kriging e Inverso del Cuadrado de la Distancia), principalmente.

Posteriormente se procesaron las imágenes con miras a obtener información útil, es decir, se aplicó el algoritmo de iluminación artificial para resaltar lineamientos que podrían ser de interés, filtrado digital (tanto en el dominio del espacio como en el de números de onda) para resaltar frecuencias adecuadas, y finalmente se usó el análisis multivariable (análisis de correspondencias) para obtener una imagen digital representativa de todos los datos involucrados.

Los resultados de los procesos mencionados se presentan en forma de imagen digital en pantalla de computadora personal o en papel de impresora.

Se presenta un programa, el cual ahora permite realizar todas las tareas relacionadas con el despliegue de imágenes, además se logra que las imágenes trabajadas sean compatibles con los paquetes: SPIPR para el despliegue de la imagen en pantalla del monitor en tonos de gris o de color y, el paquete CARTO, utilizado para aumentar las dimensiones del mallado y para realizar procesados relativos al Análisis Multivariable. Por último, se describen los requerimientos necesarios en cuanto a materiales y aplicaciones de un sistema de procesamiento digital de imágenes.

**CAPTURA, PROCESAMIENTO E INTERPRETACION DE IMAGENES: GEOFISICAS,  
TELEDETECCION, TOPOGRAFICAS Y GEOLOGICAS DEL AREA GUAXCAMA.  
(PLATAFORMA SAN LUIS POTOSI-VALLES).**

**CAPITULO I**

**INTRODUCCION**

La prospección y la explotación de los recursos naturales de la Tierra, fueron algunas de las primeras inquietudes del ser humano, desde la época prehistórica. Con el desarrollo cultural, científico y tecnológico de la humanidad se ha llegado al estado de interpretación actual, en donde se emplean los más sofisticados instrumentos, técnicas de campo y en particular, la obtención, procesamiento, análisis e interpretación de imágenes digitales, se destacan por tener características de alta resolución tanto espectral como espacial, muy cercanas a las del ojo humano.

Las observaciones realizadas en Geofísica, representan el muestreo de una función continua, la cual puede ser utilizada para generar una matriz algebraica o rejilla de valores discretos, estimados y regularmente espaciados. La operación anterior se realiza con el auxilio de un método de interpolación cuyo resultado se podría representar de dos formas: ya sea por medio de una imagen digital desplegada en pantalla de monitor de una computadora personal, o bien por medio de un mapa de curvas de iso-valores, estas últimas se obtienen mediante una segunda etapa de interpolación mientras que las imágenes digitales se obtienen asignando niveles de gris o niveles de color a cada elemento de la matriz, basado en algún atributo, tal como la Intensidad Total del Campo Magnético Terrestre.

Se ha demostrado que el sistema visual humano, está mejor adaptado para interpretar imágenes visuales que las líneas de iso-valores, de tal manera que al desplegar los datos geofísicos en pantalla o en papel bajo la forma de una imagen digital, frecuentemente permite observar información que permanecía oculta o mezclada con otras señales dentro de los mapas de curvas de nivel o de los perfiles verticales (Broome, 1990).

## I.1.- ANTECEDENTES

Durante los últimos años, ha surgido una gran cantidad de innovaciones en computación, destacando la creación, el procesamiento numérico, el análisis y la interpretación de imágenes digitales, que han dado como resultado una mayor aplicación en dominios tan diversos como: la Robótica, la Bio-medicina, la Astrofísica, las Ciencias de la Tierra, etc. Se ha observado que los progresos realizados en cualquiera de estas ramas de la ciencia puedan adaptarse fácilmente a los otros dominios (Green, 1990).

La adquisición, el procesamiento numérico, el análisis y la interpretación de imágenes digitales por medio de computadoras han modificado el estudio de los fenómenos físicos, por ejemplo, los sensores remotos por satélite estudian las propiedades de reflexión o emisión de las ondas electromagnéticas provenientes de la superficie de la Tierra y representan un apoyo para la evaluación de los recursos naturales a través de estas observaciones (Scanvic, 1983).

Los sensores remotos también llamados métodos de teledetección se refieren a un conjunto de técnicas que permiten detectar a distancia las variaciones de reflexión, absorción y emisión de ondas electromagnéticas; el resultado de lo anterior se materializa por medio de fotografías, de impresiones en papel de computadora o en pantalla de monitor, es decir, mediante imágenes digitales (Verger, 1982).

Como ejemplos de imágenes digitales en Ciencias de la Tierra podemos citar las siguientes: imágenes de satélite (multiespectrales y de radar), imágenes de microscopía (láminas delgadas, muestras de roca, etc.), imágenes de geofísica (magnetometría, gravimetría, sismología, etc.), imágenes de parámetros petrofísicos (porosidad, saturación de agua, permeabilidad, etc.) y las imágenes geológicas (distribución de edades, tipos de roca, distribución de minerales, etc.).

## I.2.- OBJETIVOS

Se aplica el procesamiento de imágenes a los siguientes conjuntos de datos: Gravimetría (Anomalía de Bouguer), Magnetometría (Intensidad Total de Campo), Reflectancia radiométrica de la superficie del terreno (Datos de los canales 4 y 5 del Satélite Landsat-MSS), modelo numérico del terreno (Topografía Digital) y Geología (Litoestratigrafía, geología estructural y Cronoestratigrafía), Con el objetivo de obtener el mayor provecho haciendo inferencias interpretativas sobre cada una de ellas y en su conjunto.

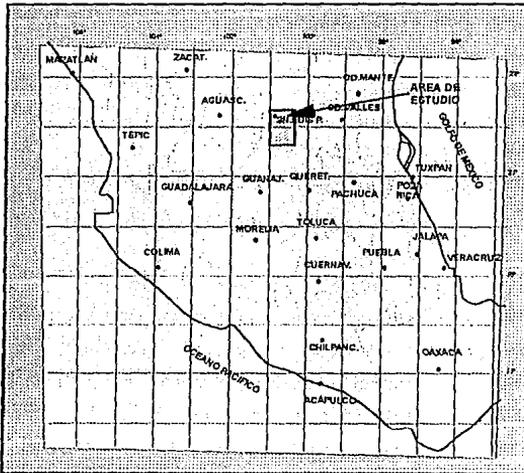


FIG. I.1

El estudio se realizó sobre un área de aproximadamente 3740 km<sup>2</sup>, compuesta de 68 km en la dirección E-W por 55 km en la dirección N-S correspondiente al área de Guaxcama de la parte SW de la Plataforma San Luis Potosí-Valles.

El área estudiada se localiza en el Estado de San Luis Potosí, entre las latitudes Norte de 21° 45' y 22° 15'; y entre las longitudes Oeste de 100° 20' y 101° 00', (fig. I.1).

### I.3.-ORGANIZACION DE LA INVESTIGACION.

Se inicia este estudio con una breve descripción de los fundamentos teóricos en los que se basa el procesado de imágenes tanto geofísicas como de teledetección; desde la obtención de imágenes, despliegue, técnicas de procesamiento, correcciones, filtrados, hasta el análisis visual asistido por computadora.

También se presentan los elementos y ejemplos de aplicaciones de un sistema (programas y equipo) de procesamiento digital de imágenes en Ciencias de la Tierra, haciendo particular énfasis en datos de Geofísica; se explica el contexto en que interviene el sistema mediante el desarrollo paso a paso para el despliegue de todas las imágenes involucradas, en un monitor de alta resolución. Se utilizaron principalmente datos provenientes de métodos potenciales (Gravimetría y Magnetometría), haciendo uso de otras informaciones adicionales como son los casos de imágenes de satélite, topografía y geología superficial. Para motivos de una aplicación práctica de ésta investigación se dispuso de datos pertenecientes a un caso real de campo: Parte del área Guaxcama (Plataforma de S. L. P.-Valles).

Posteriormente, se presentan algunas técnicas consideradas clásicas en la literatura geofísica, de procesamiento digital de datos gravimétricos y magnetométricos (Anexos), pero además, se incluyen algunos métodos desarrollados dentro del dominio del procesamiento digital de imágenes, por ejemplo, mejorar el contraste de anomalías locales por medio del concepto de iluminación artificial, así como la generación de imágenes compuestas de la mezcla de todas las imágenes disponibles de la misma zona geográfica (satélite, geofísica, topografía y geología) con el objetivo de auxiliar a la correlación entre la información de entrada y la interpretación integral de los datos.

El hecho de proponer estudios usando las técnicas mencionadas dentro de un sistema de cómputo, nos permite sujetarnos a la siguiente situación: dada la gran diversidad de actividades en estudio que involucran variables distribuidas en el espacio, se tiene una acumulación importante de datos de diversos orígenes y características, de tal manera que esta cantidad de información supera con mucho a la capacidad de interpretarla. En la actualidad es necesario realizar la integración simultánea de estos grandes volúmenes de datos correspondientes a una sola región. Así, esta investigación se dirigió hacia la integración y posterior inferencia interpretativa de todos los datos disponibles.

## CAPITULO II

### FUNDAMENTOS TEORICOS.

En este módulo se presentan los diferentes elementos que constituyen un estudio integral por medio de imágenes digitales; su obtención, procesamiento digital, presentación de resultados, análisis e interpretación, así como los fundamentos teóricos en que se basa dicho procesamiento digital de imágenes; pero antes de entrar en detalle, es necesario realizar una breve descripción de algunos conceptos usados en el dominio de esta técnica.

Una imagen es la proyección de cualquier realidad física sobre un plano. El ejemplo más usual es una fotografía.

Una imagen analógica se relaciona con una función  $f(x,y)$  de dos variables geográficas independientes  $x,y$ . El valor  $f$  en el punto  $(x,y)$  es proporcional a la intensidad luminosa en ese punto de la imagen.

En teledetección el concepto de imagen digital es el resultado de la codificación (discretización tanto en las coordenadas geográficas como en la intensidad luminosa), de una imagen analógica.

Así, una imagen digital se puede considerar como una matriz algebraica cuyos índices de renglones y columnas indican la posición de un área geográfica elemental, llamada pixel (abreviatura de picture element) y el valor correspondiente a dicha área representa la intensidad luminosa captada por el sensor radiométrico (Sabins, 1983).

Los sensores remotos se fundan bajo la noción del espectro electromagnético, en donde se utiliza el intervalo comprendido entre las radiaciones del visible y el dominio de las microondas pasando por los dominios del infrarrojo (Couzi, 1981).

Todos los objetos distribuidos sobre la superficie terrestre, tales como: rocas, suelos, vegetación y agua, reflejan o emiten una cierta cantidad de energía, la cual depende de la longitud de onda, de la intensidad de la radiación incidente, de las características físicas y biológicas de los objetos y de la orientación de dichos objetos respecto a la fuente de iluminación.

Las observaciones realizadas con los sensores remotos representan el muestreo de una función continua, las cuales se pueden utilizar para generar una matriz algebraica o rejilla de valores discretos, observados y regularmente espaciados, cuyo resultado se podría representar por medio de una imagen digital desplegada en pantalla de monitor de una computadora personal. Las imágenes digitales se despliegan asignando niveles de gris o niveles de color a cada elemento de la matriz, basados en algún atributo.

## II.1.- OBTENCION DE IMAGENES.

La obtención más común y corriente de una imagen, se realiza por medio de una cámara fotográfica y su posterior impresión en papel, el problema estriba en la introducción de tal producto a la computadora ya que para realizarlo es necesario digitalizar tal imagen por medio de algún dispositivo electrónico. Es por estas razones que las imágenes en los dominios tecnológicos y científicos, se obtienen por medio de instrumentos y equipos sofisticados (Gravímetros, Magnetómetros, Sismógrafos, Radiómetros, Radares, Sonares, Etc.), calibrados según el dominio de aplicación (Medicina, Biología, Geofísica, Geología, Geografía, Etc.).

Matemáticamente una imagen digital está representada por una matriz rectangular cuyos elementos varían generalmente entre los enteros 0 y 255, es decir, dentro de un BYTE. Cada elemento de esta matriz (pixel), representa la máxima resolución espacial alcanzada por el Sensor Remoto. Para el caso de la Teledetección, el valor de cada elemento representa la cantidad de energía reflejada por una parte de la superficie del terreno.

También se obtiene una imagen por medio de una mesa de digitalización, en la cual es posible seguir curvas de nivel presentes en un mapa, por medio de un cursor y de un dispositivo electrónico. Ejemplos de estas imágenes son: la topografía, los contactos geológicos, la gravimetría,

etc., otra forma es mediante las técnicas de interpolación, con las cuales se genera una matriz de datos a partir de observaciones irregularmente distribuidas dentro del área de trabajo, ésta es en la actualidad la principal forma de obtener imágenes de tipo gravimétrico, magnético, topográfico, etc. Las técnicas más usadas son: Kriging, El Análisis Normal y la Mínima Curvatura (Davis, 1973).

Otra forma de obtener imágenes es por medio de un paquete de "Procesamiento Numérico de Imágenes Digitales", en donde es posible crear imágenes cuyo contenido sea resultado parcial o final del efecto de un algoritmo de computadora (Toumazt, 1987). Para más detalles de esta forma de generación de imágenes digitales, pasar a la página 44 Análisis de paquetería de sistemas de procesamiento numérico de imágenes digitales.

Una imagen digital puede contener la información relativa de una o más bandas (en el caso de las imágenes de satélite). Si se trata de una sola banda, se dice que la imagen digital es monocromática y la intensidad luminosa es llamada nivel de gris y está representada por una sola matriz. Si se trata de varias bandas la imagen digital es llamada imagen multiespectral y la intensidad luminosa está representada por varias matrices, una por cada banda.

Una imagen digital se aproxima mediante un conjunto de muestras igualmente espaciadas en la forma de un arreglo rectangular de dimensión de  $M \times N$ , y para la banda número  $b$ , se tiene la siguiente representación: (González y Wintz, 1977).

$$\begin{array}{cccc}
 f(0,0,b) & f(0,1,b) & f(0,2,b) & \dots f(0,N-1,b) \\
 f(1,0,b) & f(1,1,b) & f(1,2,b) & \dots f(1,N-1,b) \\
 " & " & " & " \\
 f(m,n,b) = & " & " & " \\
 " & " & " & " \\
 f(M-1,0,b) & f(M-1,1,b) & f(M-1,2,b) & \dots f(M-1,N-1,b) \\
 f(M,0,b) & f(M,1,b) & f(M,2,b) & \dots f(M,N-1,b)
 \end{array}$$

Restricciones:

La intensidad luminosa será representada por números naturales entre:  $0 < f(m,n,b) < 255$

M y N deben ser potencias de 2, de preferencia igual a 512.

Como se puede observar bajo este concepto de imagen digital, es posible tener acceso, numéricamente hablando, a cada elemento de dicha matriz mediante ciertos algoritmos, dependiendo de los objetivos.

## II.2.- DESPLIEGUE

En general, los preprocesos indispensables para la visualización de imágenes digitales son: (Gonzalez y Wintz, 1977)

- 1.- realizar correcciones geométricas para todas las bandas.
- 2.- elaborar histogramas de las intensidades o reflectancias por cada banda, de las poblaciones de pixels.
- 3.- calcular los estadísticos más relevantes: máximo, mínimo, media, mediana, moda, varianza, desviación estandard, número de clases, etc.
- 4.- realizar la cuantificación de cada banda de la imagen, mediante el cálculo de una tabla de codificación .
- 5.- adoptar una paleta de niveles de gris o crear una paleta de colores.
- 6.- desplegar cada canal, utilizando los pasos 2 al 6, en monitor a color VGA, súper VGA, alta resolución RGB o en impresora laser.

### 1.- Corrección Geométrica.

Para simplificar la comparación entre una carta topográfica o geológica del I.N.E.G.I. con los diferentes tipos de bandas de que se dispone sobre la región de estudio, así como de la realización de imágenes restituidas, a partir de dichas bandas, se requiere de una superposición geográfica de las bandas restituidas sobre los planos o cartas de referencia del I.N.E.G.I., por lo que es necesario realizar correcciones geométricas de las imágenes de satélite respecto a las cartas geológicas y topográficas del I.N.E.G.I., antes de realizar cualquier inferencia interpretativa.

La carta topográfica, por su misma naturaleza, es la elegida para ser aquella que contenga, implícitamente, las referencias geométricas y de escalamiento geográfico. Por la razón anterior se hace necesario digitalizar las cartas del I.N.E.G.I.

Se dispone, en la mayoría de los paquetes de programas de cómputo (software) de dos técnicas de correcciones geométricas: lineal y splines cúbicos.

Por lo general, los datos de satélite están libres de distorsiones panorámicas y desplazamientos en el relieve topográfico, debido a la enorme altitud de vuelo y a lo reducido del campo de visión. Sin embargo, se observan algunas otras distorsiones geométricas que deben ser corregidas, entre sus causas se incluyen factores tales como: variaciones en la altitud, latitud y velocidad del satélite, así como al efecto combinado de la trayectoria del satélite y la rotación de la Tierra. Esto último, produce en cada barrido un desplazamiento ligeramente al Oeste respecto a la línea anterior, dando la apariencia de un paralelogramo alargado.

Estas distorsiones se corrigen analizando cierto número de puntos de control comunes tanto en la imagen satélite como en el terreno o en un mapa topográfico de detalle.

En el proceso se localizan varios puntos de control (se recomienda entre 5 y 10) en términos de sus coordenadas tanto en la imagen digital como en el mapa topográfico. A este conjunto de valores se les aplica un análisis de regresión por mínimos cuadrados para determinar los coeficientes para las dos ecuaciones de transformación que relacionan las coordenadas geográficas con aquellas de la imagen digital.

$$X = f_1(x,y)$$

$$y = f_2(X,Y)$$

Donde:

(x,y) son las coordenadas de la imagen digital.

(X,Y) son las coordenadas del mapa topográfico.

$f_1, f_2$  son las relaciones de transformación, pueden ser:

lineal, cuadrática, o splines cúbicos.

El resultado es una nueva imagen corregida geométricamente y que puede ser referida a coordenadas del terreno o topográficas.

Lo mismo sucede con las imágenes que sean obtenidas mediante otros procesos de análisis: visual o asistido por computadora, en donde los eventos interpretados se referirán a posiciones reales sobre la superficie de la Tierra y no a situaciones deformadas o desplazadas.

## **2.- Histograma de una imagen.**

El histograma de los valores de niveles de gris de una imagen, es una función que da la frecuencia de aparición de cada una de los 256 niveles de gris dentro de la imagen. La abscisa está representada por los niveles de gris que van desde 0 hasta 255. En la ordenada se grafica el número de píxels por cada uno de los niveles de gris, o bien puede representarse en porcentaje (número de píxels en cada nivel de gris entre el número total de píxels de la imagen). A partir del cálculo del histograma, se pueden calcular informaciones adicionales acerca de la población de niveles de gris de la misma imagen, es decir, se cuantifica la dinámica de la imagen, se calculan los estadísticos clásicos (media, mediana, moda, varianza, desviación estandar, etc.) y se realiza la graficación.

Observando el histograma producido a partir de cualquier imagen numérica, se encontró que muy pocos de ellos cubren la totalidad del rango de los niveles de gris, por ello es necesario usar métodos que hagan que se utilicen todos los niveles de gris contenidos dentro de una paleta de colores. Lo anterior se logra construyendo tablas de conversión, que relacionen la dinámica de la imagen con alguna paleta de color en especial. La relación más frecuente es la función lineal, aunque también se pueden usar funciones exponenciales, logarítmicas, iso-poblacionales, etc., en donde a cada nivel de gris de la imagen corresponde un color de la paleta elegida. Las operaciones anteriores son útiles cuando la imagen se presenta muy clara, oscura o tiene poco contraste.

## **3.- Cálculo de los estadísticos más relevantes.**

Se deben de calcular los estadísticos más relevantes, entre los que destacan los valores de: máximo, mínimo, media, mediana, moda, varianza, desviación estandar, número de clases, etc. No se describen estos conceptos por ser muy comunes dentro de la estadística.

#### 4.- Cuantificación de una imagen digital.

La cuantificación de una imagen digital es la partición del rango dinámico de sus píxeles en un cierto número de niveles discretos. Lo anterior está representado por alguna función valuada desde el valor 0 hasta el entero 255, donde la ordenada contiene el valor calculado de dicha función.

Lo anterior se logra construyendo tablas de conversión, que relacionen a la dinámica de la imagen con alguna paleta de color en especial, en general, dentro de los paquetes de programas de cómputo existen alrededor de 10 paletas diferentes con la opción de poder construir paletas personales. La relación más frecuentemente usada es la función lineal, en donde a cada nivel de gris de la imagen corresponde un color de la paleta elegida. Las tablas de conversión mencionadas son muy útiles cuando la imagen se presenta muy clara, muy oscura, o bien, tiene poco contraste.

Aunque la cuantificación lineal es la más utilizada y produce el despliegue de imágenes útiles, con frecuencia es necesario utilizar otros métodos de cuantificación, entre los más útiles mencionaremos los siguientes: iso - poblacional, logarítmico, exponencial, raíz cuadrada, lineal - dientes de sierra, gaussiano, combinación del iso - poblacional con los cinco anteriores; y aleatorio (donde los colores son elegidos al azar).

A toda la operación de cuantificación se le representa por una tabla de 256 valores llamada "tabla de codificación".

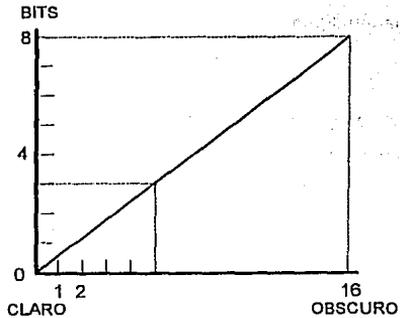


FIG. II.1 (BROOME, 1987)

### Cuantificación Lineal

El método más simple de cuantificación es el llamado "cuantificación lineal," para lo cual se requiere encontrar: los valores mayor y menor de la población de pixels, de tal manera que el rango dinámico de dicha población sea la diferencia entre los valores máximo y mínimo, luego se requiere dividir linealmente ese rango dinámico en el número de niveles de gris deseado para su posterior despliegue. Sin embargo, la población de un cierto intervalo de nivel de gris podría ser muy pequeña dando como resultado que en la etapa de despliegue, la imagen salga con pocos intervalos de nivel de gris y con detalles limitados.

La Fig II.1 muestra una distribución en la que en el eje vertical se tienen representados los datos convertidos a bits y en el eje horizontal la distribución en tonos de gris; en este caso se presentan unicamente 16 tonos. (Broome, 1987)

Una consideración importante cuando se decide formar una imagen a partir de un conjunto de datos, es dividir su rango dinámico entre un número discreto de niveles.

CUANTIFICACION.- La cuantificación de una función continua  $F$  dentro de  $N$  niveles, requiere el cálculo de los valores de frontera  $f(N+1)$  y  $f(1)$  del rango dinámico de los pixels. La función de probabilidad  $P(f)$  de la amplitud de  $f$  es:

$$\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} p(f)df = 1$$

Donde  $f_{\max}$  y  $f_{\min}$  son los valores máximos y mínimos de  $F$ . Un método simple para calcular los límites, es tomar  $f_{\min}$  como  $B(1)$  y  $f_{\max}$  como  $f(N + 1)$  y espaciar los otros valores linealmente entre esos dos extremos.

### Cuantificación Iso - poblacional.

Para este caso en especial se tiene que cada uno de los intervalos de clase o intervalos de nivel de gris contengan aproximadamente el mismo número de píxeles, es decir, para una imagen de 512 líneas por 512 columnas se tienen  $512 \times 512 / 16 = 16384$  píxeles para cada uno de los 16 intervalos de una paleta de 16 niveles de gris. Como se verá en las imágenes desplegadas, cuando se usa el tipo de cuantificación iso-poblacional el resultado visual se traduce en una misma repartición áreal por cada uno de los niveles de gris.

### Ecuación de Histogramas.

Aunque la cuantificación lineal produce un mapa aceptable, se puede demostrar que la más precisa representación de la función original  $F$  se obtiene cuando el tamaño del nivel de cuantificación  $B(i)-B(i-1)$  varía inversamente con la función de probabilidad  $P(i)$ . El método de ecuación, puede utilizarse para calcular aproximadamente estos niveles óptimos,  $Bec(i)$  para el caso discreto. Para determinar los  $N$  niveles óptimos para un juego de datos dado, primero se calculan los  $(N * 10) + 1$  Niveles límites  $B(j)$  usando el método lineal descrito, (Broome, 1987).

$$B(j) = \{(f_{\max} - f_{\min}) / N * 10\} * (j - 1); \quad 0 < j < (N * 10) + 1$$

El número de celdillas que caen en cada  $N * 10$  niveles,  $P_n(j)$ , debe entonces calcularse para tener la población acumulada de la rejilla  $C_n(j)$ .

$$C_n(j) = \sum_{i=1}^j P_n(i); \text{-----}(1)$$

Para una óptima presentación, un número igual de celdillas caé dentro de cada uno de los N niveles. Este número de celdas es:

$$Nec = N_{tot}/N$$

Donde N<sub>tot</sub> es el número total de celdillas en la rejilla.

La distribución acumulada óptima de puntos Cec(k) es:

$$Cec(k) = Nec * k; \quad 1 < k < N$$

Los N + 1 valores límites óptimos pueden determinarse encontrando los valores de C<sub>n</sub>(j) que corresponden a cada valor de Cec(k) y poniendo Bec(k) igual a B(j). El tamaño del multiplicador del número del nivel, fijado en 10 en este caso, determina que tan cerca de los valores límites e igualados serán los valores óptimos. El proceso de optimización del valor del límite ya descrito, produce un histograma plano, Fig 11.2, explicando el porque se le refiere comunmente como histograma ecualizado.

## 5.- Paletas de color.

Para la generación de una paleta de colores existen muchos factores que deben considerarse para su selección: número de colores y el rango dinámico. De esta manera, se obtienen pixels con igual tono de gris (o color) para valores iguales dentro de toda la imagen.

Teóricamente, al aumentar el número de niveles de gris, se mejoran los detalles del despliegue de la imagen digital, pero en la práctica, se ha observado que la mayoría de la gente no percibe mejoras significantes arriba de 64 niveles de gris dentro de la imagen, razón por la que se recomienda usar entre 16 y 64 niveles de gris.

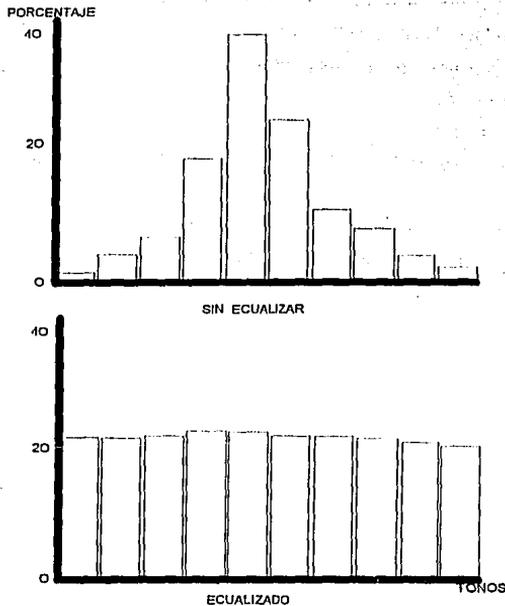


FIG II.2.- (HISTOGRAMAS)

Así, la paleta de colores, las características de los datos y los dispositivos de despliegue influyen en la selección del número óptimo de los niveles de gris.

Una vez elegida la paleta de colores se recomienda usarla para todas las bandas de la imagen con el objetivo de evitar confusiones en la interpretación de las mismas.

La paleta compuesta de 16 niveles de gris es la más usada en el despliegue de las imágenes impresas en papel para la presentación visual de resultados en este trabajo, pero debe quedar en claro que es posible producir el número de paletas de colores que se quiera. Como dato informativo, se tiene que el sistema CARTO tiene 12 paletas básicas de color.

Dentro de los paquetes de programas de cómputo para aplicar las técnicas del PNID, se encontró que existen alrededor de 10 paletas diferentes con la opción de poder construir paletas personales. Las más usadas para desplegar imágenes son las siguientes:

- a) 16 niveles de gris
- b) 32 niveles de gris
- c) arcoiris, se trata de 64 niveles de color degradando progresivamente: azul - verde-amarillo- naranja - rojo
- d) 32 niveles de color, degradando verde, rojo, o azul
- e) Degradación: blanco - amarillo - naranja - rojo - negro
- f) Aleatoria, los colores son producidos al azar, es muy útil para construir imágenes temáticas de pocos colores.
- g) binaria: blanco - negro
- h) paletas multiespectrales en falso color, para la combinación de dos o tres bandas.

La disponibilidad de éstas y algunas otras paletas depende fuertemente de la existencia de monitores y tarjetas de video de alta resolución. Un estandar comercial común es la versión llamada Super VGA con la cual se obtiene un despliegue estandar de 1024 por 768 pixels y la elección de 256 colores a partir de un millón de colores diferentes. Otra opción mejor pero más cara es la paleta de 16.3 millones de colores disponibles para monitores Mullisync que permiten un despliegue de hasta 2048 por 2048 pixels, con su respectiva tarjeta de video.

## **6.- Despliegue de una imagen digital.**

Para obtener el máximo beneficio, los métodos de despliegue de una imagen deben seleccionarse sobre la base de las características propias de los datos y de los objetivos del estudio.

Un tipo común de despliegue de una imagen es aquel donde la intensidad está codificada en falso color. Dicho despliegue es producido mediante la asignación de los diferentes colores de una paleta a cada pixel o celda de la matriz algebraica basados en una tabla denominada "tabla de codificación", la cual contiene los  $n$  intervalos de nivel de gris para el parámetro en estudio.

Cuando se le presenta el despliegue (en pantalla o en papel), de una imagen digital a una persona, inmediatamente la divide de una manera subconsciente, en regiones o zonas con niveles de gris (o colores) consistentes. Esta tendencia psicológica y otras características del sistema visual humano, pueden detectar cambios en un conjunto de datos o en una región de la imagen digital cuando se despliega la misma imagen con una diferente paleta de color.

### II.3.- TECNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMAGENES

Antes de aplicar cualquier procesamiento es necesario realizar una serie de tratamientos con miras al mejoramiento de la presentación de la imagen, así como poner en evidencia algunas regiones de interés.

La extracción de características tiene por regla hacer una descripción de la imagen compatible con la descripción de objetos contenidos dentro de la base de conocimientos, la cual se encuentra en la memoria de la computadora en forma de diccionario. Estas características van a depender del dominio de aplicación del procesamiento digital de imagen, dichos dominios pueden ser geofísicos, biomédicos, químicos, etc. En nuestro ámbito nos referimos únicamente a las primeras, en donde podemos encontrar imágenes de satélite, imágenes para los análisis de los recursos naturales, las que se utilizan para los estudios meteorológicos, y para la cartografía automática. El tipo de instrumentos usados para su obtención son radiómetros con rangos espectrales desde el visible hasta el infrarrojo, radares para ondas de un centímetro hasta 50 cm, magnetómetros con sensibilidades desde 5 hasta 100000 gammas, gravímetros, sismógrafos, etc. es decir, todos los instrumentos que caen dentro de los sensores remotos a grandes distancias entre la fuente de energía (o de los detectores) y los objetos de estudio.

Ahora bien, un sistema de procesamiento debe resolver el problema siguiente: partiendo de conceptos temáticos, de informaciones adicionales de la escena y de un conjunto de procedimientos de cálculo, transformar la imagen inicial con el fin de producir una imagen etiquetada o clasificada. Este sistema debe supervisar los procedimientos numéricos y dar como opciones una serie de posibilidades matemáticas e informáticas para llegar a la mejor estimación de la realidad según el esquema siguiente:

## IMAGEN INICIAL-----CONOCIMIENTOS-----INTERPRETACION.

Esta situación hizo que se culminara con la creación de una nueva rama de la técnica llamada "Procesamiento Digital de Imágenes Numéricas" (PDIN).

En la actualidad el PDIN tiene elementos propios de análisis que le permiten resolver diversos problemas de identificación de objetos y de anomalías por medio de un proceso de segmentación. La segmentación de una imagen es su partición en regiones teniendo propiedades específicas. El PDIN consiste en procesar matrices rectangulares (obtenidas en la etapa de adquisición) con miras a extraer la información útil, mediante una imagen portadora de una cierta información la cual será utilizada posteriormente. Dentro del PDIN existen tres grandes familias que son: (Hall, 1979)

a).- Las técnicas basadas en el concepto de contraste de la propiedad observada, entre el objeto y su medio ambiente. Podemos mencionar como ejemplos los siguientes métodos: filtros lineales (pasa-banda, gradiente, laplaciano, etc.), filtros morfológicos (dilatación, erosión, esquelización, etc.), filtros no lineales (mediana, moda, combinaciones aritméticas, etc.). Transformaciones diversas (Fourier, Z, Laplace, Hilbert, Hadamard, etc.) y tratamientos diversos (histogramas, recodificación, correcciones geométricas, tablas de color, segmentación, etc.). Estas técnicas también son llamadas de detección de contornos y están basadas en la búsqueda de discontinuidades significativas que caracterizan a las regiones por sus fronteras y por otro tipo de líneas tales como: líneas de valles y cimas.

b).- Las técnicas basadas en el concepto de respuesta espectral en el espacio de canales, llamadas también técnicas multiespectrales. Entre estas técnicas podemos citar las siguientes: Las técnicas de análisis multivariable (Métodos Factoriales, Componentes Principales, clasificación Hash, Nubes Dinámicas, etc.) y los métodos estadísticos (Método de Gauss, Método de Bayes, Imágenes en falsos colores, etc.).

c).- Los métodos basados en el concepto de textura. Describen el grado de homogeneidad de una superficie, basándose en aspectos pseudo-aleatorios de la imagen. Se utilizan

técnicas tales como la entropía, los coeficientes de correlación, la matriz de concurrencia, la función semivariograma, etc.

El resultado de esta etapa, está representado por una imagen temática, cabe mencionar que en el seno del proceso de elaboración de esta imagen temática a partir de los datos de una imagen inicial, las diferentes etapas del PDIN y la interpretación están ligadas estrechamente.

La visualización de una imagen en un monitor a color, es un elemento importante dentro de cualquier sistema de procesamiento de imágenes. Se trata de una interfase con nuestra percepción visual cuya subjetividad queda fuera de discusión. La visualización de una imagen monocromática en falsos colores o en niveles de gris, pueden conducir a interpretaciones visuales diferentes, el problema se acentúa cuando el equipo de cómputo y en especial las capacidades del monitor a color no pueden restituir todas las informaciones contenidas dentro de una imagen. Por ejemplo, una imagen codificada en 256 niveles, necesita de un monitor capaz de representar esos 256 niveles o matices sobre la pantalla con el fin de evitar pérdidas de información, se trata de una situación difícil de encontrar en una computadora personal, pero con la aparición en el mercado de las pantallas Super-VGA, los problemas se minimizan, así, la paleta con 16 niveles de gris es muy utilizada.

El reconocimiento de patrones en el marco del tratamiento digital de imágenes generalmente está referido a la extracción automática y clasificación de las características o eventos de una imagen digital, señales electrónicas, o resultados de un muestreo sistemático. En estudios geológicos, el reconocimiento cualitativo de patrones o formas es efectuado por un especialista en Ciencias de La Tierra, quien con su conocimiento y experiencia, propone un modelo geológico. Para la evaluación de carácter cuantitativo, se requiere desarrollar e implantar procesos específicos en computadoras digitales.

### II.3.1.- TECNICAS DE CONTRASTE

La aplicación de estas técnicas se basa, fundamentalmente, en el análisis de la reflectancia o respuesta espectral de los diferentes objetos existentes en la superficie. Los datos más comunes son del tipo denominado MSS (Multispectral Scanner) y TM (Thematic Mapper).

En formato digital, una imagen puede concebirse como una matriz de números que refieren un valor de reflectancia; una vez transformados, estos valores permiten generar una imagen: Cada número es adjudicado a una celda o elemento de escena, PIXEL, cuyas dimensiones en el terreno definen la resolución espacial de la imagen. Así el valor de cada celda en una imagen, representa la cantidad de radiación que llega al sensor, desde los objetos.

El procesamiento o tratamiento digital de imágenes consiste en manipular adecuadamente los valores de reflectancia en tres etapas relacionadas entre sí: el preprocesamiento que implica las correcciones radiométricas y geométricas; el realce o mejoramiento y; la clasificación.

Una parte importante del preprocesamiento es la geo-referenciación o asignación de coordenadas a la imagen. Este proceso es de particular importancia en el contexto de un sistema de información, dado que las coordenadas asignadas a la imagen son el medio de comunicación con el resto de la información espacial que integra el sistema.

El realce de imágenes consiste en aplicar una serie de técnicas para mejorar la apariencia visual de dicha imagen. Dos de los procesos de realce más comunes son la ampliación del histograma y el filtrado de imágenes. También es posible realizar operaciones aritméticas de los valores contenidos en diferentes bandas espectrales; sumas, restas y cocientes se utilizan comúnmente para la obtención de información específica.

La clasificación multiespectral consiste en el agrupamiento de objetos con semejantes respuestas espectrales. Una clasificación espectral implica la segmentación del paisaje con base a la respuesta espectral de su cobertura. Esta información temática inferida es comúnmente el objetivo central cuando se analizan imágenes para estudios de prospección de recursos naturales y ambiente.

Una clasificación espectral puede realizarse tanto en forma manual como automática, asistida por computadora (generalmente referidas como clasificación visual y digital, respectivamente). En el ámbito digital, y de acuerdo con la forma en que se construyan las clases espectrales, pueden realizarse clasificaciones supervisadas, no supervisadas o una combinación de ambas, denominada a esta última clasificación híbrida.

En el primer caso, se toman muestras representativas de objetos conocidos, según pruebas de campo o fotografías aéreas, presentes en la imagen, tratando de cubrir toda la variabilidad espectral de la escena. En el segundo caso, las muestras se generan en forma automática, mediante técnicas de agrupamiento (clustering). En esta instancia, los atributos de las clases (es decir, su contenido informativo) son designados posteriormente. Una vez definidas las clases espectrales se realiza la clasificación propiamente dicha, es decir, cada elemento de escena (pixel) es adjudicado a la clase probable más afín. La disponibilidad de información de campo es crítica en la elaboración y evaluación de la clasificación.

Las clasificaciones espectrales obtienen diferentes resultados en cuanto a la fidelidad y exactitud con que reproducen la realidad que modelan o simulan.

### II.3.1.1.- ILUMINACION ARTIFICIAL

El despliegado de datos geofísico-geológicos mediante imágenes en tonos de gris y el uso de procesos cuyo objetivo es el de filtrar datos utilizando las técnicas de la transformada rápida de Fourier, han demostrado facilitar el proceso de interpretación Geofísica, y más cuando dichos procesos se realizan en forma interactiva. Los resultados bajo la forma de imágenes digitales son desplegados en la pantalla del computador en diferentes colores o en diferentes tonos de gris, pero también se pueden obtener en impresiones en papel lo cual hace más confiable su interpretación. La técnica de iluminación artificial es especialmente favorable para realzar altas frecuencias que pueden estar relacionadas con patrones geológicos importantes.

Las imágenes con iluminación artificial son útiles para resaltar anomalías con alto número de onda, ya que los contrastes máximos ocurren cuando la dirección de iluminación es normal a la dirección de las estructuras geológicas generadoras de las anomalías.

Se trata de una efectiva técnica de realzado de contrastes, que crea la apariencia de una superficie topográfica iluminada en una dirección y con un ángulo sobre la vertical dados. Las imágenes iluminadas con estas características pueden proporcionar a la interpretación integral, mejores señales y lineamientos de los patrones estructurales de los datos, mejorando la calidad que proporcionan las imágenes desplegadas únicamente en tonos de gris o en color.

La "reflectancia" de una superficie es una medida del porcentaje de iluminación que es reflejada, dadas ciertas condiciones (intensidad, elevación y azimuth), relativas a una fuente de iluminación y dado el hecho de que un observador se encuentre a una cierta distancia de la superficie para poder detectar los efectos ocasionados por esa excitación al sistema.

La brillantez aparente de una superficie depende de la relación existente entre la elevación y el azimuth de la fuente de iluminación y la pendiente de todos los pixels que componen la superficie. Así, la máxima brillantez ocurre cuando la dirección (elevación y azimuth) de la iluminación y la inclinación local de un pixel de la superficie son normales; y la mínima ocurre cuando son paralelas.

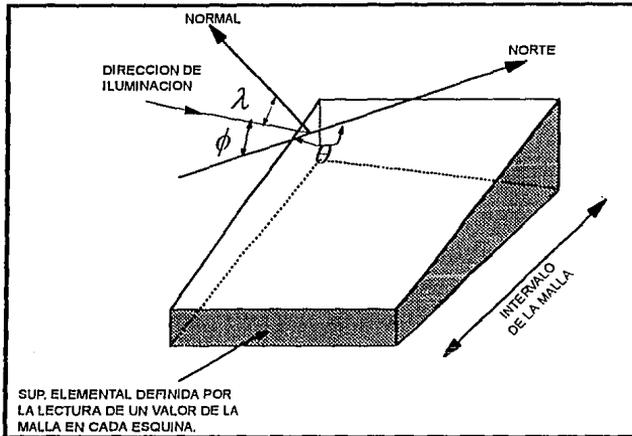


FIG.II.3 (HORN Y BACHMAN, 1978)

El algoritmo básico lo describieron Horn y Bachman (1978); el cual se ilustra en la fig.II.3, donde se considera que cada pixel representa una superficie elemental básica. Si X y Y representan los dos ejes horizontales (direcciones geográficas Este-Oeste y Norte-Sur respectivamente), y Z representa la intensidad de un parámetro, entonces el gradiente puede ser estimado utilizando la función de primera derivada como sigue:

$$P = \partial Z / \partial X \quad \text{-----} \quad Q = \partial Z / \partial Y$$

El vector normal a dicha superficie básica tiene como componentes:

$$(-P/W, -Q/W, 1/W)$$

Donde:

$$W = (P^2 + Q^2 + 1)^{1/2}$$

En el caso de que las direcciones de la superficie elemental y de la iluminación estén dadas por la pendiente  $\theta$  y la declinación  $\Phi$  respectivamente, entonces el vector que va de la superficie elemental a la fuente de iluminación tendrá como dirección:

$$(\cos \theta \cos \phi, \sin \theta \cos \phi, \sin \phi)$$

Por lo tanto, el coseno del ángulo  $\lambda$  entre los dos vectores mencionados, está dado por el producto escalar:

$$\cos \lambda = (-P \cos \theta \cos \phi - Q \sin \theta \cos \phi + \sin \phi) / (P^2 + Q^2 + 1)^{1/2}$$

Dado que no se requiere calcular con precisión el efecto de una fuente sobre una superficie real, entonces se pueden hacer simplificaciones entre el ángulo  $\lambda$  y la intensidad recibida por un observador que se asume está a gran distancia y normal al plano XY, sobre el centro geométrico de la imagen. Se supone que cada superficie elemental de la imagen se comporta como un difusor ideal.

Bajo las suposiciones hechas se tiene que el  $\cos \lambda$  es proporcional a la brillantez. En otras palabras, al desplegarse una imagen digital iluminada, la brillantez en cada pixel es directamente proporcional al coseno del ángulo entre la pendiente del pixel y el vector que apunta desde el centro geométrico del pixel a la fuente de iluminación:

$$\text{REFLECTANCIA} = \cos \lambda$$

Este es uno de los modelos más simples, pero produce buenos resultados con las imágenes de este trabajo.

La amplitud de la "reflectancia" está determinada por el gradiente propio de la superficie asociada a la imagen. Además, considerando la imagen iluminada en su conjunto, las anomalías locales de alto número de onda se realizan mucho mejor que aquellas con bajo contenido de números de onda, esta es una ventaja decisiva sobre los mapas de curvas de nivel ya que en altos gradientes se pierden algunas curvas que podrían ser importantes al analizar las anomalías; así como a las formas y a las extensiones geométricas de los cuerpos que generan dichas anomalías.

### **II.3.1.2.- FILTRADO**

Cuando hablamos de las técnicas basadas en el concepto de contrastes de la propiedad observada, entre el objeto y su medio ambiente, se mencionó los métodos en los que los filtros tienen una especial relevancia; estos son: filtros lineales (pasa-banda, gradiente, laplaciano, etc.) filtros morfológicos (dilatación, erosión, esqueletización, etc.) y los filtros no lineales (mediana, moda, combinaciones aritméticas, etc.). Al procesarse las imágenes con los diferentes programas o paquetes de cómputo, dan la oportunidad de aplicarles dichos filtros que mejoran la presentación de las mismas, estos filtros se aplican tanto en el dominio del espacio como en el de números de onda; para mayor información de la aplicación de dichos filtros remitase al anexo C de este mismo trabajo.

### **II.3.2.- ANALISIS MULTIVARIABLE**

En este trabajo se ha considerado el análisis de datos consistente en la medida de solo una variable en cada observación; también se tomó en cuenta la influencia de las coordenadas geográficas o temporales de los puntos muestreados, más sin embargo es necesario examinar las técnicas para el análisis de datos multivariantes debido a las distintas variables que caracterizan cada observación. Los métodos multivariantes nos permiten considerar cambios en las distintas propiedades simultáneamente, lo cual es útil en geología en donde las variables pueden considerarse relacionadas unas con otras en la mayoría de los casos; como son: los porcentajes de composición, la profundidad, la densidad, el magnetismo, el relieve, etc.

El método multivariante es muy poderoso ya que permite la investigación para manipular más variables que se puedan asimilar por sí mismas. Sin embargo es un método complicado en su estructura teórica y en su metodología operacional.

Para muchos de los procedimientos se requiere de la teoría Geostadística. Se ha probado en trabajos restringidos, obteniéndose resultados alentadores pero en otros los resultados son bien conocidos, llegando a calificarlos como sobresalientes, por ello hemos escogido esta técnica para manipular nuestra gran cantidad de datos y así poder representar una sola imagen que nos sirva de apoyo en nuestra interpretación, desde luego estamos considerando la importancia de cada

disciplina involucrada con un peso que podría ponerse a discusión en un momento determinado, pero en lo general los resultados obtenidos y mediante la participación de una infinidad de pruebas y la invaluable experiencia en el conocimiento del área nos da la razón para considerar como buenos dichos resultados.

También estamos considerando algunos procedimientos que no tienen bases estadísticas teóricas ya que siguen en el proceso de evaluación. No obstante se ha visto que estos métodos son los más promisorios en la investigación geológica.

Sin querer profundizar, únicamente señalaremos los aspectos teóricos sobresalientes aplicables a nuestro trabajo.

#### II.3.2.1.- REGRESION MULTIPLE.

La modificación que estamos considerando consiste en la eliminación de la restricción que nos limita al considerar cambios como una función de distancia o mediante coordenadas espaciales, pero además se pueden considerar variables que están en función de otras variables medidas en las mismas posiciones. Por ejemplo: los cambios de densidad entre dos lecturas consecutivas, pueden deberse a cambios geológicos, ya sea estructurales o sedimentarios, lo cual no deja de estar relacionado con la topografía del área así como con el magnetismo de probables rocas ígneas extrusivas o intrusivas, también la profundidad de los diferentes cuerpos causantes de las anomalías. Esto sin dejar de pensar en los contenidos de humedad provocados por agua así como por posibles yacimientos de hidrocarburos.

En realidad tenemos medidas de variables, en forma directa o indirecta, lo cual es necesario aprovechar para conjuntar ideas reales del problema que queremos resolver; en un sentido, las variables pueden ser consideradas como coordenadas espaciales, y nosotros podemos imaginar cambios ocurridos a lo largo de una dimensión definida por una variable tal como la densidad.

Estamos substituyendo la escala espacial en el ploteo por la escala original con la cual fueron medidas las variables. Semejante intercambiabilidad está explícito en lo referente a "ESPACIO P-DIMENSIONAL", lo cual abunda en la literatura de Análisis Multivariable. Así como las superficies de tendencia son una generalización de los procedimientos de las curvas apropiadas para espacio de dos dimensiones, la regresión múltiple es una nueva generalización de espacio para muchas dimensiones relacionadas para una o dos.

En éste trabajo no se considerará la Regresión Múltiple en gran detalle (no es el objetivo), por lo que sólo presentaremos la ecuación que la representa (teniendo una variable independiente), y una breve descripción de la misma aplicada a un ejemplo y a nuestro problema en particular.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_1^2 + \dots + \beta_m X_1^m + \epsilon$$

El modelo para una observación Y es igual al término de una constante más una serie de potencias de una variable independiente más un rango de error.

Las raíces solución de la ecuación lineal de este tipo puede ser encontrada mediante la solución de una ecuación normal para los coeficientes  $\beta$ . Estos pueden ser expresados en forma matricial como:

$$[\sum X] \cdot [\beta] = [\sum Y]$$

Con una solución:

$$[\beta] = [\sum X]^{-1} \cdot [\sum Y]$$

Donde  $[\sum Y]$  es una columna de la matriz (de la suma de los cuadrados y producto cruz de Y con  $X_1, X_1^2, \dots, X_1^m$

$[\sum X]$  es una matriz de la suma de los cuadrados y producto cruz de las fuerzas  $X_1, X_1^2, \dots, X_1^m$

$[\beta]$  es una columna matriz de coeficientes desconocidos.

Aunque nosotros observamos este problema complicado (solo una variable independiente o dos en el caso del análisis de superficies), podemos, sin embargo reescribir la ecuación modelo de (M) variables independientes así:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon \quad (11.1)$$

Y define las variables como:

$$X_1 = X_1, \quad X_2 = X_1^2, \quad X_3 = X_1^3, \quad \dots \quad \text{Y así sucesivamente.}$$

Así, de esta manera el procedimiento de regresión considerado tiende a simplificar la complicada definición de la variable independiente en una manera específica.

La regresión de M variables independientes sobre una variable dependiente, puede ser expresada como en la ecuación (11.1). La ecuación normal cuya solución podría ser encontrada etiquetando apropiadamente los renglones y columnas de la ecuación dada por la matriz multiplicada cruzadamente, encontrándose las entradas en el cuerpo de la matriz.

Para tres variables independientes tendríamos:

$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y$
$X_0$			$b_0$	
$X_1$			$b_1$	
$X_2$			$b_2$	
$X_3$			$b_3$	

Donde  $X_0$  es una variable ficticia = 1 para muchas observaciones.

La ecuación matriz antes de la crossmultiplicación es:

$$\begin{array}{ccccccc}
 n & \dots & \sum X_1 & \dots & \sum X_2 & \dots & \sum X_3 & \dots & b_0 & \dots & \sum Y \\
 \sum X_1 & \sum X_1^2 & \sum X_1 X_2 & \sum X_1 X_3 & b_1 & \sum X_1 Y \\
 \sum X_2 & \sum X_2 X_1 & \sum X_2^2 & \sum X_2 X_3 & b_2 & \sum X_2 Y \\
 \sum X_3 & \sum X_3 X_2 & \sum X_3 X_2 & \sum X_3^2 & b_3 & \sum X_3 Y
 \end{array}$$

Las  $\beta$ 's en el modelo de regresión están estimados por los b's (coeficientes de las muestras de la regresión parcial) llamada así porque esta dada una velocidad de cambio en la variable dependiente por una unidad de cambio en particular de la unidad independiente. Suministrando a todas las otras variables independientes constantes. Algunos libros de estadística enfatizan este punto usando la notación:

$$Y = b_0 + b_{1.23} X_1 + b_{2.13} X_2 + b_{3.12} X_3 + \varepsilon$$

El coeficiente  $b_{1.23}$  por ejemplo es leído como: "coeficiente de regresión de la variable 1 en Y, así como las variables 2 y 3 permanecen constantes. En general este coeficiente diferirá del coeficiente de regresión total porque es una simple regresión individual de cada variable X en la variable Y. La regresión múltiple considera todas las posibles iteraciones dentro de las combinaciones de las variables así como las variables entre si mismas.

En conclusión el problema por resolver consiste en determinar la influencia de todas las variables en una o dos, para ello se utilizan una serie de programas de computadora que tienen por objetivo obtener rápidamente las sumas de los cuadrados de las variables (regresión CV), las

sumas de las desviaciones (SD) y las sumas totales, así como la media de dichos cuadrados, la aplicación de la fórmula (ecuación normal) y la solución de la misma para obtener valores de influencia y así poder decidir la aplicabilidad de tal o cual variable en el desarrollo del trabajo.

### II.3.2.2.- ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.

En el desarrollo y/o adaptación de técnicas especiales del tratamiento digital de imágenes, se ha establecido implantar la transformación obtenida por la descomposición de Valores Singulares y de diversas técnicas del preprocesado y mejoramiento del tratamiento digital de imágenes. (Anexo B).

### ASPECTOS GENERALES.

El análisis de componentes principales, varianles y equivalencias, está ampliamente difundido: Mather (1976) lo presenta con carácter estadístico y Gonzalez y Winz (1977) desde el punto de vista del procesamiento digital de imágenes.

La idea de utilizar la transformación de Karhunen-Loeve (Anexo-B), no es reciente. En el análisis de imágenes, Andrews y Patterson (1975), Huang y Narendra (1975), y Hunt y Kubler (1984), aplicaron la técnica en la codificación, realces y restauración: Y Ahmed y Rao (1975) en la compresión de imágenes.

Las aplicaciones del tratamiento de imágenes a datos de campo potenciales y su integración geológico-geofísico, son más restringidas: siendo importante citar a Kwarteng, y Chavez, (1990), quienes efectuaron aplicaciones específicas en el análisis, procesado e integración de datos para el desarrollo de un modelo de exploración.

## FUNDAMENTOS INVOLUCRADOS.

Desde el punto de vista del tratamiento de imágenes, la técnica de reconstrucción de Karhunen-Loeve o Transformación de Componentes Principales, puede ser descrita en el marco de la Transformación obtenida de la descomposición de valores singulares, y se establece la relación entre ellas.

La transformación discreta de Karhunen-Loeve, aísla una o varias componentes espectrales que conforman un campo geofísico observado. El proceso corresponde a una transformación lineal, cuyos vectores de base no son constantes como ocurre en otras transformaciones similares. Los vectores de base están determinados por las características estadísticas de los datos.

El análisis de la configuración o representación en formato vector del campo en estudio, permite una explicación e interpretación de carácter cualitativo de la información; análisis que a su vez permite la identificación de áreas anómalas representativas que quedan determinadas en planta por una matriz de orden  $(n,m)$ .

Para la aplicación de Análisis de Componentes Principales, de los datos del área seleccionada, se estima la matriz varianza-covarianza de orden  $(n,n)$ , en la que implícitamente están incorporadas las características estadísticas propias de los datos. De la matriz varianza-covarianza se calculan los autovectores y autovalores correspondientes, y se grafica la magnitud relativa de estos últimos, en función de su índice de posición.

De la gráfica de la magnitud relativa de los autovalores, en función del índice de posición, se adopta el porcentaje que determinará el número de componentes principales que intervendrán en la reconstrucción.

Del número de autoimágenes estimadas necesarias y convenientes en la reconstrucción, posterior a la proyección de los datos en el sistema ortogonal, definido por los

autovectores de la matriz varianza-covarianza o matriz de Karhonen-Loeve, se efectúa la reconstrucción propiamente dicha.

A partir de la reconstrucción de la imagen se procede a su vectorización o rasterización y despliegue y/o configuración.

### DESCOMPOSICION DE VALORES SINGULARES.

La aplicación de la Transformación de Descomposición de Valores Singulares, queda establecida en los siguientes pasos.

- 1.- Análisis cualitativo del campo anómalo.
- 2.- Identificación de las anomalías representativas.
- 3.- Selección de cierta área de interés preferentemente de retícula completa.
- 4.- Determinación de la matriz de datos de orden [X].
- 5.- Cálculo de la matriz de autovectores [U] y [V].
- 6.- Graficación de la magnitud relativa de los autovalores en función del índice de posición.
- 7.- Determinación :

$$[X \hat{A}] = [U][U]^T [X]$$

$$[X \hat{A}] = [X] [\hat{A}] [V]^T$$

Y reconstrucción [X  $\hat{A}$ ] de la matriz de datos [X].

- 8.- Vectorización o Rasterización de la Imagen.
- 9.- Graficación.

La naturaleza de componentes principales y la Transformación obtenida por la descomposición de Valores Singulares, han probado ser, dentro de las limitaciones propias de cálculo numérico, esencialmente equivalentes.

El efecto predominante de las altas frecuencias (altos números de onda) se hace más notorio a medida que se considera un orden mayor de la autoimagen (magnitud relativa de los valores singulares y autovalores decrecientes, posición creciente). Un estudio sistemático de las subáreas de interés es necesario para discriminar la aplicación adecuada de las técnicas presentadas.

La utilidad de la aplicación de las técnicas establecidas y usuales del procesado digital de imágenes, facilitan el tratamiento y presentación de la información geofísica y permiten en principio, una correlación e interrelación entre fuentes diversas de información.

La correlación temática significativa entre las variables físicas en los campos involucrados, se efectúa por el análisis y establecimiento de interrelación en formato raster, de ciertas medidas geométricas, respuestas espectrales, texturas y formas, así como espaciales. Correlación significativa que permite en principio la diferenciación de los factores característicos predominantes.

En conclusión, el análisis de componentes principales, que constituyen una generalización de la Teoría del Filtrado Lineal, es equivalente a la Transformación obtenida de la Descomposición de Valores Singulares.

Dentro de la etapa de análisis e interpretación geofísica, la incorporación de información cualitativa complementaria a la deducible en el procesado convencional, se puede obtener mediante la aplicación de las técnicas comunes del tratamiento digital de imágenes y de sus poderosos recursos de despliegue y mejoramiento.

La representación de información geofísica en formato raster, permite preservar relativamente el contenido de altas frecuencias en contraposición de las representaciones convencionales tipo vector.

La integración de datos geofísicos a otros niveles de información, geológica, geoquímica, geográfica, etc., pueden proporcionar conceptos realistas adecuados para la interpretación y evaluación de áreas de interés económico petrolero potencial.

La correlación geológica estructural permisible con la generación viable de imágenes compuestas hacen del tratamiento digital de imágenes una herramienta complementaria y útil en la interpretación e integración de datos geofísicos y geológicos.

### **II.3.3.- ANALISIS VISUAL ASISTIDO POR COMPUTADORA PERSONAL.**

La metodología para la obtención de información geológica a partir de datos observados por percepción remota se realiza mediante la misma secuencia lógica y los mismos argumentos que emplea un geólogo cuando realiza trabajos de reconocimiento o de detalle en el campo, en particular, en la etapa de fotogeología. Se comienza por describir la siguiente secuencia de actividades:

- Definición del problema
- Recolección y síntesis de datos
- Análisis e Interpretación

La separación existente entre las partes concernientes al Análisis y la Interpretación de Imágenes Digitales se debe a que son etapas muy diferentes entre sí, ya que se confunden en muchos casos.

El Análisis de una imagen digital se define simplemente como la separación de cualquier todo en sus partes elementales. Cuando se habla de los datos existentes en el interior de una imagen, sólo se hace referencia a los aspectos numéricos de dicha imagen: estadísticos, histogramas, áreas, perímetros, comportamiento espectral, formas geométricas de objetos, etc.

La interpretación de una imagen digital es la explicación del significado físico, biológico o cultural de cualquier parte respecto al todo. Según sea, la definición del problema o la aplicación práctica de los datos del sensor remoto, la interpretación relaciona los resultados obtenidos mediante la etapa del Análisis con conceptos derivados de un dominio en particular, como la geología. En este caso los aspectos numéricos de la imagen, contienen una explicación adicional por parte de la geología. Los patrones espectrales y geométricos de los datos del sensor remoto sirven para diferenciar y detectar objetos geológicos.

La presentación con más utilidad de datos observados y registrados por percepción remota para análisis e interpretación geológica es mediante el despliegue de imágenes. Las relaciones radiométricas y espaciales de los datos de percepción remota pueden ser correlacionadas con las condiciones existentes sobre la superficie del terreno.

El análisis y la interpretación visual de los datos observados e impresos fotográficamente por medio de sensores remotos, es suficiente para muchas aplicaciones, sin embargo existen pequeños detalles importantes dentro de la imagen, los cuales no se pueden observar directamente, sobre todo si se trata de imágenes monocromáticas, ya que el ojo humano puede discriminar únicamente entre 8 y 16 tonos de gris al interpretar fotografías impresas, mientras que las imágenes digitales contienen hasta 256 tonos de gris, en consecuencia, existe una mayor cantidad de información de la que el interprete pueda extraer visualmente, lo anterior se logra utilizando el análisis visual asistido por computadora.

A partir de una impresión fotográfica de una imagen digital (monocromática o multispectral), es posible extraer una cierta cantidad de información, sin embargo, el análisis visual asistido por computadora aumenta las posibilidades de extraer aún más información ya que se pueden realizar varias funciones en tiempo real, por ejemplo, experimentar con varios algoritmos de contraste o varias paletas de color.

## PASOS PARA REALIZAR EL ANALISIS VISUAL ASISTIDO POR COMPUTADORA

- 1) Realizar todo el conjunto de preprocesos: correcciones geométricas, estadísticos, histogramas, cuantificación, paletas de gris y despliegue.
- 2) Probar todas la tablas de codificación, existentes dentro del paquete de programas, para el despliegue del mejor contraste entre los objetos contenidos en la imagen.
- 3) Realizar una versión impresa de la imagen usando la mejor tabla de codificación, elegida en el paso 2.
- 4) Revisar los objetivos del estudio, y elegir los algoritmos del PNID a aplicar. O bien, realizar un reconocimiento de formas superponiendo un acetato sobre una imagen impresa y posteriormente dibujar los objetos discernibles (cuerpos de agua, tipos de roca, rasgos geomorfológicos, etc.).
- 5) Realizar inferencias interpretativas desde el monitor de la computadora personal o desde el acetato dibujado a mano en el paso 4, auxiliándose de otro tipo de informaciones de la misma zona y de un cursor de ratón para registrar manualmente los trazos que se consideren convenientes y queden grabados en una imagen temática.

Una de las líneas actuales de investigación en el PNID trata de reproducir los mecanismos de análisis del ojo humano, enfocándose en la búsqueda e identificación de rasgos de interés. Se trata de la interpretación automática y se basa en el reconocimiento de formas a través de la distribución de tonalidades, tamaños, texturas, patrones, sombras, ubicaciones y asociaciones de objetos. A pesar de que la interpretación manual involucra la combinación simultánea de muchos elementos básicos de análisis y síntesis de varios dominios (fotogeología, morfología, litostratigrafía, etc.), es decir, se debe de poseer una preparación, conocimiento y experiencia del área de estudio, además de realizar un buen trabajo de equipo con otras disciplinas. Sin embargo, como se verá en la etapa de aplicaciones, aún con la utilización de algoritmos sencillos, es posible realizar inferencias interpretativas a partir de una imagen procesada.

## ALGORITMOS PARA REALIZAR EL ANALISIS VISUAL ASISTIDO POR COMPUTADORA

Todos los paquetes de programas consultados en relación al PNID, contienen un módulo de dibujo sobre la pantalla del monitor de la computadora personal y teniendo como "fondo" una imagen digital (monocromática o en falsos colores) de referencia. Los objetos de interés contenidos en la "imagen de referencia" pueden ser considerados como cuerpos o elementos geométricos y pueden delinearse por medio del cursor de un ratón y ser grabados permanentemente dentro de otra imagen, llamada "imagen temática" o "imagen visualmente clasificada".

Los elementos geométricos son de tres tipos: polígonos rellenos con algún color, líneas quebradas y puntos aislados; el primer tipo se puede aplicar a la cartografía de cuerpos de agua, tipos de cubierta vegetal, litología, etc.; el segundo a la detección de carreteras, líneas de parteaguas, contactos entre formaciones, líneas de drenaje, etc. y; los últimos a la localización de pozos, picos de montañas, poblados pequeños, manantiales, estaciones de ferrocarril, etc.

La aplicación más frecuente de estos algoritmos es la realización de cartas numéricas temáticas, mediante la adaptación de técnicas de fotogeología, consideradas clásicas.

El uso de estos algoritmos requiere de un ratón de manera indispensable, así como de una imagen de fondo sobre la cual se van a seguir los trazos.

El procedimiento es como sigue:

- 1.- Lanzar el programa de cartografía de polígonos.
- 2.- Desplegar la imagen de referencia, considerada como "fondo".
- 3.- Elegir el nombre de la imagen temática en donde se registrarán los polígonos rellenos de color, líneas quebradas y puntos. Dicha imagen puede contener información registrada con anterioridad, por lo que en este caso sería una sesión de actualización.

4.- Seguir el dialogo del algoritmo, el cual es muy similar en los paquetes consultados:

Dar el código para los polígonos (entre 0 y 255), dicho valor sirve para identificar la clase de dichos polígonos, también es el valor elegido correspondiente a un color para rellenarlos. Adicionalmente se pide el nombre para identificar a dichos polígonos, clases u objetos.

Comenzar el procedimiento correspondiente al ratón, el cual consiste en marcar por medio del cursor y del botón izquierdo del ratón, un punto inicial, posteriormente se eligen los puntos restantes que conforman a un objeto en particular, para el caso de líneas y puntos no hay problema porque pueden empezar y acabar en cualquier sitio de la imagen, pero en el caso de polígonos rellenos se debe seguir un circuito cerrado. Cuando se decide acabar con la detección de un objeto, se debe desplegar un dialogo en donde se decida que: el objeto sea polígono, línea quebrada o puntual; se hagan correcciones; se anule la sesión o; se salve la comida. Cuando se ha terminado la sesión para un polígono, el dialogo con el algoritmo continúa ya sea con otro polígono con el mismo código, o bien con otro diferente.

5.- Todos los pasos anteriores se repiten hasta llegar a una imagen llena de formas geométricas. El procedimiento descrito imita el dibujo a lápiz tradicional, sólo que en esta ocasión se realiza con el ratón en sustitución del lápiz y de la pantalla en reemplazo del acetato transparente.

Una segunda aplicación de estos algoritmos es el apoyo a una clasificación supervisada, en donde los polígonos cartografiados pasan a la calidad de "campos de entrenamiento", ya que la selección de dichos campos es una premisa indispensable para un método de clasificación supervisada. Así, los valores de los pixels contenidos dentro de cada campo de entrenamiento e implícitamente asociados a cada clase de objetos se utilizan para evaluar los parámetros estadísticos (media y varianza de cada clase, más la matriz de covarianzas) del clasificador.

Previo a la redacción de este trabajo se encontraron muy pocas publicaciones en la literatura acerca de análisis visual de imágenes digitales, tanto en forma manual como en aquella asistida por computadora, para prospección petrolera.

#### **II.4.- ANALISIS DE PAQUETERIA DE SISTEMAS DE PROCESAMIENTO NUMERICO DE IMAGENES DIGITALES, UTILIZADOS MAS FRECUENTEMENTE Y BASANDOSE EN COMPUTADORAS PERSONALES.**

Una vez que las imágenes observadas se encuentren corregidas tanto geométrica como radiométricamente, es posible analizarlas empleando algún Sistema de Procesamiento Numérico de Imágenes Digitales (SPNID), ya sea: para visualizar o desplegar imágenes en pantalla de computadora; para extraer información significativa de acuerdo a los objetivos del estudio; o bien para obtener una nueva imagen la cual contenga una cierta información que será utilizada posteriormente por otro algoritmo.

Todo lo anterior requiere del analista un entendimiento de las características fundamentales de los Sistemas de Procesamiento Numérico de Imágenes Digitales, existentes en México.

Se encontró información general acerca de los siguientes Sistemas de Procesamiento Numérico de Imágenes Digitales:

PIXSAT, ILWIS, SANDY, TRMAPPER, ERDAS, CARTO, IMAGE y SPIPR.

A continuación se presenta una lista de las principales características de los ocho sistemas analizados:

PAQUETE	PROPIETARIO	COSTO APROX. N\$	EQUIPO
PIXSAT	Inst. de Geograf. Geosonda S.A:	N\$ 10,000.00	PC/AT 386 SuperVGA
ILWIS	I.T.C. de Holanda	N\$ 10,000.00	PC/AT 386 SuperVGA
SANDI	Inst. de Geof.	N\$ 10,000.00	PC/AT 286 VGA
TRMAPPER	Australia	N\$ 75,000.00	SUN Sparcstation
ERDAS	N. A. S. A.	DLS.100,000.00	SUN-Sparcstation
CARTO	B.R.G.M. Francia	N\$40,000.00	PC/AT 386 VGA Matrox
SPIPR	INEGI.IBM	GRATUITO	PC/AT 386 SuperVGA
IMAGE	CGS de Canada	N\$ 1,000.00	PC/AT 286 VGA

Las funciones típicas que realizan los sistemas de procesamiento analizada cuyas claves son: PIXSAT (1), ILWIS (2), SANDI (3), TRMAPPER (4), CARTO (5), IMAGE (7) Y SPIPR (8).

a) Preprocesamiento 1,2,4,5,6 y 8

Corrección Geométrica

Corrección Radiométrica

b) Despliegue y contraste 1 al 8

Despliegue en niveles de gris

Despliegue en falsos colores

Tablas de codificación

Contracción y elongación del histograma

Paletas de color

c) Realces 1 al 8

Realce de bordes

Filtrado espacial

Filtrado frecuencial

Algebra de imágenes

Combinaciones diversas entre bandas

d) Clasificación 1,2,4,5,6 y 8

Supervisada

No supervisada  
textural

e) Sistemas de Información geográfica SIG 1,2 y 5  
SIG basado en modo raster  
SIG basado en modo vector

f) Utilerías 1,2,4,5 y 8  
Redes  
Formatos, Impresión  
Poner etiquetas

Dentro de los sistemas mencionados existe una relación entre la cantidad de funciones permitidas, la velocidad con la cual se ejecutan, la resolución (número de colores y de pixels en el monitor) de la imagen y el costo. Como se vió, existen bastantes variables entre un sistema y otro haciendo que algunos sistemas salgan de competencia cuando se vislumbra una aplicación práctica como lo es el caso de la Exploración Petrolera. Así, los sistemas de cómputo varían desde las computadoras personales (Acer, Hp, etc.), pasando por las minicomputadoras (IBM-6300, VAX, etc.), hasta llegar a las computadoras del tipo mainframe de gran tamaño (CRAY); los grandes mainframes resultan demasiado caros y usualmente no resultan indispensables, puesto que las computadoras personales son capaces de efectuar la mayoría de los algoritmos de procesamiento a velocidades cada vez más altas. (Martínez, 1991)

Debido a las necesidades del trabajo, así como de la paquetería que podía utilizarse, se decidió llevar a cabo las aplicaciones de imágenes con los paquetes IMAGE, SPIPR-II Y CARTO, ya que se dispone de ellos y están instalados dentro de las computadoras que manejamos. A continuación se harán comentarios acerca de estos paquetes.

## **PAQUETE SPIPR -II**

En esta sección se describe el sistema de procesamiento de imágenes digitales denominado SPIPR-II, el cual consta de un programa principal, desde el cual son llamadas las rutinas

de procesos particulares, y una biblioteca de funciones para procesos tales como: despliegue, realce, detección de contornos, análisis de histogramas, clasificación, polígonos, etc.

El objetivo principal perseguido al crear al paquete SPIPR-II fue construir una biblioteca para diversos procesos que, debido a que han sido publicados en la literatura reciente, no se encuentran en los paquetes para procesamiento de imágenes disponibles en el mercado del software. Está diseñado para trabajar en computadoras personales. Se ha procurado que las funciones programadas sean independientes de la configuración del equipo (memoria RAM, procesador central, periféricos, memoria en disco duro, redes, etc.), razón por la cual las utilerías del modulo de despliegue se agrupan por separado de las restantes. El paquete SPIPR-II está compuesto de un programa principal donde se es capaz de llamar una biblioteca de funciones y un modulo de despliegue que opera de forma independiente, la rutina central entabla comunicación con el usuario para pedir datos de entrada y posteriormente brindarle la posibilidad de seleccionar los procesos que han de aplicarse a las imágenes a través de un menú de opciones.

Las aplicaciones para un sistema de procesamiento de imágenes digitales están compuestas por módulos ejecutables que son llamados desde un programa principal, además de ser interactivo, requiriendo del usuario respuestas específicas de tal manera que los programas llamados para ejecución evalúan las respuestas del usuario y le envían mensajes de error apropiados cuando estas no son las adecuadas; las características anteriores son esenciales para proporcionar al usuario un entorno amigable.

El programa principal sólo cumple tres funciones: leer datos de entrada, llamar el algoritmo que el usuario solicita y reservar memoria suficiente para que el algoritmo sea utilizado eficazmente. En la biblioteca de funciones existen dos clases: las concenientes a operadores puntuales y las que requieren el empleo de ventanas de convolución, la primera clase únicamente utiliza las variables globales declaradas en el programa principal y escribe la imagen final a la salida; la segunda clase recibe los elementos de una matriz impar de entrada, llamada matriz de

convolución, la salida se traduce en otra imagen, la cual es el resultado de un proceso de filtrado, entre los filtros existentes podemos citar a: suavizamientos (media, mediana, mayoría, etc.), gradientes (vertical, horizontal, Sobel, etc.), segunda derivada vertical (laplaciano, radial, etc.), pasabandas y residuales.

## PAQUETE IMAGE

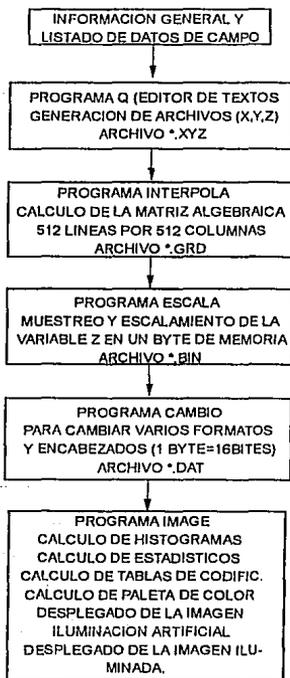
La organización de este paquete se hace de tal manera que las tareas y operaciones utilizadas tengan un orden lógico de ejecución dentro del sistema (equipo y programas) propuesto, sin que por ésto se pretenda ser globales.

El paquete IMAGE utiliza las cuantificaciones lineal e iso-poblacional y el despliegue de imágenes con una paleta estándar tipo VGA de 256 colores de entre los cuales se pueden seleccionar 16 diferentes nuevas paletas de 16 colores cada una. Este módulo permite al usuario: escalar y muestrear, calcular el histograma, cuantificar y elegir la paleta de colores para que las matrices algebraicas iniciales sean transformadas en imágenes digitales y desplegadas en pantalla o en papel.

Otra función adicional de este paquete es generar nuevas imágenes de relieve sombreado (Iluminación Artificial), lo cual permite resaltar las características de los altos números de onda, dicho relieve de la imagen digital se produce mediante el cálculo, la cuantificación y binarización de la reflectancia de una superficie, causada por una fuente virtual de energía y definida geoméricamente por el gradiente vertical de los datos físicos.

Para empezar a usar este paquete se requiere forzosamente de una matriz en formato binario con 16 bits por pixel. La instalación inicial requiere adicionalmente: el paquete DR HALO y una tarjeta de video NUMBER NINE, lo cual está bien explicado en la referencia "Geophysical Imaging Software" (Broome, 1988). Debido a la falta de estos (Paquete DR.Halo y la Tarjeta Number Nine), se tuvo que modificar el Programa original IMAGE de tal manera que se pudiera utilizar eficientemente.

A continuación se presenta el diagrama de flujo que se sigue en todo un proceso requerido para el despliegue de imágenes en tonos de gris y de imágenes iluminadas artificialmente, correspondiente a este paquete. Este diagrama es válido para las informaciones: gravimétrica, magnetométrica, topográfica y geológica; las imágenes de satélite ya vienen en forma digital, por lo que con estas se deberá empezar desde el programa CAMBIO.



De una manera muy general, para la obtención de una imagen digital y de su despliegado en pantalla de computadora se sigue con el siguiente procedimiento:

- a) Recopilación de la información general de la región de estudio.

b) Generar un listado de datos de campo mediante el PROGRAMA Q (Editor de textos), para la generación de archivos: (X,Y,Z) por línea o estación, la salida se guarda en un archivo: \*.XYZ.

c) Ejecución del PROGRAMA INTERPOLA para el calculo de una matriz algebraica de valores reales, de 512 líneas por 512 columnas, el resultado queda grabado en el ARCHIVO: \*.GRD

d) Ejecución del PROGRAMA ESCALA, el cual realiza las operaciones de muestreo y escalamiento de la variable Z, en un byte de memoria, el resultado queda guardado en el ARCHIVO: \*.BIN

e) Correr el PROGRAMA CAMBIO cuyo objetivo es transformar las imágenes en varios formatos y encabezados, como caso particular se tiene el paquete IMAGE en donde se requiere que un pixel sea de 16 bits (2 bytes), la salida se guarda en el ARCHIVO: \*.DAT

f) Ejecutar el PROGRAMA IMAGE, usando el archivo de entrada: \*.DAT. las principales aplicaciones de "IMAGE" son: calculo y gráficas de histogramas, calculo de los estadísticos más relevantes, calculo de tablas de codificación (lineal o ecualizada), selección de la paleta de color, desplegado de la imagen, calculo de una imagen iluminada artificialmente y de su desplegado. La salida queda guardada en los archivos: \*.IMA, \*.B-1 y \*.CTO.

El archivo con extensión \*.IMA que tiene por encabezado el número de columnas y de renglones. Tiene como objetivo ser utilizado por el modulo de despliegue de la imagen tanto en el monitor como en una impresora. El archivo con extensión \*.B-1, sin encabezado se utiliza para desplegar la imagen con el paquete SPIPR del I.N.E.G.I., en la pantalla del monitor, con la diferencia de que con el programa IMAGE, los tonos de gris más oscuros corresponden a los valores bajos y los tonos claros a los mayores, siendo al contrario con SPIPR. Este despliegue tiene la ventaja de que la imagen puede ser tratada interactivamente en la pantalla, con todos los atributos que se le dan a las imágenes con este paquete.

El tercer archivo cuya extensión es \*.CTO tiene como encabezado una diagonal (/) seguida de blancos hasta la columna 128, tiene como característica agregar ceros hasta la columna 128 sin importar el número de renglones, sirve para utilizar el paquete CARTO que tiene una gran variedad de aplicaciones, como es el de poder darle procesado en el dominio del espacio a las imágenes, rotarlas, empalmar una imagen con otra, cortar o pegar imágenes, etc. también es útil para interpolar la malla hasta formar matrices de 256X256, 512X512 y 1024X1024, para después poderla desplegar adecuadamente con el paquete SPIPR. Además, este paquete es el utilizado para realizar la combinación de dos o más imágenes y el análisis multivariable de todas las informaciones disponibles.

A los archivos de datos: \*.IMA, \*.B-1 y \*.CTO, se les puede dar el proceso de relieve sombreado mediante el algoritmo de iluminación. Para esto es necesario dar valores de inclinación y declinación de la fuente luminosa.

El archivo \*.IMA se podría desplegar a través del monitor o una impresora Epson, ya sea: en tonos de gris, en color o con los efectos de la aplicación de la iluminación artificial.

#### **II.4.1.- DESCRIPCION DE LA ARQUITECTURA DE SISTEMAS DE PROCESAMIENTO NUMERICO DE IMAGENES DIGITALES UTILIZADOS.**

En los paquetes analizados, para desplegar imágenes se utilizó una computadora personal PC/AT del tipo 80286, con un monitor Mitsubishi Multisync cuya resolución es del tipo VGA (180 líneas por 640 columnas), una impresora HP - Laser en blanco y negro, la mayoría de los algoritmos programados fue en C, Turbo Pascal y Fortran V. Conviene mencionar que en el campo del Procesamiento de Imágenes Digitales existe una fuerte combinación de equipo y programas (software) dependiendo del presupuesto disponible.

## **Equipo de cómputo.**

Para describir un equipo que trabaje con técnicas del PNID, se presentan los siguientes subconjuntos:

1.- Digitalización. La captura de imágenes y de las cartas de I.N.E.G.I. se hace mediante una mesa de digitalización acoplada a la computadora personal provista con una tarjeta especial.

2.- Captura sobre una imagen digital. En modo semiautomático, la captura se realiza mediante un ratón, dada una zona predefinida o un cursor que aparece superpuesto a la imagen digital, es decir, se aplica el análisis asistido por computadora. Otra manera es la simple introducción de las bandas de satélite compradas.

3.- Tratamiento de la imagen. El procesamiento digital se realiza por medio de los diferentes paquetes, tales como: ERDAS, SPIPR, CARTO, etc., aplicando diferentes funciones de transformación del PNID, sobre la imagen y desplegándola para observar los resultados, y/o aplicando filtrado a imágenes, mediante los algoritmos publicados y programados por diversos autores de la literatura geofísica. Dicho filtrado puede estar representado por: Derivadas, Análisis de Correspondencias, Continuaciones Analíticas de Campo, Transformadas, etc., Se debe desplegar, posteriormente, la imagen procesada para observar los resultados debidos a la aplicación de algún operador en particular.

4.- Unidad de Cómputo. La configuración más frecuente está basada en una computadora personal (PC/AT). Esta computadora controla los diferentes periféricos tales como las tarjetas para la tableta gráfica, impresora, el ratón, etc., se requiere de diferentes monitores: VGA, SUPER VGA o RGB de alta resolución, según el detalle que se requiera.

## **CAPITULO III**

### **APLICACIONES AL AREA GUAXCAMA**

#### **III.1.- GEOLOGIA DE LA PLATAFORMA SAN LUIS POTOSI-VALLES-**

##### **GEOLOGIA REGIONAL Y TECTONICA.**

Debido a que la Plataforma San Luis Potosí-Valles es una región que presenta enorme variabilidad en las litologías, en la topografía y en los fenómenos naturales sobre la superficie del terreno, se escogió parte del área Guaxcama perteneciente a dicha región para la realización de este trabajo, además de que se dispone de cinco tipos distintos de datos: gravimetría, magnetometría, topografía, satélite y geología.

El esbozo geológico que se presenta, utiliza la nomenclatura y divisiones tectónicas propuestas por Reyes F., (1992)

##### **ESQUEMA GEOLOGICO DEL AREA GUAXCAMA.**

De acuerdo con el plano de geología superficial del área de trabajo, se muestra una gran influencia de derrames ígneos cubriendo aproximadamente el 60 por ciento del área, sobre todo en la porción Sur, observándose un intenso fracturamiento característico de una zona distensiva.

La parte Oeste de la zona de estudio tiene como principal componente un amplio depósito de material reciente, mientras que en la parte NE los afloramientos se hacen variables predominando los sedimentarios, principalmente calcáreos.

#### **III.1.1.- GEOLOGIA SUPERFICIAL DEL AREA GUAXCAMA.**

Se reconocieron dos columnas sedimentarias diferentes entre sí, una de cuenca y otra de plataforma, pertenecientes a las provincias de la Cuenca Mesozoica del Centro de México y

de la Plataforma de San Luis Potosí-Valles respectivamente; dentro de la columna de cuenca las rocas aflorantes más antiguas son de la Formación Tamaulipas Inferior. En la transición de ambas provincias, se perforó el Pozo Xoconoxtle-1 en 1973, cortando rocas del Jurásico Superior representadas por la Formación Santiago, Taman y Pimienta, completándose la columna con las Formaciones Tamaulipas Inferior, La Peña, Cuesta del Cura e Indidura del Cretácico Medio y Superior (Pemex IG-707, Pemex IG-721, Pérez, 1989, González, 1991).

La secuencia sedimentaria en la plataforma fue reconocida al Oriente de la Ciudad de San Luis Potosí, siendo las evaporitas de la formación Guaxcama los sedimentos más antiguos que afloran (Cretácico Inferior). Sobre esta unidad se encuentra perforado el Pozo Guaxcama-1, las rocas que cortó fueron los Lechos Rojos del Triásico Huizachal, completando la columna con rocas del Cretácico, representadas por las Formaciones: Guaxcama, calizas de mar abierto, El Abra, Tamasopo (Miembro Superior) y Cárdenas, considerándose dicha columna en posición "in situ", que es equivalente a la porción autóctona desde el punto de vista de tectónica superpuesta, ocurrida dentro de esta área por efectos de la Orogenia Laramide, ubicando sedimentos calcareo-arcillosos provenientes de la cuenca, representados por las Formaciones Soyatal y Mezcala del Cretácico Superior y que son considerados como un bloque alóctono.

Otra evidencia de este proceso, son los planos de corrimiento, zonas de milonitización, marmorización, brechas tectónicas y escamas de corrimiento, localizadas a lo largo de las secciones trabajadas en los prospectos antes mencionados (cit. ant.). Con esto se confirma el sobrecorrimiento existente sobre la plataforma, dejando fuera las teorías de trabajos anteriores que ponen en forma concordante los sedimentos de cuenca sobre los de plataforma.

Las rocas ígneas extrusivas que se encuentran aflorando en el área de estudio, se localizan circundando la Ciudad de San Luis Potosí, formando mesetas. Su datación fue hecha por el método K/Ar en el I.M.P., dando como edad 24-28 m a (Oligoceno Sup. al Mioceno) formadas principalmente por rocas ácidas. Su forma de emplazamiento fue a través de fisuras formando domos exógenos de lava viscosa, asociados a grandes erupciones de flujo de cenizas, que culminan a fines del Terciario y Cuaternario. También se observaron colados de basalto en algunos afloramientos localizados al Norte del poblado de Santa Catarina, S.L.P. (Hoja INEGI F-14-A-85).

### III.1.2.- CARTOGRAFIA DE LINEAMIENTOS.

Para la interpretación de datos de sensores remotos, los patrones de relieve denominados "lineamientos", se reconocen como condiciones geológicas anómalas, representadas por líneas rectas. Algunas de estas condiciones son debidas a patrones de: relieve, drenaje, cobertura o bien, a cualquier combinación de éstos.

Definición de lineamiento.- Son discontinuidades lineales o ligeramente curvilíneas teniendo un aspecto complejo, se asocian a elementos morfológicos del paisaje y a fenómenos tectónicos. Son, por lo general representaciones superficiales de fracturas y fallas, (Scanvic, 1983).

Al iniciar la identificación de los lineamientos que se observaron y analizaron sobre las imágenes de satélite, el interprete deberá, en principio, considerar todos, sin tratar de realizar la interpretación geológica de los mismos, hasta que se encuentre familiarizado con éstos, ya que se podría cometer el error de considerar de mayor importancia a aquellos lineamientos que no la tienen y eliminar a aquellos que realmente tengan importancia para el estudio que se está desarrollando. Por las razones anteriores, el interprete deberá tomar en cuenta que los lineamientos observables en la imágenes de las series Landsat o Spot, se representarán en forma de líneas de diversas características: continuas o discontinuas, escalonadas o quebradas, rectilíneas o ligeramente curvilíneas, largas o cortas, interceptadas o no, etc. Dichos lineamientos pueden ser la manifestación sobre el terreno de algunas de los siguientes características geológicas:

Los lineamientos rectilíneos pueden ser debidos a la presencia de: grandes fallas a nivel de la corteza continental, con longitudes de 10, 50, 100 o más kilómetros; pequeñas fallas, tales como fallas normales, inversas o de rumbo, un sistema de fracturas paralelas; alejamiento de cursos de ríos con control estructural, líneas de drenaje, líneas estructurales, linderos litológicos, rumbos de afloramientos regionales de estratos sedimentarios, trazas de discordancias, valles tectónicos, acantilados de falla, acantilados de erosión, espinazcos alargados de serranías, largos rasgos culturales y, características cuyo origen se ignora.

Algunos lineamientos están bien definidos, sobre todo aquellos de origen reciente o los que han mostrado un renovación en sus desplazamientos. Otros son difusos o poco notables

débito quizá a: una mayor edad geológica, la acción de la erosión, sepultamiento por materiales clásticos, sepultamiento por rocas ígneas extrusivas, o bien, por todos los factores combinados. Algunos lineamientos continúan por decenas de Kilómetros sin interrupción, otros están rotos en segmentos, desplazados por otros lineamientos, o terminan por estructuras que los interceptan. Los lineamientos curvilíneos pueden ser debidos a la expresión en la superficie del terreno de: cuerpos intrusivos, aparatos volcánicos, cráteres de impacto por meteoritos, domos salinos, domos ígneos intrusivos, anticlinales, sinclinales, plegamientos combados de rocas sedimentarias, calderas de colapso, emisiones de lavas con frentes curvilíneos, zonas kársticas con dolinas, cuencas hidrográficas, valles intermontanos, bolsones, lagos, playas, formas fisiográficas de sierras, etc. Por último, algunos lineamientos son fortuitos y difíciles de explicar y calificar.

En lo que respecta al uso de las imágenes de satélite en nuestro caso, el método de trabajo consistió en detectar, delinear, clasificar y reconocer patrones de características principales (geología estructural y estratigrafía), cartografiados sobre la imagen desplegada en el monitor; su interpretación definió características naturales del área cubierta y sus relaciones con la geología del subsuelo. Algunos de los factores usados para llevar a cabo dicha caracterización fueron: el relieve, geoformas, drenajes, lineamientos de diferente color, granulidad, textura, homogeneidad y tonalidad.

La parte relativa a la interpretación, permitió identificar los objetos o entidades temáticamente significativos en función de sus medidas geométricas, de su respuesta espectral, de su textura y de su forma, así como de sus relaciones espaciales con los otros objetos y entidades.

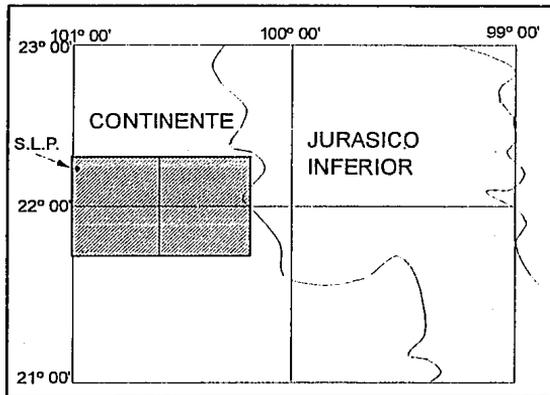
Se observó que debido a que los fenómenos naturales (vegetación, rocas aflorantes, caminos, etc.), están fuertemente mezclados sobre la superficie terrestre y que éstos se encuentran presentes dentro de la imagen radiométrica, entonces al interpretar la imagen "derivada primera o segunda" de la imagen de satélite, se deben tomar ciertas precauciones. Aun así, los lineamientos detectados se asimilan a eventos de fracturamiento geológico y a características netamente topográficas.

### III.1.3.- PALEOGEOGRAFIA.

Para la interpretación paleogeográfica, se incluyen 7 planos de distribución de facies que son: Jurásico Inferior, Oxfordiano, Kimmeridgiano, Tithoniano, Valangiano-Hauteriviano, Aptiano y Albiano-Cenomaniano, de los cuales se hace una breve descripción en base al tipo de distribución de rocas que se han identificado regionalmente en las provincias geológicas de la Mesa Central y Plataforma Valles-San Luis Potosí.

#### JURASICO INFERIOR.

Durante la invasión marina que dió marco a la cuenca Huayacocotla del Jurásico Inferior, cubrió gran parte de la Plataforma de San Luis Potosí-Valles, según se manifestó en la mayoría de los pozos perforados en la porción media de la misma, en donde se han cortado rocas de esta edad, con espesores hasta del orden de los 2700 m. (Pozo Huichimal-1).



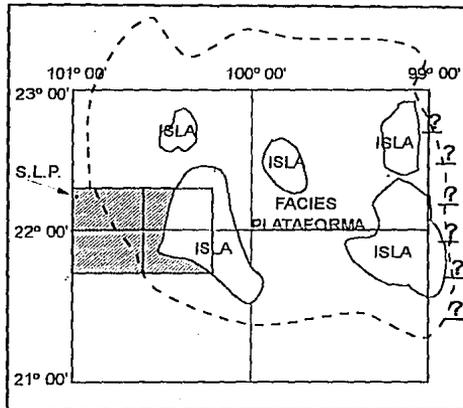
Tomado de F.González (1991) (PEMEX I.G. 721) Jurásico Inferior.

## JURASICO MEDIO

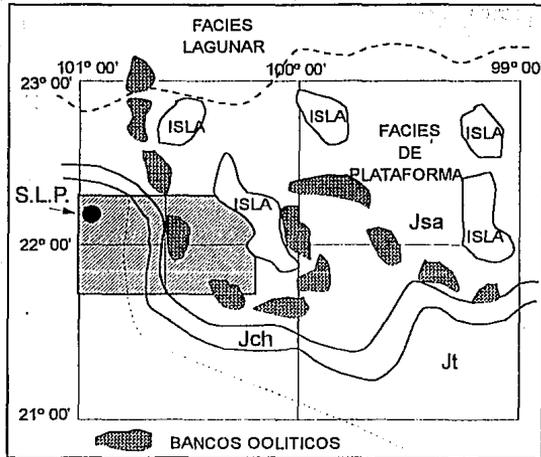
Al finalizar el Jurásico Medio, se evidencian los efectos de una regresión a nivel regional dominando un ambiente continental que da origen a las formaciones Cahuastas y Joya, las cuales por no presentar atractivo económico para el área, no se interpretó su distribución de facies.

## JURASICO SUPERIOR

A).- OXFORDIANO.- La transgresión marina iniciada en esta edad, tan sólo alcanzó a cubrir la porción Central de la reciente plataforma, dejando una gran isla al Oriente, otra de gran tamaño en la parte Sur-Occidental de la misma plataforma, así como dos más en la parte Nor-Occidental, depositándose rocas de aguas someras entre las islas y de mar abierto al Sur de estas.



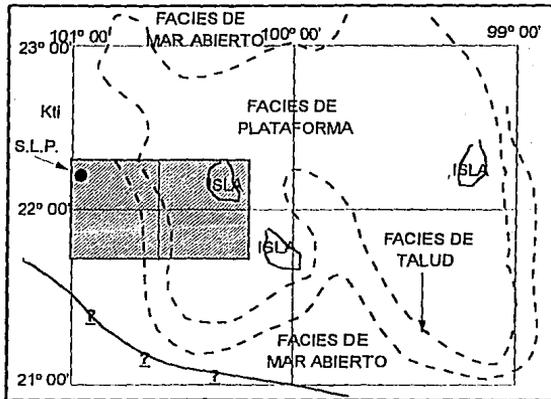
Tomado de F.González (1991) (PEMEX I.G. 721) Oxfordiano



Tomado de F.González (1991) (PEMEX I.G. 721) Kimmeridgiano.

B).- KIMMERIDGIANO.- Durante este piso se tiene en la porción media de la Plataforma, condiciones de mares someros epicontinentales reduciéndose las dimensiones de las islas y originándose depósitos lagunares de circulación restringida hacia el Norte, y hacia el Sur una franja con depósitos de Talud que limita a los de la plataforma con el mar abierto.

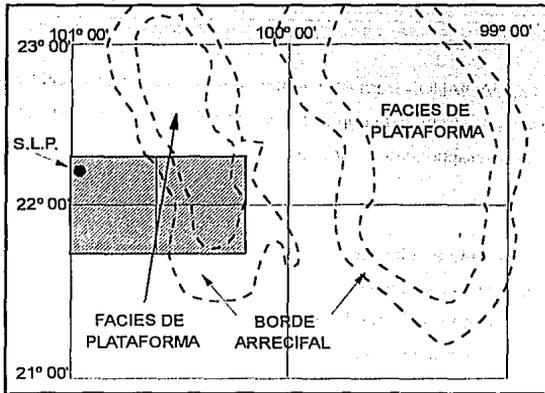
C).- TITHONIANO.- Para este piso se incrementó el basculamiento hacia el Oriente y continua la expansión del Golfo de México, por lo que se continúan las condiciones continentales quedando tan solo las Islas de Pérez, Miquihuana, y Guaxcamá, en tanto que los depósitos de plataforma se restringían al Norte y los del mar abierto cubrían la porción Sur de la Plataforma.



Tomado de F. González (1991) (PEMEX I.G. 721) Tithoniano.

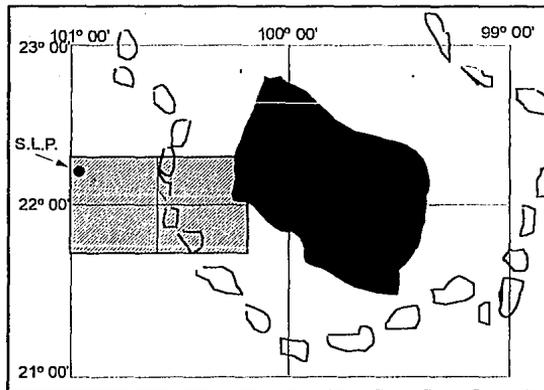
## CRETACICO INFERIOR

A).- VALANGINIANO-HAUTERIVIANO.- A inicios del Cretácico Inferior, continúa la transgresión marina, propiciando que sobre la plataforma de Valles - San Luis Potosí se desarrollen condiciones lagunares evaporíticas, formándose en los bordes, crecimientos arrecifales en forma de pequeños parches, que restringían la circulación hacia el Centro de la laguna y producían depósitos de Talud en las pendientes del paleocelemento, en tanto que la cuenca Mezozoica del Centro de México se profundiza más, depositándose las Formaciones Taraises y Tamaulipas Inferior las cuales contienen materiales que evidencian la actividad magmática, de una cuenca de retroarco al Occidente.



Tomado de F.González (1991) (PEMEX I.G. 721) Valanginiano-Hauteriviano.

B).- APTIANO.- Continúa la actividad volcánica en el Sur y hacia el Occidente, representándose además un incremento en el nivel del mar, el cual cubre por completo las islas de la región y propició el depósito de calizas de mar abierto, incluso en la porción Media de la ya definida Plataforma Valles - San Luis Potosí.



Tomado de F.Gonzalez (1991) (PEMEX I.G. 721) Aptiano.

## CRETACICO MEDIO

A).- ALBIANO - CENOMANIANO.- Para este tiempo la Plataforma es circundada por crecimientos arrecifales flanqueados por franjas de depósito post-arrecifales y pre-arrecifales, propiciándose el desarrollo de lagunas evaporíticas de circulación restringida hacia su porción Sur-Occidental.

En lo referente a la interpretación geológica se tienen las siguientes conclusiones: En el área estudiada se reconocieron dos columnas sedimentarias diferentes entre sí, una de cuenca y otra de plataforma; dentro de la columna de cuenca, las rocas más antiguas que afloran son las de la Formación Tamaulipas Inferior, le continúan La Peña, Cuesta del Cura, Indidura; Soyatal y Mezcala.

La secuencia sedimentaria en la plataforma la componen las evaporitas de la Formación Guaxcama, El Abra, con su cambio de facies a Tamabra, Tamasopo y Cárdenas.

Se determinó que las rocas del Cretácico Superior representadas por las Formaciones Soyatal y Mezcala, se encuentran descansando discordantemente en sedimentos de la Formación El Abra y Tamabra de edad Albiano-Cenomiano, por efectos de la Orogenia Laramide, provocando una serie de cabalgamientos sobre este complejo calcáreo arrecifal.

Se determinó las relaciones que existen entre las rocas ígneas y las sedimentarias; por las características que presentan las primeras es fácil distinguirlas en el campo ya que contrastan por su color y textura, además forman grandes escarpes por su mayor resistencia a la erosión.

Los afloramientos de rocas ígneas que se encuentran dentro del área son de tipo ácido principalmente, su edad fue datada por el método K/Ar., en pruebas hechas por el I.M.P. [proyecto C-2010 y folleto técnico No. 107 U.A.S.L.P. (1986)], se obtuvo una edad de 24-28 m.a., colocándolas en el Oligoceno Superior al Mioceno, se encuentran cubriendo en forma discordante a las Formaciones Cuestas del Cura e Indidura.

En una porción de la Plataforma San Luis Potosí-Valles, en la parte Oriental del área estudiada, se encuentran calizas de mar abierto, de edad Aptiano, pertenecientes a la Formación Guaxcama marcando un cambio brusco en las condiciones sedimentológicas, dando origen a rocas de cuenca representadas por depósitos de lodo calcáreo sobre una plataforma marina sumergida a profundidades batiales, con una buena oxigenación y circulación de aguas, donde el área posiblemente se encontraba sufriendo una inestabilidad tectónica.

El plegamiento y fallamiento de las rocas mesozoicas se inicia en el Cretácico Superior-Paleoceno, provocando que la zona de pliegues y cabalgaduras se ubiquen sobre la plataforma San Luis Potosí-Valles, dando lugar a una tectónica superpuesta, donde rocas de cuenca de las Formaciones Indidura, Soyatal, y Mezcala del Oriente de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, cabalguen sobre la plataforma Valles-San Luis Potosí, causado por la Orografía Laramide.

Se reconocen 4 unidades Morfotectónicas: de las cuales por su relieve e importancia sobresalen dos, la primera se localiza sobre la Plataforma San Luis Potosí-Valles en su porción Occidental; representada por calizas masivas de una edad Albiano-Cenomaniano y Coniaciano-Santoniano del Cretácico Medio-Superior, presentando un drenaje y alineamiento mal definido, con plegamientos amplios e intensa karsticidad, que afectan a las formaciones El Abra, Tamasopo y un porcentaje mínimo de las rocas evaporíticas.

La segunda unidad se localiza en la parte Oriental de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, presentando estructuras alargadas y estrechas con un plegamiento apretado y una orientación NW-SE, siendo la más clara el Anticlinal de Álvarez, representado por rocas calcáreo-arcillosas y en partes terrígenas del Cretácico Medio y Superior.

En los depósitos Recientes, se distinguieron dos fases de deposición: una de conglomerados de origen continental, formados por fragmentos de rocas sedimentarias y volcánicas, unidos a material arcillo-arenoso mal cementado y otro de suelo producto de la erosión a que se encuentran sometidas las rocas preexistentes que se hallan aflorando en el área, depositados en las partes más bajas de los valles así como a lo largo de los ríos y arroyos.

En el área, la orientación general que presentan los ejes de las estructuras es NW-SE, son de tipo asimétrico y recostados hacia el Oriente.

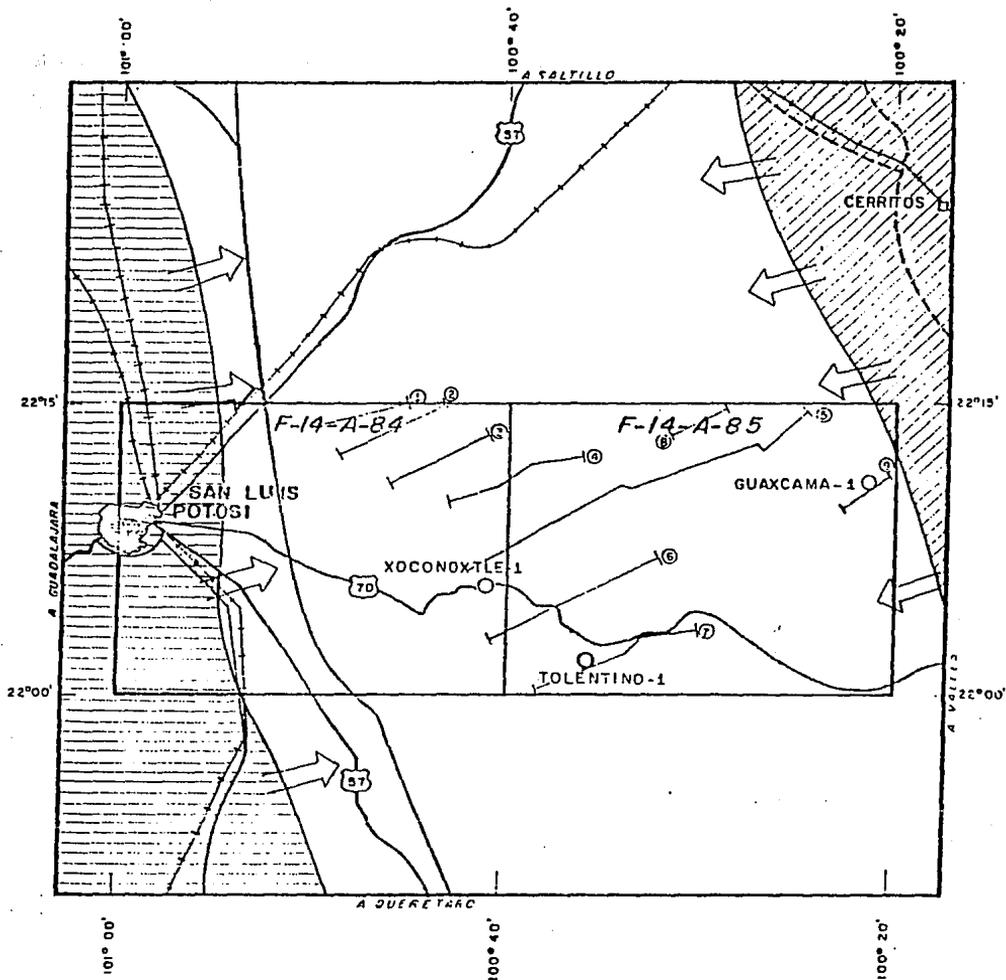
Las fallas inversas se encuentran orientadas burdamente NNW-SSE, con una vergencia al Oriente. Además se tiene una falla de transcurrencia de tipo dextral con una orientación casi E-W.

Los eventos geológicos ocurridos en el área, son el resultado de la Orogenia Laramide, en el que se incrementa la franja de pliegues y cabalgaduras por compresión en los sedimentos, formando zonas de escarpes alargados, con orientación NNW-SSE, provocando la deformación y un sobrecurrimiento, en el cual las rocas de aguas profundas del Oriente de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, cabalguen sobre la plataforma San Luis Potosí-Valles.

#### III.1.4.- ANALISIS ECONOMICO

Para tratar de evaluar el potencial de generación de hidrocarburos en el área, nos apoyamos en los trabajos de Geoquímica efectuados, y se concluye que para el Jurásico Superior representado por las formaciones Santiago, Tamán y sus respectivos cambios de facies, hacia el borde Occidental de la Plataforma, se manifiestan como ricos en materia orgánica, capaces de generar aceite. Ahora bien, conociendo las características litológicas, estratigráficas y estructurales de las rocas que se encuentran en la superficie, se puede considerar que los hidrocarburos se encuentran actualmente enlramados, en los sedimentos calcáreos así como en sus facies arrecifal y pre-arrecifal.

Al Oriente del área, las rocas de plataforma capaces de almacenar hidrocarburos, se encuentran aflorando sin tener una cobertura sello, por lo que las posibilidades de aceite se reducen a la porción Occidental de la plataforma San Luis Potosí-Valles, donde se tiene una cobertura sedimentaria por tectonismo superpuesto de las formaciones alóctonas (Soyatal y Mezcala).



AREA DE PROBABLE GENERACION DE HCS  
EN JURASICO SUPERIOR



AREA DE PROBABLE GENERACION DE HCS  
EN JURASICO INFERIOR Y SUPERIOR



DIRECCION DE MIGRACION DE HCS

### ROCAS GENERADORAS Y MIGRACION DE HCS.

Tomado de Pérez B. (I.G. 707 PEMEX, 1989)

Las rocas sello son consideradas las evaporitas, formadas por yesos y anhidritas de la formación Guaxcama; en menor importancia tenemos a la secuencia arcillo-cálcarea de las formaciones Soyatal y Mezcala.

El Cretácico Inferior es atractivo en rocas carbonatadas y dolomíticas, así como los cambios de facies laterales que pueden estar basculados por plegamientos, es posible que los hidrocarburos que se hayan originado en el Jurásico, pudieron haber migrado hacia la parte Oriental del Anticlinal de Alvarez,

En este trabajo estamos apoyando el resultado final presentado en el Prospecto Xoconoxtle, (PEMEX IG. 721, González, 1991) en el cual se propone la perforación de un pozo exploratorio, cuyo objetivo sería el de evaluar las condiciones Económico-Petroleras del Cretácico Inferior y Jurásico Superior en el flanco Oriental del Anticlinal de Alvarez.

**POZO XOCONOXTLÉ No. 1**

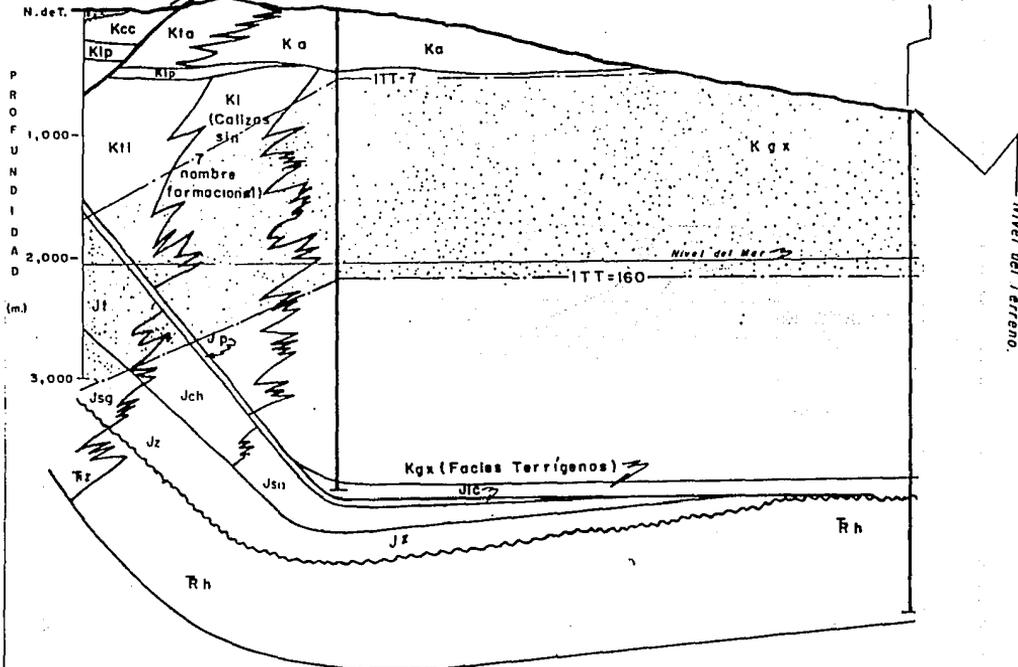
GG = 30° C / Km.

**POZO TOLENTINO No. 1**

GG = 30° C / Km.

**POZO GUAXCAMA No. 1**

GG = 30° C / Km.



I.T.T-7- MARCA EL INICIO DE LA VENTANA DE GENERACION DEL PETROLEO.

I.T.T-160 MARCA LA PARTE INFERIOR DE LA VENTANA DE GENERACION DEL PETROLEO.

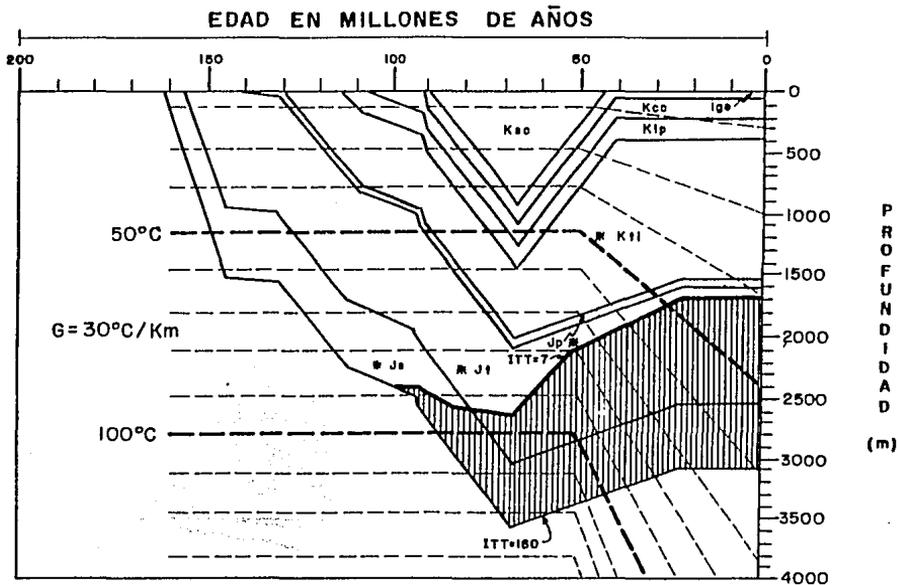
**CONCLUSIONES:**

SE INTERPRETA QUE LA OPTIMA GENERACION DE HCS. ES PARA -- ROCAS DEL JURASICO SUPERIOR. (TITHONIANO, KIMMERDGIANO, OXFORDIANO) Y CRETACICO INFERIOR.

 VENTANA DEL PETROLEO

CORRELACION ESTRATIGRAFICA CON ISOLINEAS DE INDICE TIEMPO-TEMPERATURA.

Tomado de Pérez B. (I.G. 707 PEMEX, 1989)



### CONSIDERACIONES

COLUMNA GEOLOGICA	M.B.M.R.
ROCA IGNEA _____	4 m.
K. CUESTA DEL CURA _____	53 m.
K. LA PEÑA _____	205 m.
K. TAMAULIPAS INFERIOR _____	387 m.
J. PIMIENTA _____	1 543 m.
J. TAMAN _____	1 597 m.
J. SANTIAGO _____	2 542 m.
PROFUNDIDAD TOTAL _____	2 998 m.

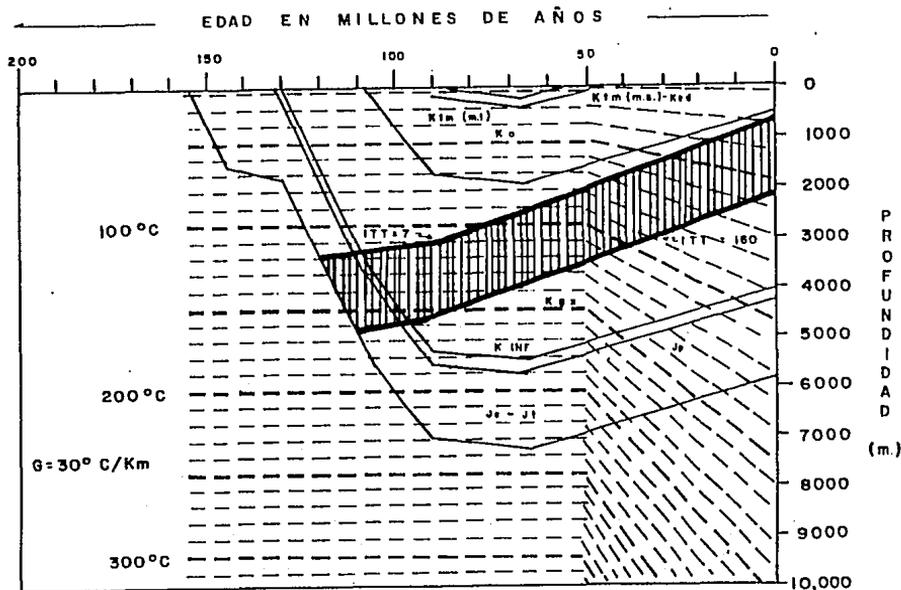
GENERACION DE ACEITE

### CONCLUSIONES

Los sedimentos de las Formaciones Taman y Santiago iniciaron su generación de hidrocarburos a partir del Cretácico Superior, en tanto que la Pimienta no tuvo generación de aceite.

CURVA DE SEPULTAMIENTO  
POZO XOCONOXTLE-1

Tomado de Pérez B. (I.G. 707 PEMEX, 1989)



### CONSIDERACIONES :

#### COLUMNA GEOLOGICA M.B.M.R

K. abra	_____	AFLORA
K. Guaxcama	_____	515 m.
(FACIE TERRIGENA)	_____	3 812 m.
PROFUNDIDAD TOTAL	_____	3 964 m.



GENERACION DE ACEITE

- SE CONSIDERA EROSIONADO EL CRETACICO SUPERIOR DE LA FORMACION TAMASOPO Y CARDENAS.—

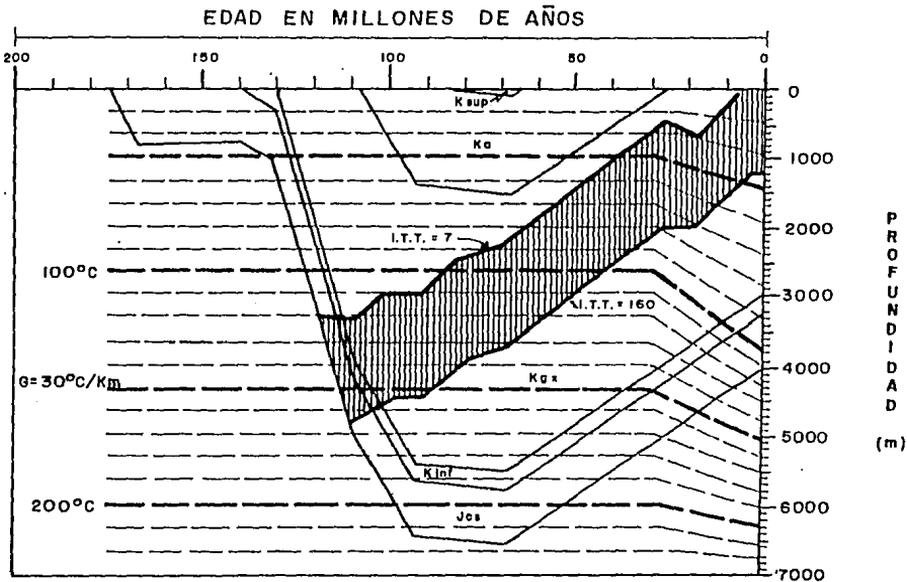
### CONCLUSIONES :

ACTUALMENTE EXISTE GENERACION DE ACEITE EN ROCAS DE LA FORMACION K<sub>g</sub> Y PARA LAS ROCAS DEL JURASICO SUPERIOR, LA GENERACION SE INICIA EN EL CRETACICO INFERIOR.—

#### CURVA DE SEPULTAMIENTO

#### POZO TOLENTINO-1

Tomado de Pérez B. (I.G. 707 PEMEX, 1989)



### CONSIDERACIONES

COLUMNA GEOLOGICA	M.B.M.R.
K. GUAXCAMA	4.6 m.
JURASICO - TRIASICO	3014 m.
PROFUNDIDAD TOTAL	4050 m.

Se considera el Cretácico Medio y el Superior erosionados para la Formación El Abra y Tamasopo.

GENERACION DE ACEITE

### CONCLUSIONES

Los sedimentos de la Formación Guaxcama actualmente están generando hidrocarburos, mientras que las rocas del Cretácico Inferior y Jurásico Cahuasos generaron aceite hace 115 m.a.

CURVA DE SEPULTAMIENTO

POZO GUAXCAMA-1

Tomado de Pérez B. (I.G. 707 PEMEX, 1989)

### III.2.- GEOFISICA (METODOS POTENCIALES)

El procesado de la información geofísica, se realizó considerando tres objetivos generales:

- 1.- Mejoramiento en la calidad de la información.
- 2.- Incrementar la capacidad de discriminación de la información con respecto al ruido.
- 3.- Enfatizar los datos de interés.

#### III.2.1.- ANALISIS Y PROCESADO DE DATOS AEROMAGNETICOS.

Se inició digitizando los datos del plano de Intensidad Magnética Total que cubren el área (Mapa prospecto Morelia-Pachuca, Tamazunchale-Huauilla), generándose una malla con intervalo de rejilla (1 km X 1 km). Se seleccionó la altura de vuelo de 3500 m.s.n.m. para toda la información, debido a la necesidad de eliminar efectos magnéticos de origen somero (derrames ígneos del Terciario y Reciente), los cuales enmascaran en alto grado los efectos profundos, originados por las estructuras del basamento. El seleccionar una altura de vuelo mayor, da como resultado la eliminación de parte del ruido magnético, también esta altura de vuelo fue escogida para unificar el plano ya que este prospecto fue volado a 410, 2100, 3000 y 3100 m de altura.

La etapa de separación de Anomalías (Anexo A), se basa en la aplicación de filtros en el dominio espectral (Anexo C). Partiendo de la matriz (43X56) con datos magnetométricos y la matriz (71X56) con datos gravimétricos, obtenidos con el paquete Generación de Mapas de Propósito General (Ceja M. 1977), se presenta la metodología siguiente para el filtrado del ruido y del regional:

- 1.- Usando un ajuste por mínimos cuadrados se separó el ruido, así como la media (término constante) y la tendencia lineal de los datos (Anomalía de Bouguer o Intensidad Magnética), pues estas componentes distorsionan el espectro de potencias, sobre todo cerca del cero.

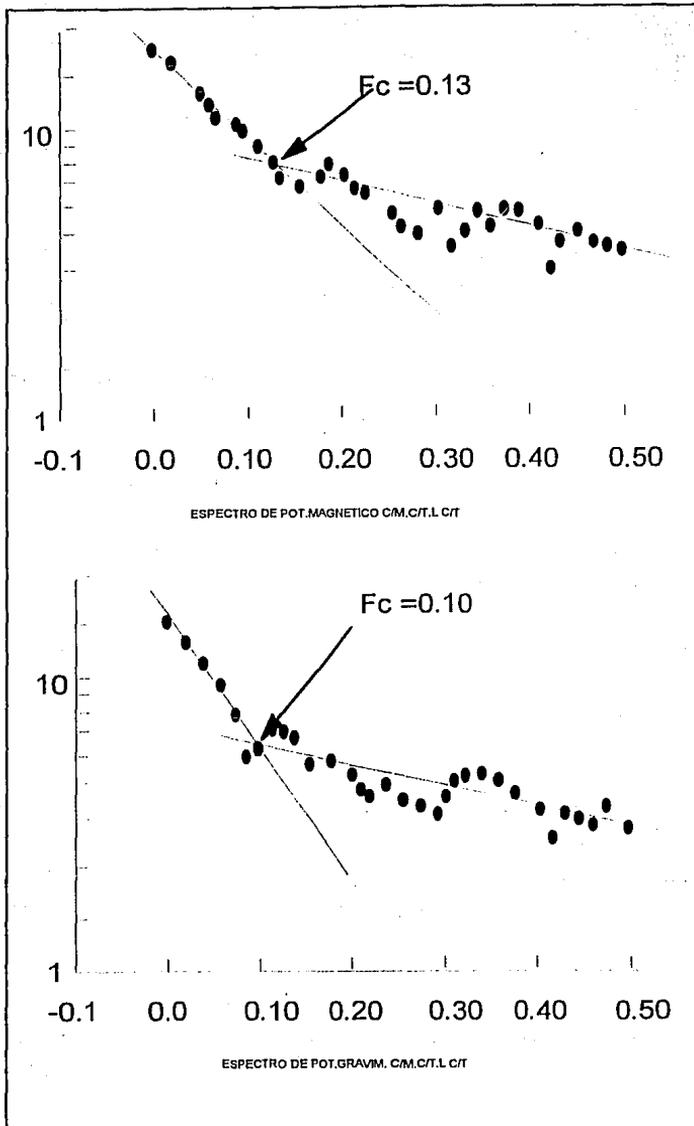


FIG.III.2

2.- Se aplicó la Transformada Rápida de Fourier y se calculó el espectro de potencia.

3.- Se promedió radialmente el espectro de potencias y su logaritmo se graficó contra la frecuencia radial.

4.- Se determinaron las frecuencias de corte superior e inferior y se diseñó el filtro correspondiente (Anexo A).

5.- El filtro es generalizado a dos dimensiones y se multiplica por la Transformada de Fourier bidimensional del plano.

6.- El resultado se invierte bidimensionalmente usando la Transformada Rápida de Fourier inversa.

Esta secuencia fue realizada con el programa Convul2 (Hernández F. 1993), obteniéndose los Espectros de potencias magnético y gravimétrico (FIG. III.2), siendo la frecuencia de corte para el magnético  $F_c=0.13$  ciclos/km y el gravimétrico  $F_c=0.10$  ciclos/km

### III.2.2.- ANALISIS Y PROCESADO DE DATOS GRAVIMETRICOS.

La información gravimétrica integrada, fue fundamental en la determinación del modelo estructural de la probable cima del basamento que se propone, por tener menos influencia de los derrames ígneos someros presentes en el área. A continuación se describen brevemente las actividades relacionadas con las etapas de integración y procesado de la información gravimétrica.

Se contó con la información codificada de las estaciones gravimétricas observadas de cuatro prospectos: a).-Guaxcama-Tolentino, b).- Mojaras, c).- SW de S.L.P.y d).- Ocampo. El total de estaciones gravimétricas (de los 4 prospectos utilizados) fue de 3515, utilizando una densidad promedio de  $2.24 \text{ gr/cm}^3$  se obtuvo una constante  $K = 2.15 \text{ U.G/cm}^3$ . y 1500 m.s.n.m. fue el nivel de referencia.

### III.2.3.- INFORMACION GEOLOGICA.

Para la geología del área de estudio se dispuso de varios trabajos realizados por Petróleos Mexicanos, los cuales se presentan en el capítulo III.1, cuatro mapas a escala 1:50,000 y un mapa a escala 1:200,000 editados por el I.N.E.G.I., además de varios estudios geológicos realizados e inéditos realizados por el I.M.P., (R. Flores., 1992).

### III.2.4.- INFORMACION TOPOGRAFICA.

A partir de un mapa topográfico editado por el I.N.E.G.I. se digitalizaron curvas de nivel cada 50 m., formandose un archivo de datos donde cada renglon contiene tres datos: las coordenadas x,y de cada punto topográfico y la altura del terreno respecto al nivel de mar. El total de puntos muestreados de esta manera es 4500.

### TECNICAS DE INTERPOLACION

Se observó que la característica más sobresaliente de los datos gravimétricos, aeromagnéticos y topográficos es la irregularidad en su espaciamiento así como su mala distribución dentro del área de trabajo. Así, la tarea principal para la obtención de las imágenes correspondientes a este tipo de datos es la obtención de una matriz rectangular, en donde es de suponerse que los datos esten igualmente espaciados y regularmente distribuidos.

Se utilizaron varios métodos de interpolación para la obtención de dichas matrices entre los que podemos citar son: inverso del cuadrado de la distancia, splines cúbicos, vecino más próximo y kriging.

La última técnica nos ofreció mejores resultados para los casos de gravimetría y magnetometría, mientras que el Vecino más Próximo fue la más apropiada para el caso topográfico.

El resultado de esta etapa se traduce en la creación de una matriz numérica correspondiente a cada conjunto de información inicial, siendo las dimensiones de dichas matrices 512 líneas sobre 512 columnas.

## TRANSFORMACION DE VALORES INTERPOLADOS A PIXELS

Otro problema que se presenta en esta etapa de preparación de la información a formatos imagen es que de acuerdo a necesidades de memoria de computadora y del software utilizado y programado, cada pixel debe estar contenido dentro de un byte de ocho bits, es decir, entre los valores enteros de 0 y 255. Si observamos el rango de valores para los parámetros: gravimetría, magnetometría y topografía vemos que con mucho desbordan los límites mencionados (de 0 a 255), así que se tendrá que recurrir a un muestreo y a un escalamiento de los valores originales mediante la función siguiente:

$$z(k,l) = ( Z(x,y)-ZMIN ) * \{ 220 \text{ ver } (ZMAX-ZMIN) \} + 20$$

Donde:

$z(k,l)$  es un valor entero comprendido entre 20 y 220 (dentro de un byte) con una variación de 200 niveles de gris (rango dinámico).

$Z(x,y)$  es la intensidad inicial del parámetro en estudio.

$ZMAX$  es el valor máximo del parámetro bajo estudio, el cual corresponde al tono más claro de la imagen (color blanco).

$ZMIN$  es el valor mínimo del parámetro bajo estudio, el cual corresponde al tono más oscuro de la imagen (color negro).

En la figura II.1 se muestra gráficamente la función de transferencia, que en este caso está representada por una línea recta, para pasar de valores reales e interpolados (eje horizontal), a valores imagen o pixels (eje vertical). El algoritmo en el que se basa la generación de imágenes en

niveles de gris a partir de las variables geofísicas, consiste en convertir los elementos de la malla interpolada a números enteros de 8 bits como máximo, los cuales mediante una simple transformación lineal se hacen corresponder a un rango determinado de tonos de gris que puede variar de entre 0 y 255 (256 niveles) como máximo; para ello se toman el valor máximo de los datos, haciéndose coincidir con el nivel mas alto (en el caso de escoger 255, este sería el valor mayor para los datos) y al mínimo le corresponde normalmente el cero; siendo para el dato de mayor valor el tono mas claro y para el mínimo el más oscuro. Los valores intermedios, se distribuirán en forma lineal con los demás tonos correspondientes a su valor en bits.

A continuación se presentan los pasos y las funciones de transformación para cada uno de los casos de estudio:

Debido a la altura variable y a la orografía del terreno que dependen del tipo y dureza de las rocas predominantes sobre la superficie, los afloramientos volcánicos tienen mayor influencia de los efectos de la erosión que los afloramientos de las rocas calizas y por lo tanto generan bajos topográficos representados por los niveles de gris oscuros de la imagen, al contrario de las zonas con rocas sedimentarias calcáreas. Las imágenes topográficas se parecen a la realidad visual, destacando principalmente las texturas de las partes montañosas y los altos gradientes y acantilados. También se detecta la planicie de altura intermedia presente en la parte Oeste con orientación N-S dominando una extensión considerable por un mismo tono de gris.

### III.2.5.- IMAGENES DE SATELITE.

Se examinó cada uno de los dos canales disponibles de la imagen Landsat-MSS, conteniendo 2983 líneas por 3596 columnas cada uno, es decir, 10'726,868 pixels por canal. Dado que se trata de una imagen demasiado grande para trabajarla eficazmente con nuestro sistema de cómputo, se procedió a dividirla en nueve partes de 1000 líneas por 1000 columnas cada una (para almacenarla en disquetes de 1.2 megabytes).

Como siguiente paso se procedió a visualizar cada una de las divisiones para tratar de encontrar la región de trabajo, poco después se logró encontrarla y se recuperó una imagen de 1024

por 1024 pixels la cual coincidió con el prospecto. Finalmente, se re-muestreó esta última en un pixel sobre dos (tanto en columnas como en renglones) para tener una imagen de 512 líneas sobre 512 columnas compatible con las otras cuatro imágenes.

La información observada y registrada por la imagen Landsat-MSS depende fuertemente del coeficiente de reflexión de ondas radiométricas para los materiales distribuidos sobre la superficie terrestre. Las imágenes Landsat-MSS contienen información radiométrica de un rectángulo de aproximadamente 68 Km de largo por 55 Km de ancho, donde cada pixel tiene una geometría cuadrada y una resolución espacial de 140 m de lado, es decir, de 19600 m<sup>2</sup>

### **III.3.- TELEDETECCION**

Dentro del contexto de investigaciones geológicas se considera que los datos de sensores remotos, primero se analizan ya sea manualmente o por técnicas del AVAC (Análisis Visual Asistido por Computadora), posteriormente se interpreta su posible significado geológico. En consecuencia, los aspectos geométricos y espectrales de la imagen son considerados implícitamente al inferir información geológica.

Precediendo a la interpretación de las relaciones geológicas de los datos de sensores remotos, éstos deben ser agrupados de acuerdo con sus aspectos espectrales y subsecuentemente reducidos a elementos geológicamente correlacionables. En este contexto, los datos clasificados o agrupados espectralmente, traen como consecuencia, que los aspectos espaciales sean reconocibles más fácilmente sobre la imagen, ya que tendrán la misma etiqueta o el mismo color. Las clasificaciones espectral y espacial constituyen las dos fases de procedimientos analíticos a los cuales se refieren como "Análisis e Interpretación de Imágenes Digitales".

#### **III.3.1.- PROCEDIMIENTOS ANALITICOS DE INTERPRETACION POR FOTOGEOLOGIA.**

Cuando las imágenes digitales se clasifican por analogía o por algoritmos automáticos, los tonos de gris o sus equivalentes en color representan medidas cualitativas o cuantitativas, obtenidas a partir del comportamiento espectral-espacial de los diversos objetos contenidos dentro de la imagen.

En las imágenes en falso color, los colores presentados se producen por la superposición proporcional de los tres colores primarios: rojo - verde - azul. Se eligen tres bandas de un satélite, por ejemplo, las bandas MSS-5, MSS-6 y MSS-7 de Landsat-2 y luego, se asigna una banda para cada color primario, por ejemplo, MSS-5 para el rojo, MSS-6 para el verde y MSS-7 para el azul, finalmente se cruzan los tres falsos colores para obtener la imagen correspondiente. En este tipo de presentación de imágenes se aprovecha de que el ojo humano puede discernir diferentes objetos de entre dos millones de tonos de color, mientras que si la imagen fuera monocromática sólo distinguiría hasta 16 tonos de gris. Adicionalmente, la detección analítica del material o los objetos relacionados por el tono de color o de gris a que ha sido distribuido en la imagen, depende de varios factores: 1) el contraste del color en contra de los alrededores, 2) la uniformidad alrededor de los colores, 3) la diferencia en extensión entre el color y su fondo, 4) la extensión del color y, 5) las características de resolución espectral-espacial de los ojos del analista. Respecto al último punto se debe de considerar: a) el cambio de escala de trabajo, ya que si aumenta la escala de la imagen entonces decrecen los tamaños de áreas detectables, b) las características de resolución espectral-espacial del sensor remoto, c) las características de distinción espectral-espacial de los ojos del analista y, d) las características de radiación electromagnética de todos los objetos presentes sobre la superficie del terreno. Los argumentos presentados son de mucha importancia para dilucidar las limitaciones propias del análisis de la información proporcionada por el sensor remoto.

La capacidad de un sensor remoto, incluido el ojo humano, para distinguir espectralmente un objeto está en función de: 1) las características del detector del sensor remoto, es decir, de las resoluciones espectral y espacial de éste, 2) el área que ocupa el objeto respecto a las características del sensor remoto, 3) la forma, distribución y orientación de los objetos respecto a la posición de la fuente de energía y del sensor remoto, 4) el contraste de coeficientes de reflexión o emisión entre el objeto y sus alrededores, 5) la trayectoria seguida por la radiación electromagnética entre el material y el sensor remoto y, 6) las características radiométricas de la atmósfera entre la fuente de energía y los objetos distribuidos sobre la superficie del terreno y la existente entre estos últimos y el sensor remoto.

Cuando se realizan trabajos empleando imágenes de satélite por técnicas del PNID, el interprete, deberá concentrar su atención principalmente en ciertos grupos tonales o en grupos de falsos colores, así como en su relación con eventos geológicos importantes. El interés en dichos grupos en lugar de objetos individuales es comprensible si se considera la enorme variedad en la composición física natural de los materiales distribuidos sobre la superficie del terreno. El integrar y

agrupar visualmente tonos similares dentro de un sólo intervalo espectral se conoce como un corte de densidad. Así, los grupos tonales delineados representan rangos de brillantez dentro de la imagen. La clasificación de los diversos grupos tonales de colores es el principal producto derivado por el analista y una vez que se correlacionan dichos grupos con eventos geológicos, entonces se lleva a cabo la interpretación de la imagen propiamente dicha.

### III.3.2.- INTERPRETACION DE LAS IMAGENES DE SATELITE

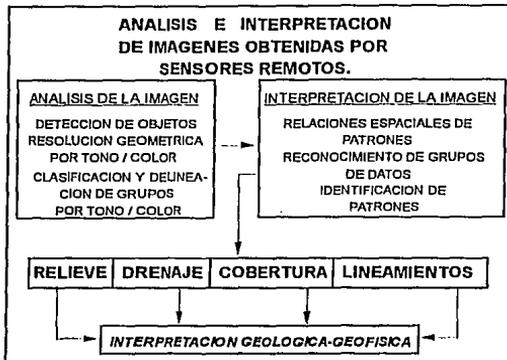
Un subproducto importante de la etapa del Análisis de la imágenes, se localiza en las relaciones espaciales resultantes de la cartografía de los grupos espectrales, los cuales forman patrones espaciales de objetos. Dichas relaciones de patrones espaciales permiten que el analista, interprete su significado geológico, a través del reconocimiento de formas y de la firma espectral.

En función de la distribución topográfica y de los materiales sobre la superficie del terreno, el interprete puede evaluar aspectos espectrales adicionales, es decir, se pueden identificar todas aquellas relaciones espectrales de los objetos mediante las sombras causadas por la iluminación diferencial debida a los rasgos topográficos y aquellas que son causadas por la distribución en el área de los materiales sobre la superficie del terreno. Al realizar una separación de los rasgos topográficos respecto a los materiales sobre la superficie del terreno, el interprete puede inferir dos grupos de patrones que pueden correlacionarse geológicamente, conocidos como patrones de relieve y patrones de cobertura.

Los patrones de relieve se determinan por la correlación existente entre los grupos de datos relacionados espacialmente con la topografía del terreno, sin hacer referencia al tipo de material presente sobre el terreno. Los límites de los patrones de relieve en las imágenes de satélite, por lo general, se definen por un cambio abrupto en la pendiente que puede ser deducido a través del conocimiento de las sombras generadas por la iluminación diferencial del terreno.

Los patrones de cobertura se determinan por medio de los grupos espectrales que se correlacionan con: los aspectos espectrales de cada objeto que compone al grupo, a las propiedades de reflexión o emisión de los materiales sobre la superficie del terreno y la posición topográfica de los objetos individuales. Aunque muchas veces se tenga un efecto de la topografía sobre el tipo de

material que se encuentra presente, no es un parámetro significativo para establecer su presencia o sus límites.



#### III.4.- METODOLOGIA DE LA INTEGRACION E INFERENCIA INTERPRETATIVA

El objetivo básico de la interpretación integrada de gravimetría y magnetometría es la de explicar la relación entre esta información, en función de distribuciones de mapas anómalos y relacionarlos con estructuras geológicas. El éxito de la interpretación depende entre otros factores del conocimiento geológico que se tenga del área.

En este trabajo se cuenta con la posibilidad de sobreponer las diferentes imágenes para hacer inferencias interpretativas que es su principal objetivo y la contribución real del mismo.

### III.4.1.- INTERPRETACION DEL DESPLIEGUE DE LAS IMAGENES DIGITALES PROCESADAS

#### IMAGEN TOPOGRAFICA

La parte relativa a la interpretación permite identificar los objetos o entidades temáticamente significativas en función de sus medidas geométricas, de su respuesta espectral, de su textura y de su forma, así como de sus relaciones espaciales con los otros objetos y entidades.

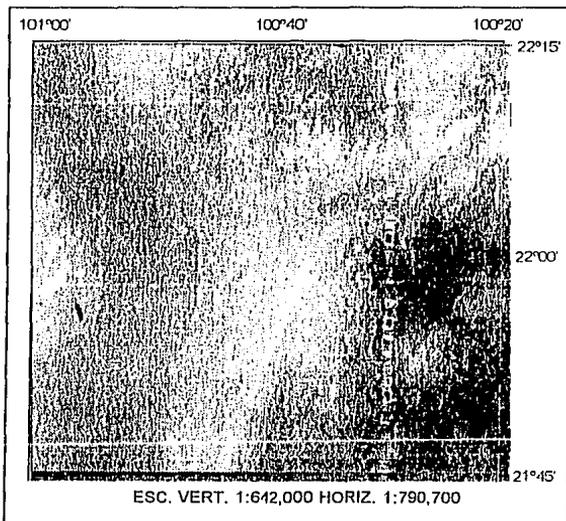


IMAGEN TOPOGRAFICA.

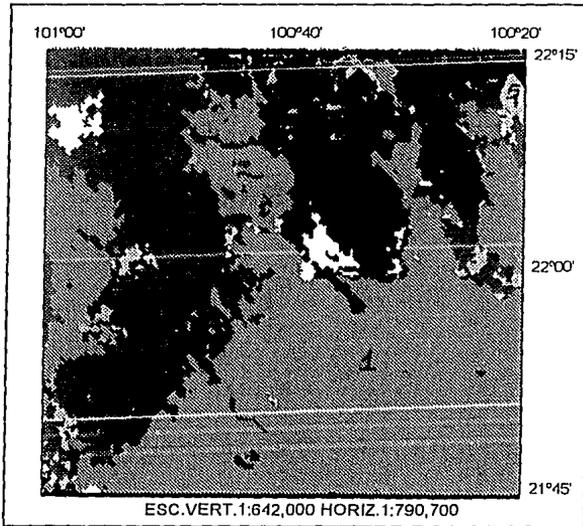
IMAGEN (1)

Debido a la altura variable y a la orografía del terreno que depende del tipo y dureza de las rocas predominantes sobre la superficie, los afloramientos volcánicos tienen mayor influencia de los efectos de la erosión que los afloramientos de rocas calizas y por lo tanto generan bajos topográficos representados por los niveles de gris oscuros de la imagen, al contrario de las zonas con

rocas sedimentarias calcáreas. Las imágenes topográficas se parecen a la realidad visual, destacando principalmente la textura de las partes montañosas y los allos gradientes o acantilados. También se detectan las planicies de altura intermedia presente en la parte Oeste con orientación Norte-Sur dominando una extensión considerable por un mismo tono de gris.

Considerando la cantidad de datos digitalizados de las cartas topográficas de INEGI, la imagen (1) se tomó como base para hacer las diferentes correcciones geométricas a las demás imágenes involucradas en este trabajo, para poder hacer el análisis interpretativo conjunto de dichas imágenes.

### IMAGEN GEOLOGICA



### IMAGEN GEOLOGICA.

### IMAGEN (2)

Debido a que solo existen 5 poblaciones dentro de ésta imagen al aplicar las operaciones de derivadas verticales, se obtuvo una imagen de los contornos o contactos entre dos litologías diferentes, es decir, se obtuvo una imagen de contactos geológicos.

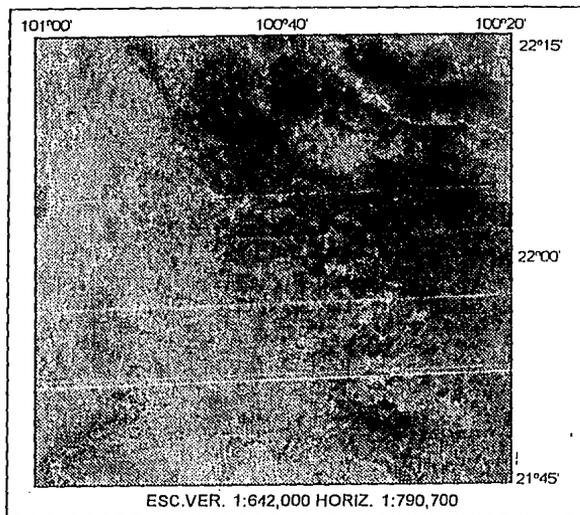
Se digitalizó una malla de 512 líneas por 512 columnas, mediante la técnica de seguimiento de contornos por medio de un ratón, en donde se muestrearon las siguientes litologías predominantes dentro de la región de estudio:

<b>CODIGO</b>	<b>LITOLOGIA</b>
<b>0</b>	-----
<b>1</b>	<b>MATERIAL VOLCANICO</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL RECIENTE (ALUVION)</b>
<b>3</b>	<b>ROCAS CRETACICAS</b>
<b>4</b>	<b>ROCAS METAMORFICAS</b>
<b>5</b>	<b>ROCAS JURASICAS</b>

Posteriormente, se aplicó la función de muestreo y escalamiento:  $z(k,l) = Z(x,y)$  ( la imagen quedó intacta ). Luego, se calculó el histograma (calculando la superficie en pixels para cada tipo de roca aflorante), la función de cuantificación corresponde al caso aleatorio, ya que se generó una paleta de 7 colores en donde cada color coincide con el de la carta geológica editada por el I.N.E.G.I.

#### **IMAGEN DE SATELITE.**

Debido a que los fenómenos naturales; vegetación, rocas aflorantes, aluvión, mantañas, etc. están fuertemente mezclados sobre la superficie terrestre, y que éstos se encuentran presentes dentro de una imagen radiométrica, entonces al interpretar la 1a. o 2a. derivadas de una imagen satélite, se deben tomar ciertas precauciones para no confundir fenómenos.



**IMAGEN DE SATELITE (3).**

En esta imagen se infieren una serie de fallas de corrimiento lateral de grandes dimensiones que en la etapa de fallamiento descrito por geología superficial no han sido identificadas y que aportan un interés especial debido al conocimiento de rutas de migración de hidrocarburos que a profundidad pueden proporcionar.

1.- Sistema con dirección NW-SE que afecta prácticamente toda el área que comprende la imagen [marcado con el número I en la imagen (4)].

2.- Sistema con dirección NE-SW que afecta principalmente las rocas ígneas extrusivas y en un menor grado se manifiesta en las rocas sedimentarias [marcado con el número II en la imagen (4)].

3.- Un tercer sistema se ubica con dirección burda N-S y que afecta principalmente las rocas tanto ígneas como sedimentarias de los sectores Central y Oriental de la imagen (marcado con el número III).

4.- Finalmente con orientación E-W afectando a la mayoría de las rocas con excepción de las que se ubican en el sector NW.

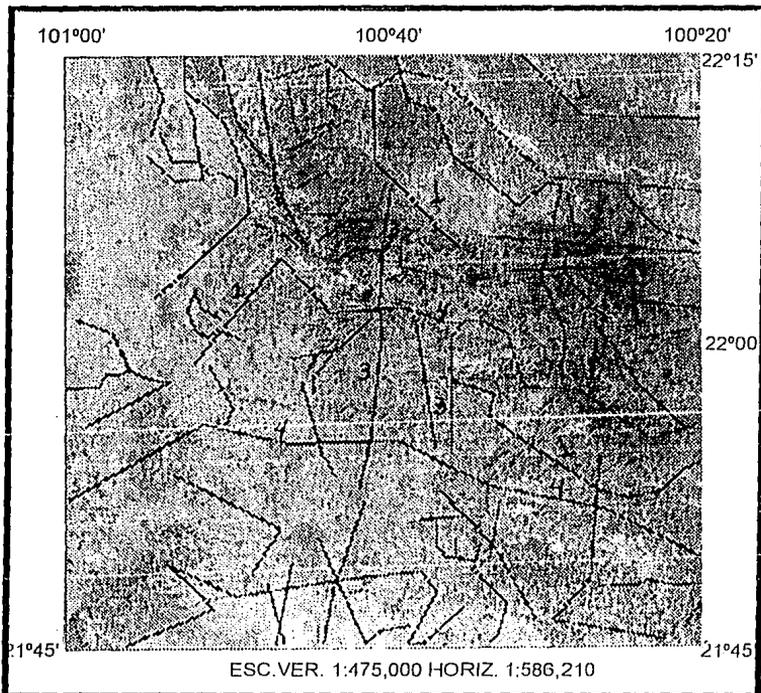


IMAGEN DE SATELITE CON LA DESCRIPCION DE LOS PRINCIPALES ALINEAMIENTOS.

IMAGEN (4)

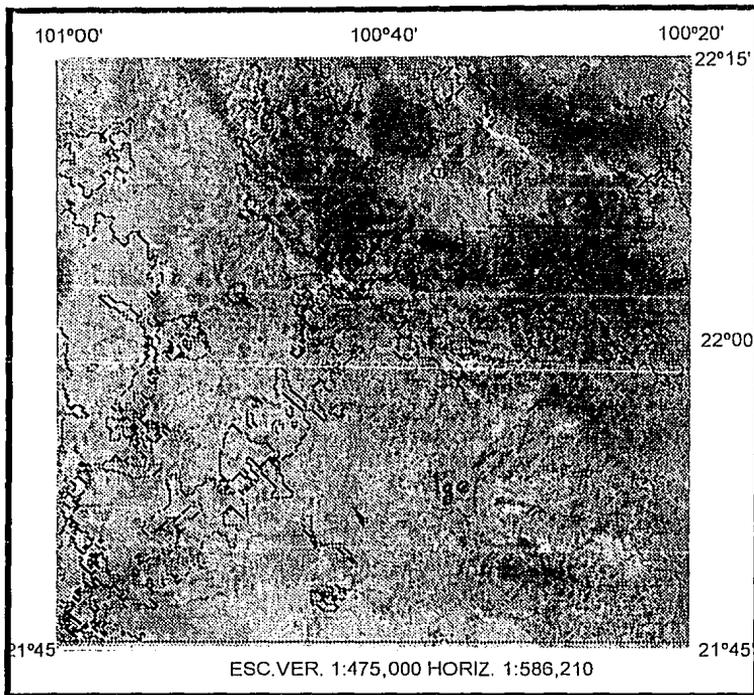


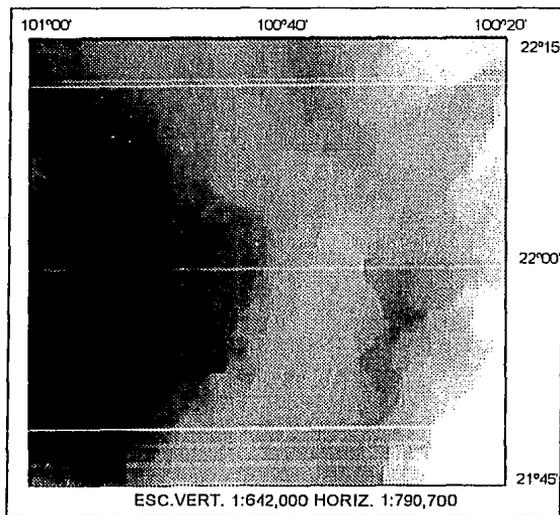
IMAGEN DE SATELITE CON CONTACTOS GEOLOGICOS

IMAGEN (5)

En esta imagen se ilustra los diferentes contactos geológicos interpretados con lo que pretendemos tener un análisis comparativo con la imagen geológica de las cartas obtenidas en INEGI.

CODIGO	LITOLOGIA
0	-----
Q	CUATERNARIO
Ige	IGNEO EXTRUSIVO
Sed	ROCAS SEDIMENTARIAS
Igi	IGNEO INTRUSIVO

### IMAGENES GRAVIMETRICAS



**IMAGEN DE ANOMALIA DE BOUGUER**  
**IMAGEN (6)**

En la imagen (6) de Anomalía de Bouguer, las Anomalías más pequeñas (menores a un radio de 20 pixels), podrían deberse a cuerpos de dimensiones reducidas, mientras que las de extensión intermedia se podrían deber a cuerpos interesantes sepultados, debido a que se presenta un cambio litológico en dirección Este-Oeste. Por lo tanto el comportamiento de la Anomalía de Bouguer

se puede prestar para realizar interpretaciones erróneas, ya que se tiene la tendencia a disminuir hacia la parte Oeste, lo cual se puede correlacionar con el comportamiento de las rocas aflorantes que muestran esta misma tendencia (disminución de densidad hacia la misma zona), sin embargo, existen indicios por medio de pozos que llevan a pensar la existencia de material sedimentario subyaciendo la cubierta volcánica en la parte Sur del área de trabajo. Recordemos que el mayor número de onda (menor longitud de onda) de la Anomalía de Bouguer corresponde al espaciamiento promedio entre las estaciones gravimétricas.

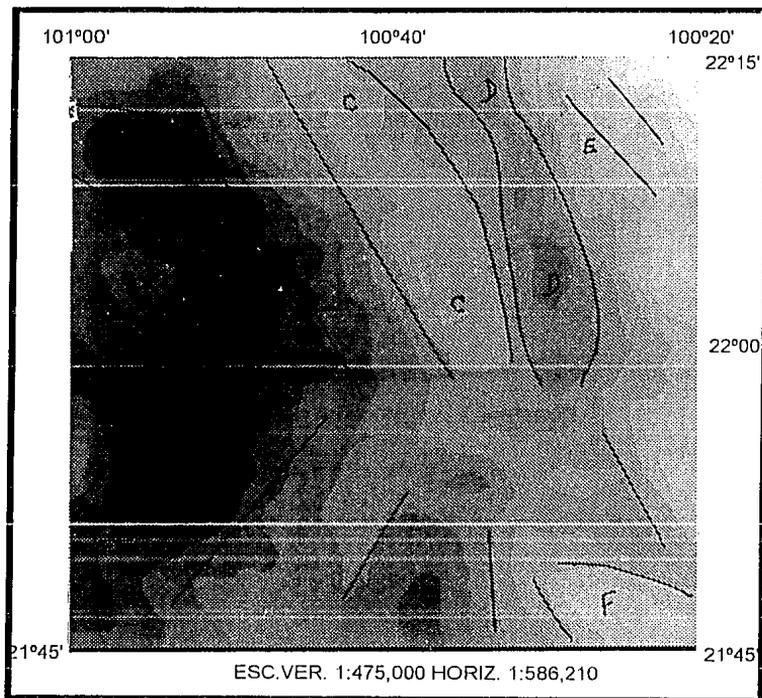
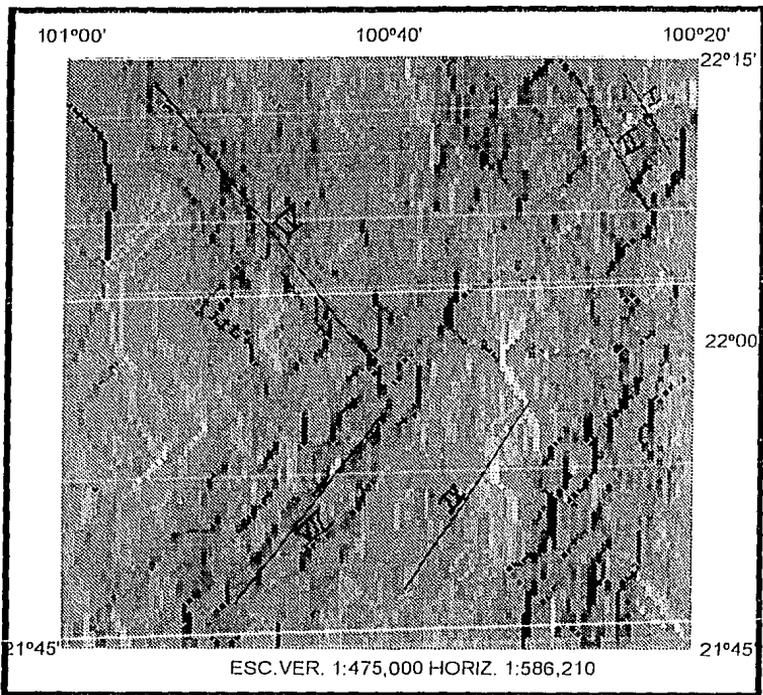


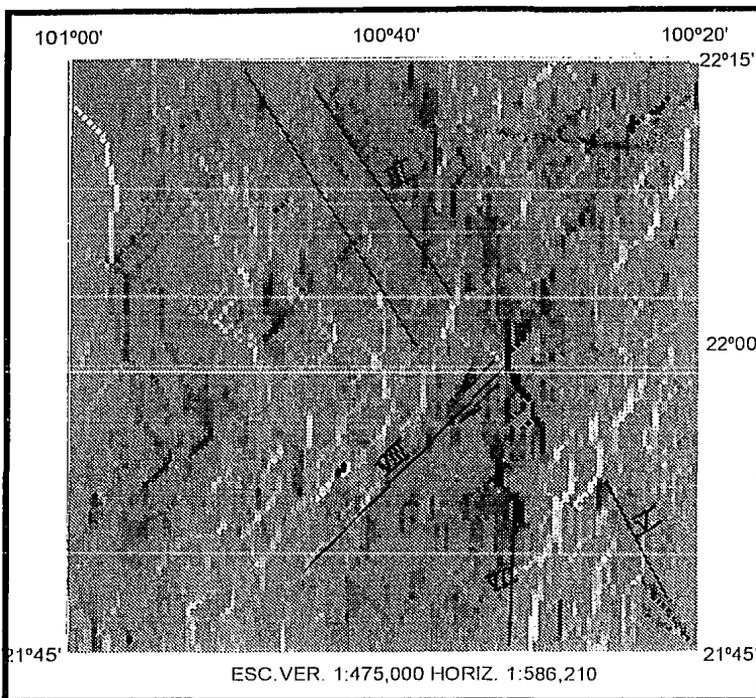
IMAGEN DE A.B. INTERPRETADA

IMAGEN (7)



**ANOMALIA DE BOUGUER CON ILUMINACION ARTIFICIAL (64 TONOS DE GRIS, INCLINACION DE LA FUENTE LUMINOSA 45°, DECLINACION DE LA FUENTE 0°)**

**IMAGEN (8)**



**ANOMALIA DE BOUGUER CON ILUMINACION ARTIFICIAL (64 TONOS DE GRIS, INCLINACION DE LA FUENTE LUMINOSA 60°, DECLINACION DE LA FUENTE 0°)**  
**IMAGEN (9)**

Con las imágenes gravimétricas (6,7,8 y 9), se realizó la parte interpretativa de mayor peso debido a que en su conjunto proporcionan más detalles. Como puede observarse las imágenes iluminadas a 45° y 60°, permiten detectar más fácilmente anomalías con dirección NE-SW, esto es útil debido a que una gran cantidad de anomalías tienen esta orientación en ésta área.

## ANALISIS CUALITATIVO.

La imagen de Anomalía de Bouguer (6) se caracteriza por tener una tendencia preferencial NE-SW, con fuerte gradiente hacia la porción NE, incrementándose negativamente hacia el Occidente.

A continuación se describen los rasgos gravimétricos y fallas más importantes detectadas en el área de estudio apoyados por las imágenes (6,7,8 y 9) en tonos de gris de la Anomalía de Bouguer con y sin iluminación artificial.

### ANOMALIA "A".

En la porción Sur-Occidental del área (al Sur de la Ciudad de San Luis Potosí, S.L.P.) se ubica un alto gravimétrico de patrón amplio e irregular con amplitud aproximado de 50 U.G., sin orientación definida y cubriendo una área aproximada de 75 Km . La anomalía se asocia geológicamente con la presencia de rocas ígneas extrusivas (riolitas).

### ANOMALIA "B".

Bordeando en sus porciones Norte, Este y Sur a la anomalía anterior, se presenta un trend gravimétrico negativo con amplitud aproximada de 100 U.G. Su orientación deflexiona de una posición NW-SE (en su porción Norte, Cd. de San Luis Potosí, S.L.P.) a SW-NE en su porción Sur. Geológicamente corresponde a la presencia de rellenos cuaternarios en el valle que circunda a la Cd. de S.L.P.

### ANOMALIA "C".

En la porción central, cruzando de Norte a Sur, se presenta un trend de anomalías positivas también con dos orientaciones preferenciales de NW-SE en su porción Norte y de NE-SW en

la Sur, con amplitud máxima cercana a los 200 U.G. Geológicamente esta Anomalía se presenta como uno de los rasgos más distintivos en el área, se asocia superficialmente al conjunto de pliegues anticlinales y sinclinales que definen a la Sierra de Álvarez.

El pozo Tolentino-1 situado en la porción SE de la parte Norte de esta anomalía (imagen 7), penetró más de 3000 m de rocas evaporíticas de la formación Guaxcama (Kinf.) con una alta densidad ( $2.75 \text{ g/cm}^3$  según lo indican los registros geofísicos). Atribuyéndose a este potente paquete la fuente principal, que a profundidad, tendría la citada anomalía.

Las líneas isoanómalas que definen el trend gravimétrico, se presentan con un comportamiento irregular, sobre todo en su porción sur, en que podría asociarse tal comportamiento a la probable presencia de "rocas de cuenca cabalgantes sobre las de plataforma" tal como ha sido postulado por estudios de geología superficial [PEMEX, I.G.-707, Pérez, B.(1989)], uno de cuyos bloques cabalgantes se localizaría al NE de la población San Francisco, S.L.P.

Lateralmente hacia el Occidente, el trend analizado decrece en un abrupto gradiente que enmascara los efectos de fallamiento inverso y la presencia de cuerpos ígneos extrusivos (Latita "Portezuelos"). Es precisamente este fuerte gradiente, que evidencia un marcado contraste lateral de masa y/o densidad, el que puede ser considerado como el posible límite entre las unidades geológicas de la Plataforma de Valles-San Luis P., y Cuenca Mesozoica de la Mesa Central, hecho respaldado por los estudios de geología superficial y la información aportada por los pozos Xoconoxtle-1 y Tolentino-1 (los cuales cortaron rocas de edad Cretácico Inferior, de cuenca y de plataforma respectivamente), situados a ambos flancos del gradiente anómalo analizado.

#### ANOMALIA "D".

En forma paralela y al Oriente de la Anomalía anterior, se localiza un trend gravimétrico negativo con orientación preferencial NW-SE en la parte Norte del área, deflexionándose en forma semejante al trend de Alvarez hacia la parte Sur (tendencia NE-SW). Este trend se relaciona con afloramientos de rocas ígneas extrusivas riolíticas al NW de Santa Catarina, S.L.P., e ignimbritas y/o la inferencia de un mayor espesor de los cuerpos ígneos justificarían, en su porción SE, la mayor

amplitud de esta anomalía (es probable que esta anomalía sea originada por la cercanía del intrusivo detectado con magnetometría).

#### ANOMALIA "E"

Al Oriente de la parte Norte de la anomalía negativa definida en el inciso anterior, se presenta un fuerte gradiente que manifiesta un aumento de la atracción gravitacional en la porción NE del prospecto (hoja F-14-A-85), no se manifiesta una relación directa de este evento y la geología superficial (se presentan derrames ígneos ríolíticos, afloramientos de las Formaciones Abra y Tamasopo así como rellenos Cuaternarios de Aluvión), debiendo establecerse a profundidad la analogía correspondiente a partir de un cambio lateral de masa y/o densidad de las rocas cretácicas en dirección del mayor efecto gravitacional. En particular, la suma de dos efectos parecen justificar el comportamiento de esta anomalía: a) Los registros geofísicos indican un aumento en la densidad de la formación Guaxcama para el pozo Guaxcama-1 ( $2.85 \text{ gr/cm}^3$ ) en relación al pozo Tolentino-1 ( $2.75 \text{ gr/cm}^3$ ), situados al Oriente y Occidente respectivamente del gradiente analizado. b) Un aumento de la atracción gravitacional, producto de una disminución en la profundidad a la cima de la Formación Guaxcama, situándose los primeros afloramientos de esta misma formación al Oriente del gradiente referido.

#### ANOMALIA "F".

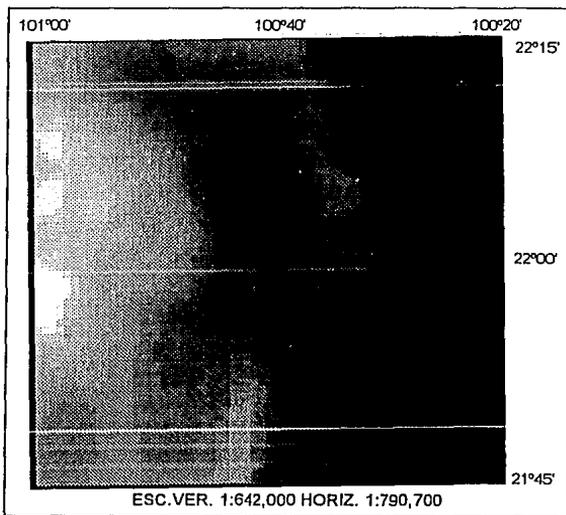
En la porción SE observamos un trend de máximos con tendencia SE-NW, asociado con la geología superficial al probable intrusivo Palo Verde clasificado como un granito alcalino.

#### FALLAS.

En la misma región estamos infiriendo dos fallas marcadas en la imagen con los números I y II con caída al Oriente y con dirección NW-SE. Con la misma orientación se han detectado las posibles fallas III, IV y V, ubicadas las dos primeras en la parte Norte-Centro del prospecto y la última en la porción SW del mismo. La falla VI la ubicamos en la porción SW y la VII en la SE y son con orientación NE-SW con caída también hacia el Occidente. Se infirieron también un

par de fallas de trascurrencia marcadas con los números VIII y IX con orientación NE-SW, dichas fallas fueron evidenciadas de acuerdo a las deflecciones que muestran los ejes de las anomalías (trend de anomalías asociado a la Sierra de Alvarez (Anomalía "C") y el trend negativo paralelo al mismo (Anomalía "D"). Ver Imagen (7).

La componente regional de la imagen, representa los efectos de los cuerpos (contrastes laterales de densidad) más profundos, sin embargo, existen áreas en donde es difícil discernir entre componentes regionales y residuales, debido a la presencia de efectos fuertes (profundos o someros) que enmascara la demás información.



**IMAGEN DE ANOMALIA REGIONAL DE ANOMALIA DE BOUGUER (10)**

Uno de los avances más importantes para decidir la frecuencia de corte en la separación regional-residual, fue dado por Spector y Grant (1970), quienes analizando el logaritmo natural del espectro radial de potencias de un plano, demostraron bajo la hipótesis de que los efectos medidos son producto de conjuntos de cuerpos prismáticos, caracterizados por las propiedades promedio de los cuerpos que los constituyen, entre ellas la profundidad. En consecuencia el logaritmo

del espectro radial de potencias presenta dos o más sectores de pendiente aproximadamente constante, cuyo valor se relaciona con la profundidad promedio del conjunto que predomina en esa parte del espectro. En este trabajo se aplicó este principio tanto en la separación Regional-Residual gravimétrica como en la magnetométrica (Fig. III.2).

La imagen del mapa regional de Anomalía de Bouguer, se muestra muy drástico, en el que las anomalías han sido atenuadas, apareciendo únicamente la tendencia general del plano, siendo ésta la misma que ya fue descrita en la anomalía de Bouguer.

Las anomalías de longitud de onda corta, generalmente son atribuidas a efectos de estructuras geológicas someras. Mediante un filtrado espectral conveniente, es posible eliminar las componentes regionales del campo potencial involucrado, dejando únicamente anomalías residuales. Este residual se hizo restando del plano de Anomalía de Bouguer la continuación ascendente (Regional). Debido a lo drástico del regional, la imagen del residual es muy parecida a la imagen de la Anomalía de Bouguer, por lo que consideramos nuevamente la gran influencia que ejercen los derrames ígneos superficiales en la gravimetría del área.

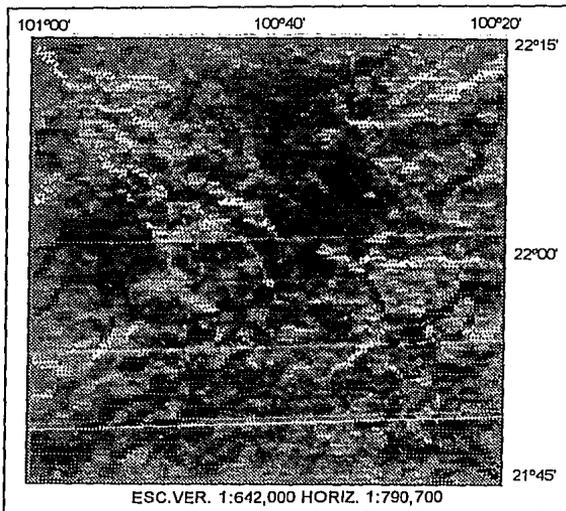


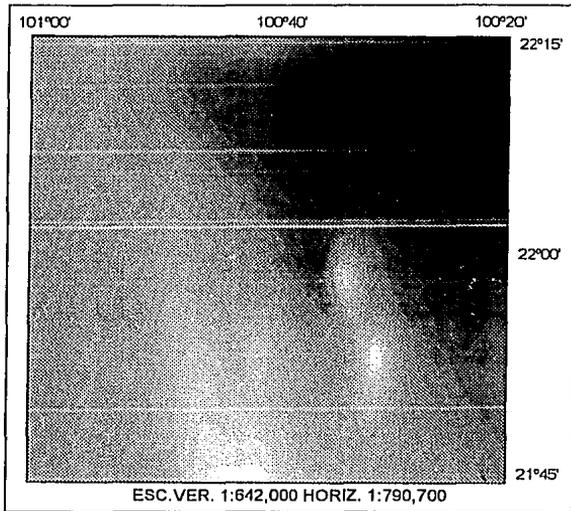
IMAGEN DE LA ANOMALIA RESIDUAL DE ANOMALIA DE BOUGUER  
 IMAGEN (11)

**IMAGENES MAGNETOMETRICAS.**

Mediante el análisis cualitativo de la imagen de Intensidad Magnética Total (12), podemos apreciar que las líneas isoanómalas no tienen un gradiente bien definido, oscilando sus valores de 9600 hasta 9975 gammas.

La imagen nos muestra una mayor concentración en la zona SE, en la que se observa un dipolo (marcado en la imagen 12) que asociamos a un intrusivo de grandes dimensiones. La parte NW representa la zona donde probablemente existe la mayor profundidad del basamento ya que los valores en la Intensidad Magnética Total son los más uniformes en la imagen representando poco contraste en la intensidad coloreada. Además se observan pocos cuerpos volcánicos aflorando. La influencia de los derrames ígneos superficiales según se muestra en la imagen fueron eliminados mediante la elección de la altura de vuelo con la que fueron obtenidos los datos, por lo que

consideramos existe una fuerte capa de sedimentos entre el basamento y dichos derrames extrusivos, con excepción de la parte SE en donde se muestra la presencia del intrusivo descrito anteriormente.



**IMAGEN DE INTENSIDAD MAGNETICA TOTAL**  
**IMAGEN (12)**

Estamos infiriendo también con la ayuda de las imagenes (13 y 14) de gradiente horizontal y vertical una serie de fallas de desplazamiento lateral así como normales (no pudiendose distinguir entre normales o inversas), marcadas mediante F(número romano) las primeras y con F(número arábigo) las segundas. En el plano configurado de basamento se marcan también estas fallas.

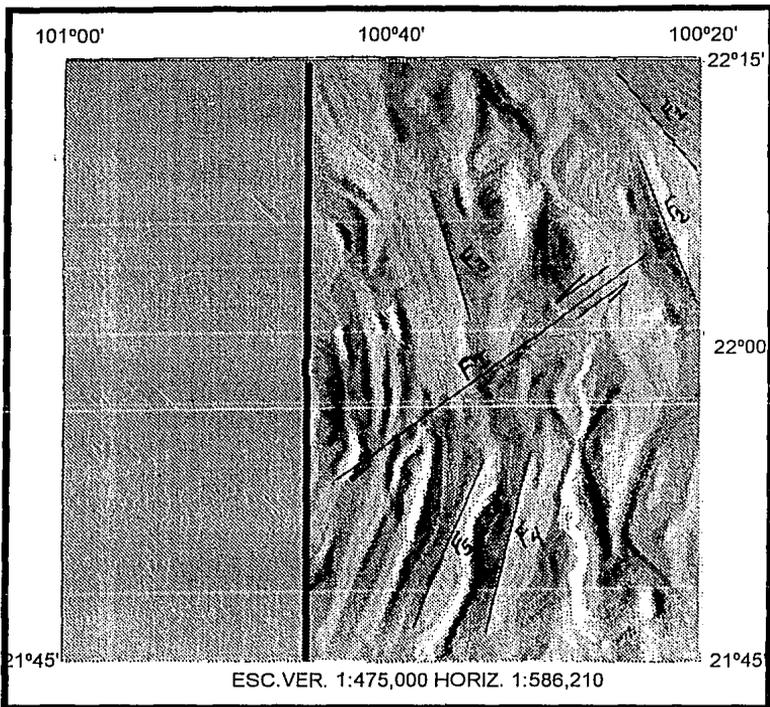


IMAGEN DEL GRADIENTE X DE LA INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL

IMAGEN (13)

Los operadores para los filtros utilizados para obtener las imágenes de los gradientes gravimétrico y magnetométrico vertical y horizontal, fueron:

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

FIG III.3

Los gradientes son métodos simple que auxilia al Intérprete en la delineación de las características geológicas asociadas a variaciones laterales en las mediciones de los campos potenciales involucrados, como pueden ser fallas geológicas de cualquier tipo, cambios laterales de propiedades físicas del basamento y/o paquete sedimentario, zonas de fracturas, límites de cuerpos intrusivos, etc. (Correa, 1990).

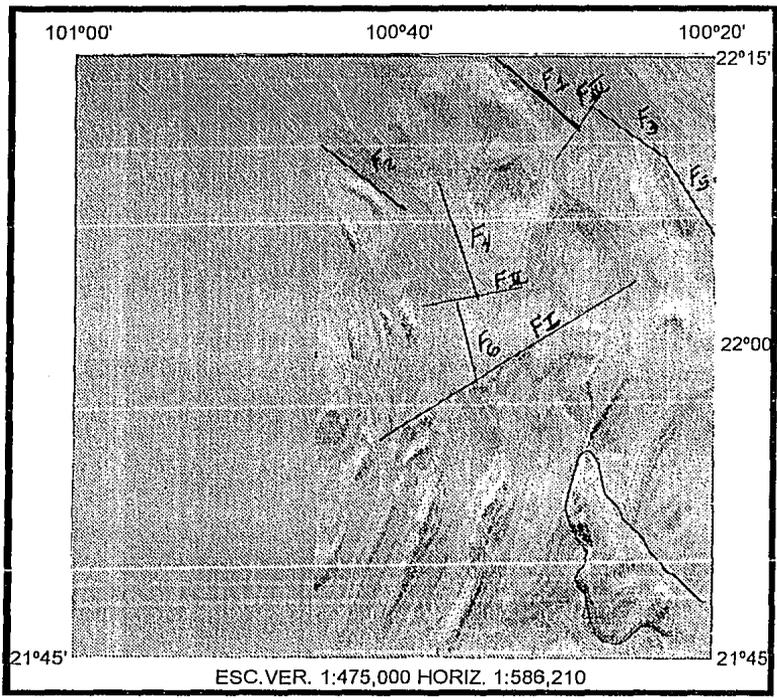


IMAGEN DEL GRADIENTE Y DE LA INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL  
 IMAGEN (14)

En magnetometría, al unir puntos de máximo gradiente horizontal positivo, se estará delineando el aspecto geológico asociado al gradiente presente.

Análiticamente, el gradiente horizontal se define como la variación del campo potencial involucrado, con respecto a la distancia horizontal ( $U_g/Km-Gammas/Km$ ) representándose bidimensionalmente como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivadas del campo en la dirección  $x,y$ .

## IMAGENES REGIONAL-RESIDUAL DE INTENSIDAD MAGNETICA TOTAL

Existe una relación fundamental entre el número de onda y la profundidad de anomalías magnéticas y gravimétricas (Bhattacharyya, 1968) que puede ser utilizada en la separación de sus componentes Regional y Residual.

Aunque la separación es aproximada, el espectro de frecuencias de una anomalía no es función única de la profundidad de la fuente, sino también de la geometría de ésta. Sin embargo, la imagen regional, es de gran ayuda al intérprete, ya que le es útil en la eliminación de anomalías de fuentes someras.

Ya que, en el área de estudio están presentes un gran número de derrames ígneos, cuyo efecto magnético se traslapa con el efecto de los cuerpos basamentales; se probaron varios filtros regionales, obteniéndose después de varias pruebas uno cuya representación nos pareció la idónea, la imagen de dicho regional nos muestra en forma confiable la ubicación exacta del intrusivo mencionado anteriormente y la configuración probable del basamento.

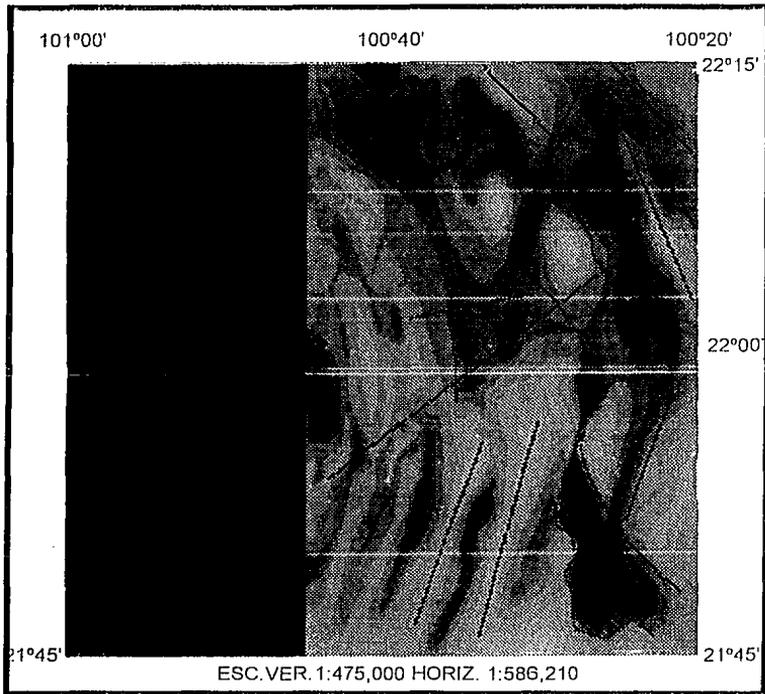
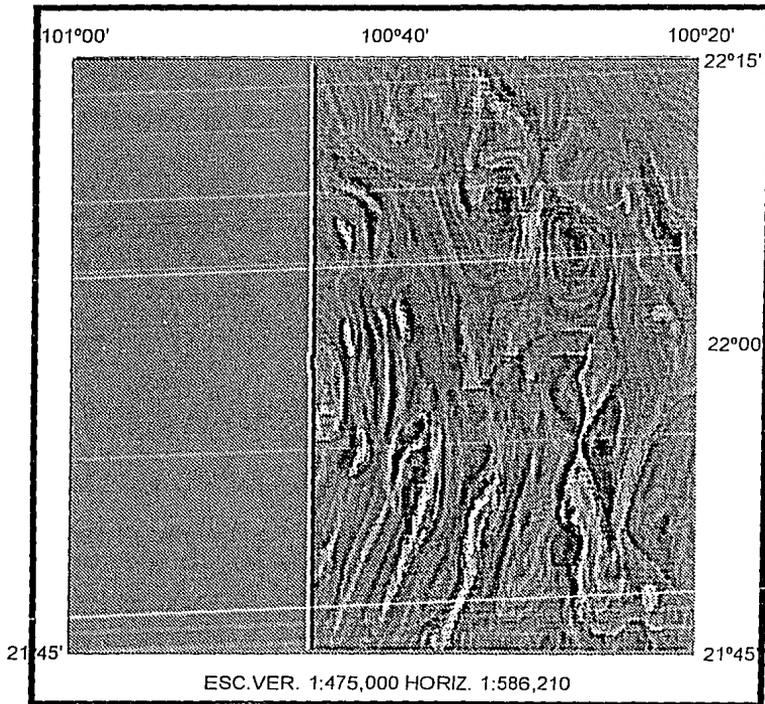


IMAGEN DE INTERPRETACION MAGNETOMETRICA INTEGRADA  
IMAGEN (15)

Cuando por alguna razón se presentan dificultades en la separación en los componentes de las anomalías, mediante la aplicación de filtros convencionales (pasa-altos, pasa-bajos o pasa-bandas), los obtenidos de las derivadas, son útiles para mejorar la resolución de anomalías de fuentes someras, particularmente cuando los contrastes en propiedades físicas son bajos, o cuando las fuentes implicadas son de tipo suprabasamental. El proceso de segunda derivada, implicó la convolución de los datos en el dominio del espacio, con un operador mostrado en la fig. III.3. Este proceso representa la relación del cambio vertical de variación del campo potencial involucrado, con la profundidad al cuadrado ( $\text{Gammas}/\text{Km}^2$ ); acentuando el efecto de estructuras pequeñas someras a expensas de la tectónica regional, mejorando la resolución de anomalías de alta frecuencia que se traslapan en el mapa original. En el plano de segunda derivada vertical, se aprecia el enfatizamiento de las anomalías de longitud de onda corta, facilitando diferenciar las zonas

caracterizadas por la presencia de derrames de rocas ígneas extrusivas de la zona exentas de estos derrames.



LAPLACIANO DE INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL  
IMAGEN (16)

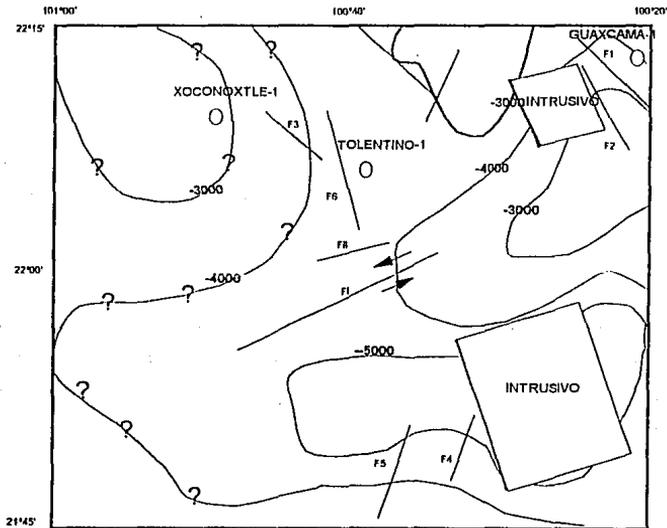
Esta imagen nos sirvió para comprobar la influencia que tienen los derrames ígneos en el campo magnético.

El filtro utilizado para obtener el Laplaciano fue:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 4 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### ESTIMACION DE PROFUNDIDAD.

Como primera aproximación, se procedió a realizar el cálculo de profundidad sobre la mayoría de las anomalías principales presentes en el plano original de Intensidad Magnética Total (Aeroservice 1978, 1979) utilizando los tradicionales métodos empíricos como el de Peter's (1949). Como resultado final se logró configurar un plano de basamento magnético del área en el cual estamos infiriendo todos y cada uno de los eventos tectónicos considerados en las imágenes magnetométricas.



PLANO DE BASAMENTO MAGNETICO (ESC. GRAFICA)

### III.4.2.- INTERPRETACION DE IMAGENES COMPUESTAS.

Como se mencionó en capítulos antecedentes, la principal contribución que presenta este trabajo es el de poder hacer inferencias interpretativas sobreponiendo imágenes desplegadas tanto en el monitor como en papel a través de la impresora, pudiendo hacerse a color o con tonos de gris; en nuestro caso se contó con una impresora Lasser con la que se obtuvieron las imágenes en tonos de gris por lo que la interpretación de sobreposición de imágenes en papel se dificultó, teniendo que tomar imágenes de dos en dos y una de ellas (la sobrepuesta) manejarla mediante contornos, que no se confundieran con los rasgos de la imagen inferior. En cuanto a la desplegada en el monitor nos fue posible hacerlo mediante las imágenes integradas totalmente.

En el anexo E presentamos todas las combinaciones posibles de imágenes con contornos, por lo que el lector interesado en alguna combinación no tratada en este apartado podrá remitirse a él para observar dicha combinación.

El primer juego de imágenes que consideramos, fue la sobreposición de anomalía de Bouguer sobre la imagen magnetométrica (imágenes 17,18,19 y 20); en ellas observamos como principales rasgos en la porción SE la coincidencia que existe entre el intrusivo magnético y el Máximo "F" de la anomalía de Bouguer.

En la parte NW de la imagen magnética (recordemos que esta imagen no cubre la totalidad del área), se observa que el Máximo gravimétrico "C" no tiene ninguna representación sobresaliente magnéticamente, debido a la casi nula respuesta magnética de las rocas evaporíticas de la formación Guaxcama.

En la porción Norte al centro de la imagen magnetométrica, se observa un dipolo que asociamos gravimétricamente al fuerte gradiente existente en la misma área con caída hacia el Oeste, este intrusivo puede ser el causante también de la Anomalía "D" (Mínimo gravimétrico) hacia dicha porción Oeste y del Máximo (Anomalía E) hacia la parte Este de la imagen de Anomalía de Bouguer.

El conjunto de fallas (VIII y IX en la imagen de Anomalía de Bouguer) de desplazamiento lateral coincide con la falla (F1 de la imagen de intensidad magnética total) también de desplazamiento lateral, por lo que sugerimos que es un evento que afecta desde el basamento hasta la superficie, coincidencia que también se hace manifiesta con las fallas (I y III) gravimétricas con (F1 y F3) magnetométricas.

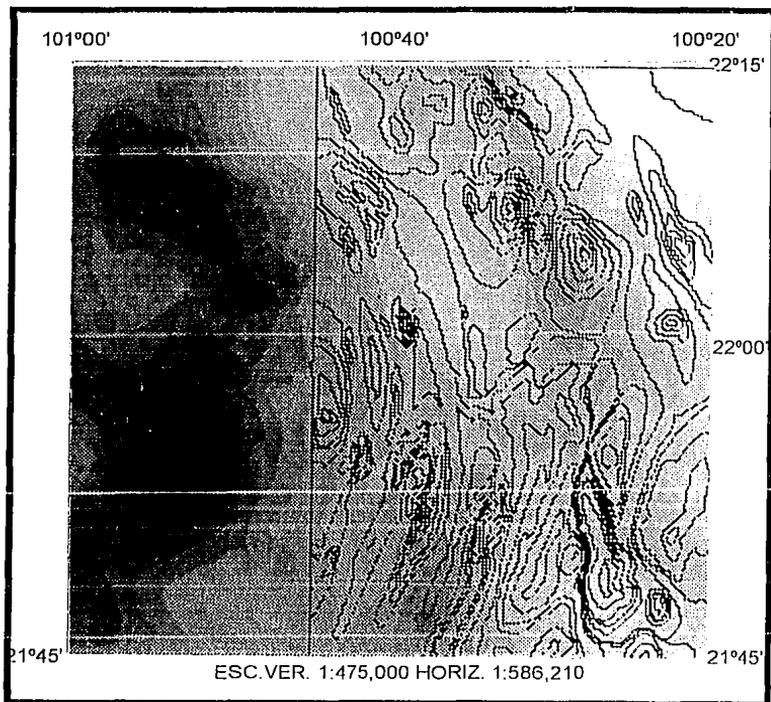


IMAGEN COMPUESTA ANOMALIA DE BOUGUER-CONTORNOS DE INTENS.MAG.TOT.  
IMAGEN (17)

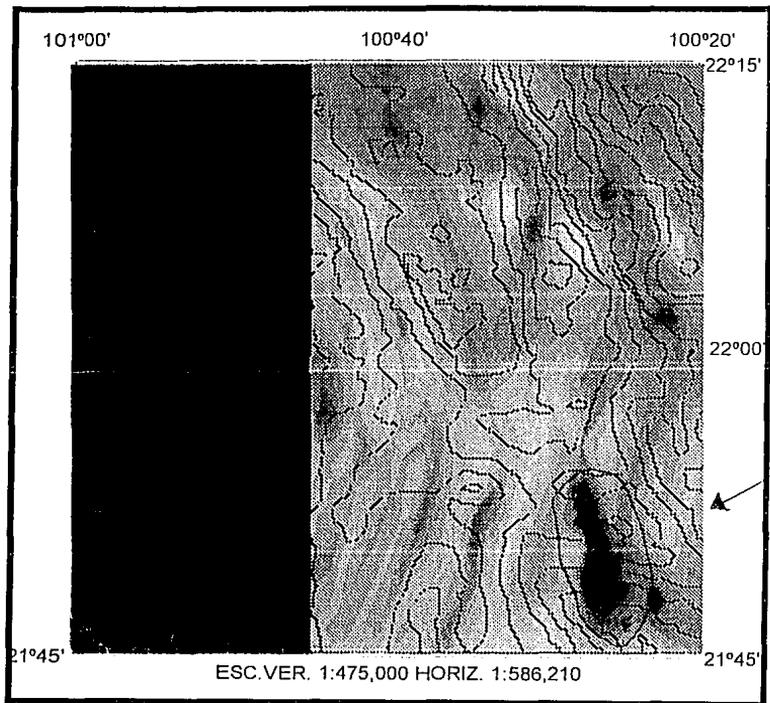


IMAGEN COMPUESTA INT.MAG.TOT.-CONTORNOS DE ANOMALIA DE BOUGUER  
IMAGEN (18)

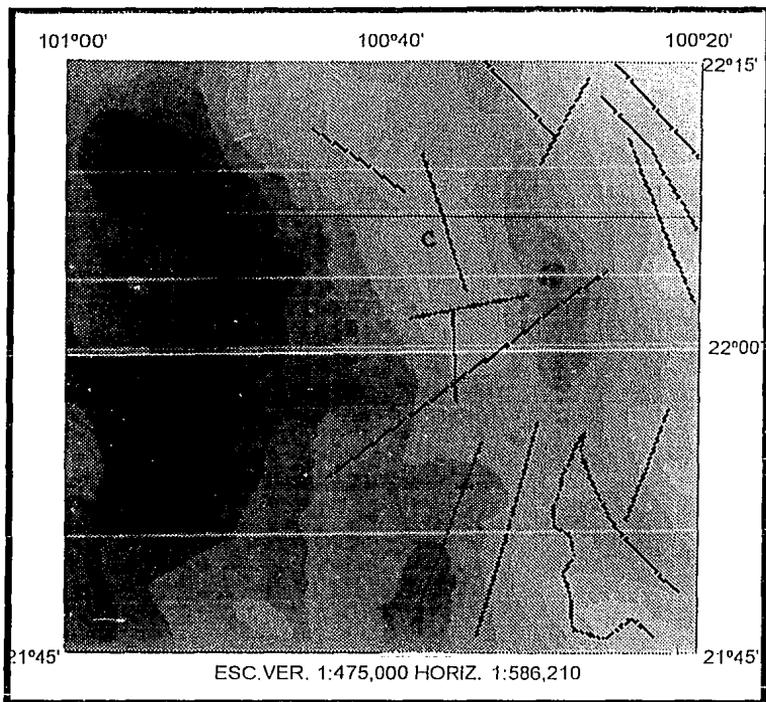


IMAGEN COMPUESTA ANOMALIA DE BOUGUER-LINEAMIENTOS DE INT.MAG.TOT.  
IMAGEN (19)

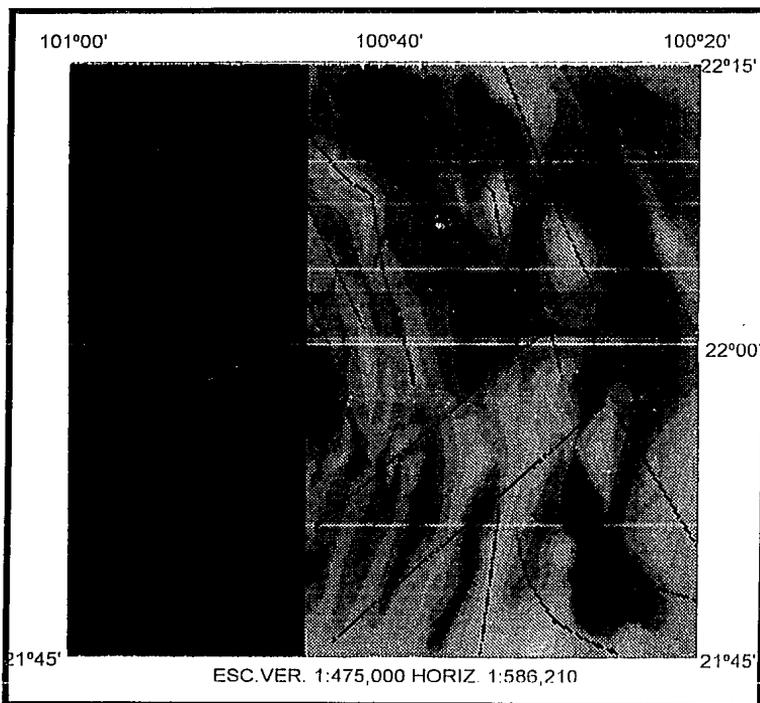


IMAGEN COMPUESTA INT.MAG.TOT.-LINEAMIENTOS DE ANOMALIA DE BOUGUER  
IMAGEN (20)

## IMAGENES COMPUESTA (ANOMALIA DE BOUGUER-GEOLOGIA)

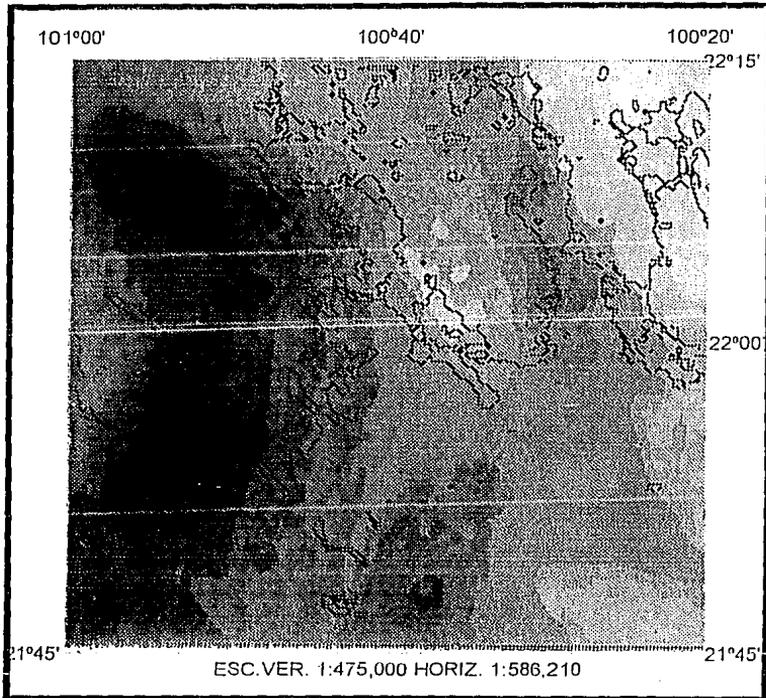


IMAGEN COMPUESTA ANOMALIA DE BOUGUER-CONTACTOS DE GEOLOGIA  
IMAGEN (21)

La geomorfología y la topografía de un área son el resultado del efecto combinado de las fuerzas tectónicas y de los procesos de erosión sobre las formaciones geológicas. En función de estas acciones las rocas tienen una cierta apariencia sobre las imágenes que podrían ser descritas como: resistentes o degradadas; masivas, estratificadas o en bancos de espesor variable; tubulares, inclinadas, verticales, etc.; fracturadas o no fracturadas y; plegadas o falladas, lo mismo que le da una densidad determinada. Por otro lado, la gravimetría tiene como función describir los cambios de densidad ocurridos en su representación como anomalías, pero aplicados al conocimiento geológico del área, de ahí, la importancia de esta combinación de imágenes.

Las inferencias interpretativas realizada con este juego de imágenes, así como el apoyo que dan la magnetometría y los pozos perforados en el área ya fueron discutidos tanto en la imagen de anomalía de Bouguer como en la combinación de las imágenes de anomalía de Bouguer y la de intensidad magnética total, por lo que el lector puede remitirse a ellas para constatar la valía de la superposición de estas imágenes (imágenes 21,22 y 23).

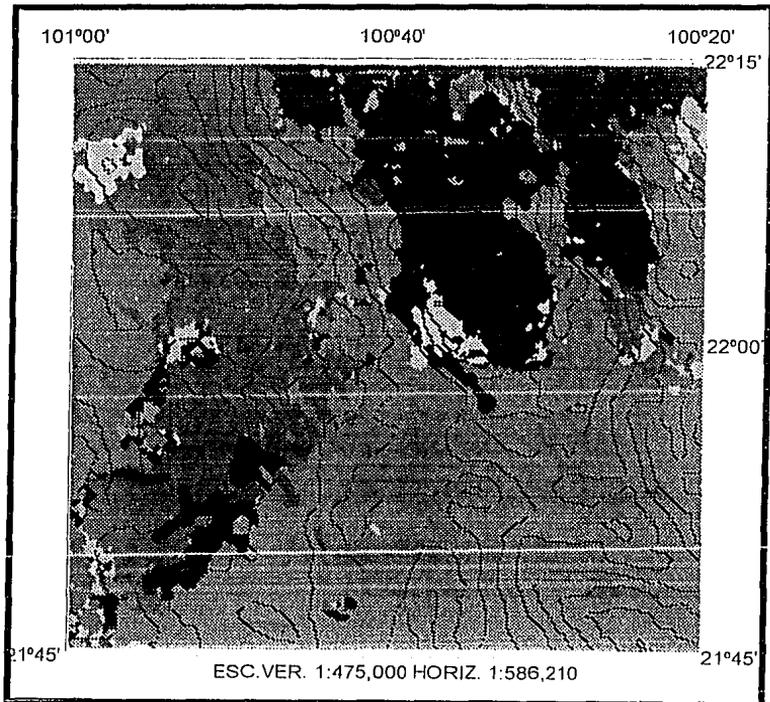


IMAGEN COMPUESTA GEOLOGIA-CONTORNOS DE ANOMALIA DE BOUGUER.

IMAGEN (22)

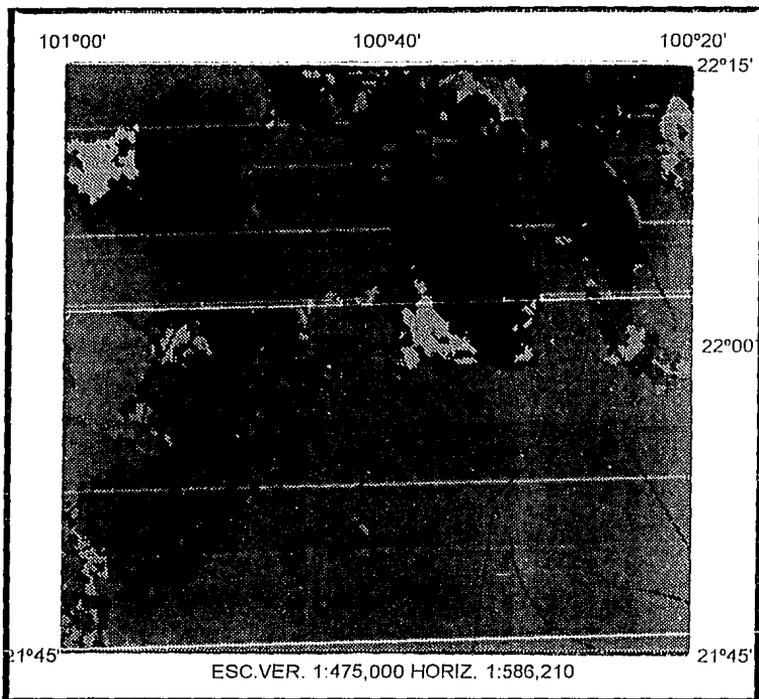


IMAGEN COMPUESTA LINEAMIENTOS DE ANOMALIA DE BOUGUER-GEOLOGIA.

IMAGEN (23)

IMAGENES COMPUESTAS ANOMALIA DE BOUGUER-SATELITE

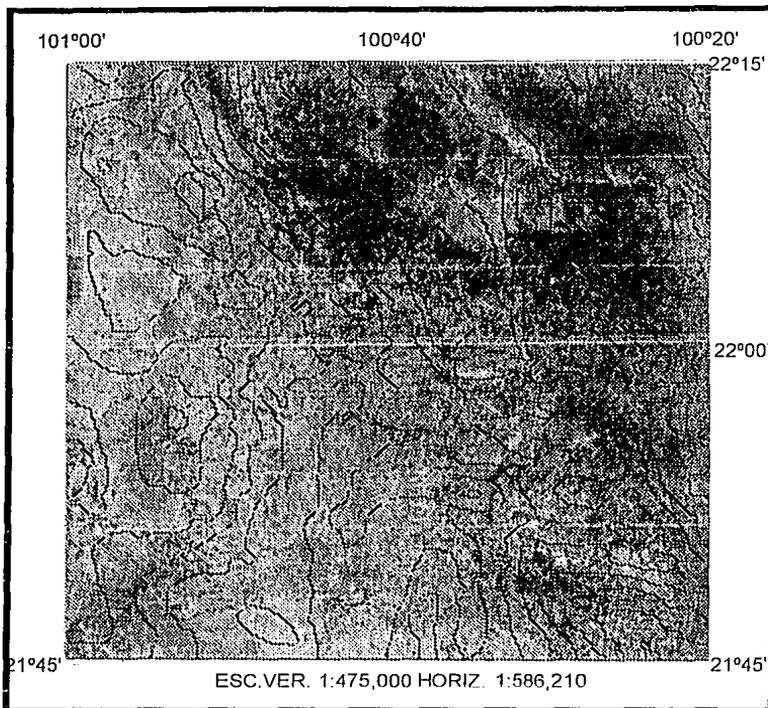
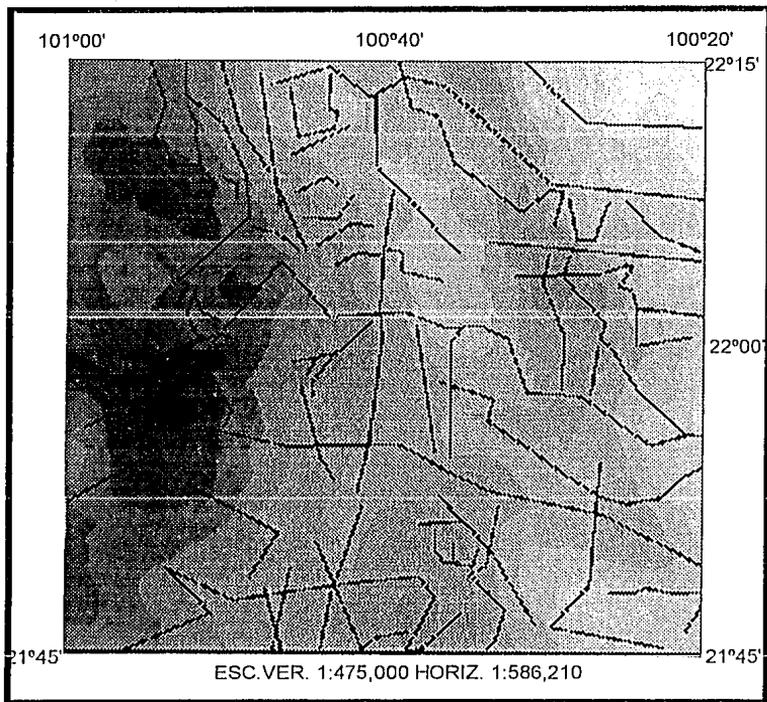


IMAGEN DE SATELITE-CONTORNOS DE ANOMALIA DE BOUGUER

IMAGEN (24)



**IMAGEN ANOMALIA DE BOUGUER-LINEAMIENTOS DE LA IMAGEN DE SATELITE  
IMAGEN (25)**

Los eventos descritos en la relacion entre la anomalía de Bouguer y la imagen geológica bien pueden ser aplicados en estas imágenes (imágenes 24,25 y 26), obsérvese como las anomalías gravimétricas en la parte Oeste de la imagen de Salélite coinciden con el extrusivo ígneo y con el valle que lo circunda (material reciente), así como los fuertes gradientes de la anomalía de Bouguer están presentes en los contactos geológicos entre el material reciente y los calizas que caracterizan a la Sierra de Alvarez...

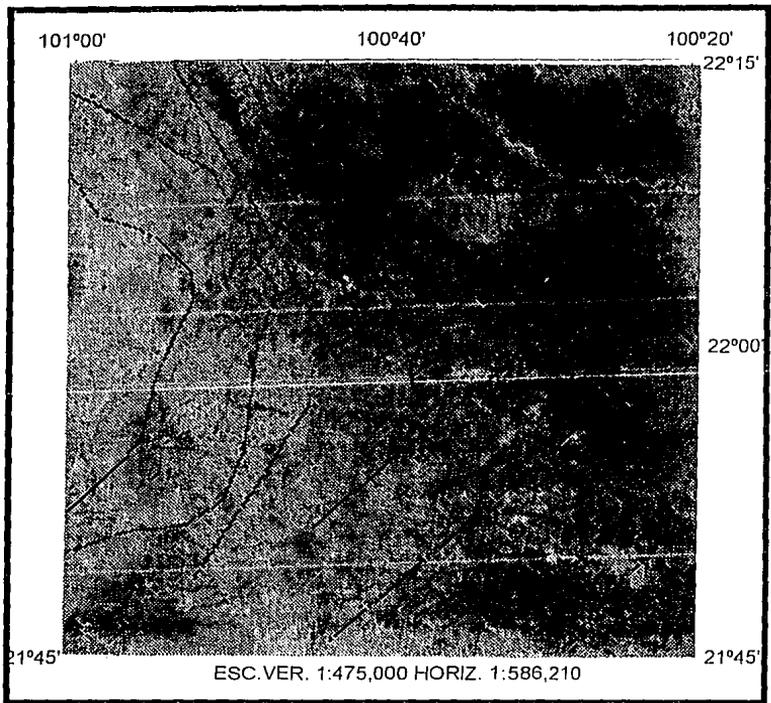


IMAGEN DE SATELITE-LINEAMIENTOS DE ANOMALIA DE BOUGUER  
IMAGEN (26)

IMAGENES COMPUESTAS ANOMALIA DE BOUGUER-TOPOGRAFIA.

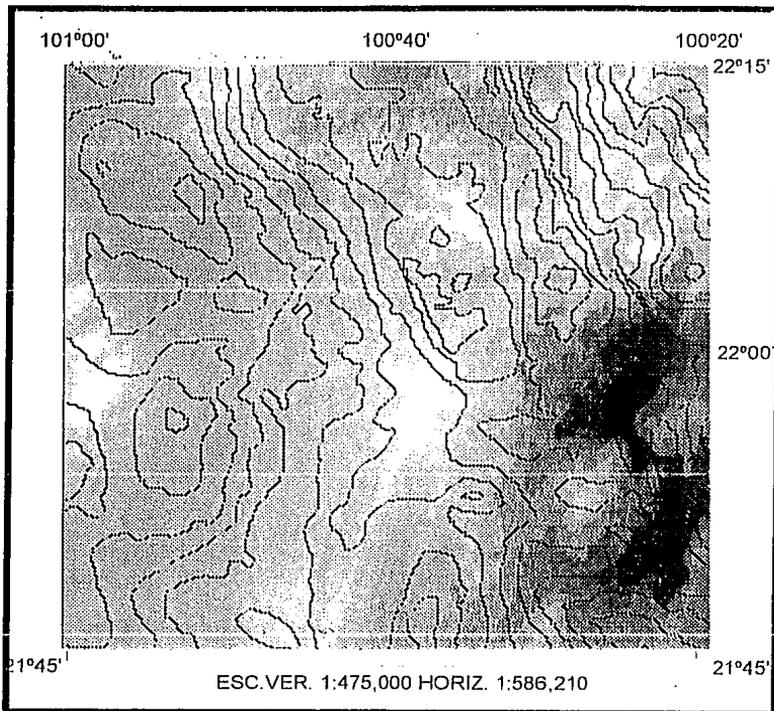


IMAGEN COMPUESTA TOPOGRAFIA-CONTORNOS DE ANOMALIA DE BOUGUER  
IMAGEN (27)

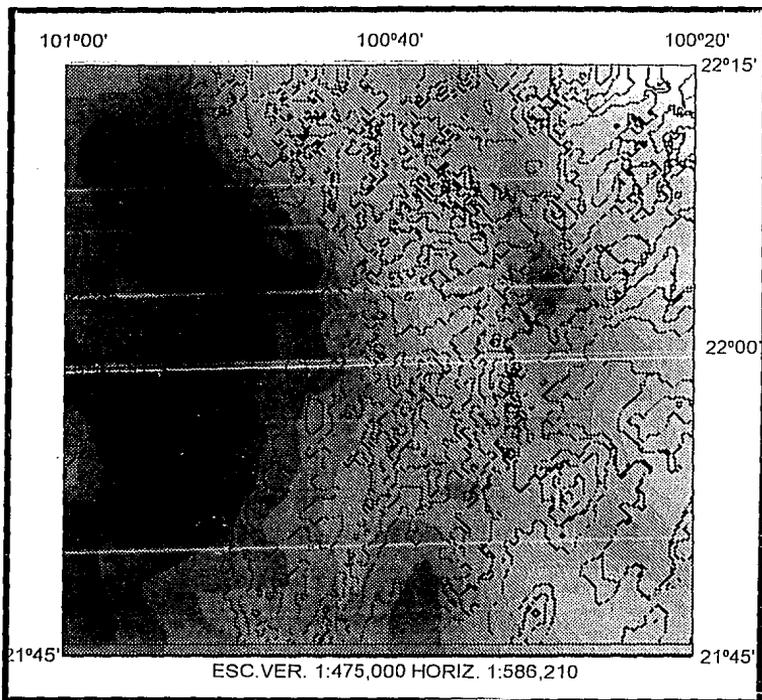
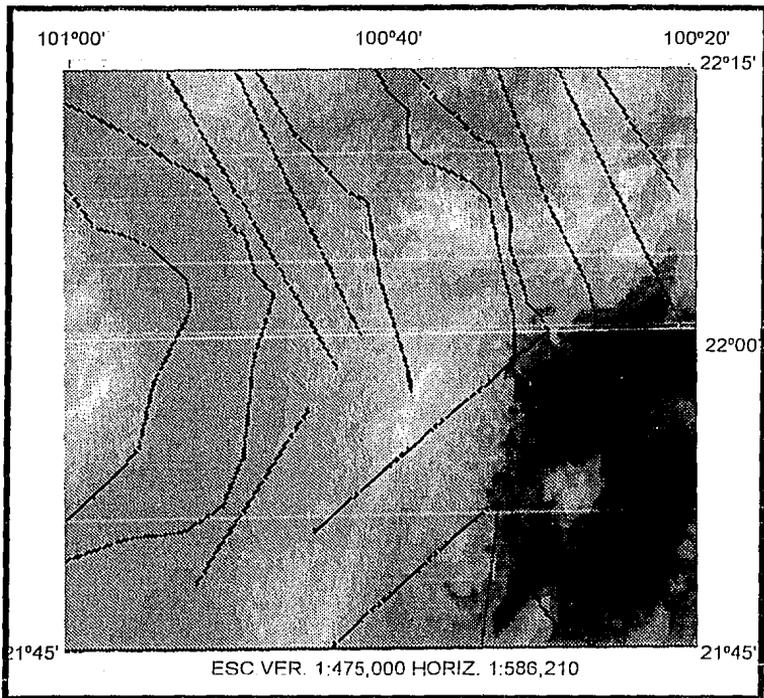


IMAGEN DE ANOMALIA DE BOUGUER-CONTORNOS DE TOPOGRAFIA  
IMAGEN (28)



**IMAGEN TOPOGRAFICA-LINEAMIENTOS DE ANOMALIA DE BOUGUER**  
**IMAGEN (29)**

En las imágenes (27,28 Y 29), puede observarse la gran influencia que tiene la topografía sobre la anomalía de Bouguer, algunos de los rasgos interpretados como anomalías coinciden con rasgos predominantes topográficamente, sobre todo en la porción Oeste de la imagen, el máximo gravimétrico "A" pertenece a un alto topográfico, así como el valle que circunda a dicho alto con el trend de mínimos marcado como "B"; más sin embargo el restante comportamiento topográfico difiere de las anomalías gravimétricas descritas anteriormente.

Esto es importante debido a que puede comprobarse mediante esta imagen, la efectividad de la corrección topográfica realizada.

## IMAGENES COMPUESTAS CON LA IMAGEN DE SATELITE.

Las siguientes imágenes requieren una atención especial, debido a la importancia que reviste el hecho de complementar los afloramientos geológicos en muchos casos inaccesibles y que la imagen de satélite nos presenta, además la ventaja de combinar dicha imagen de satélite con todas las demás disciplinas involucradas en la interpretación.

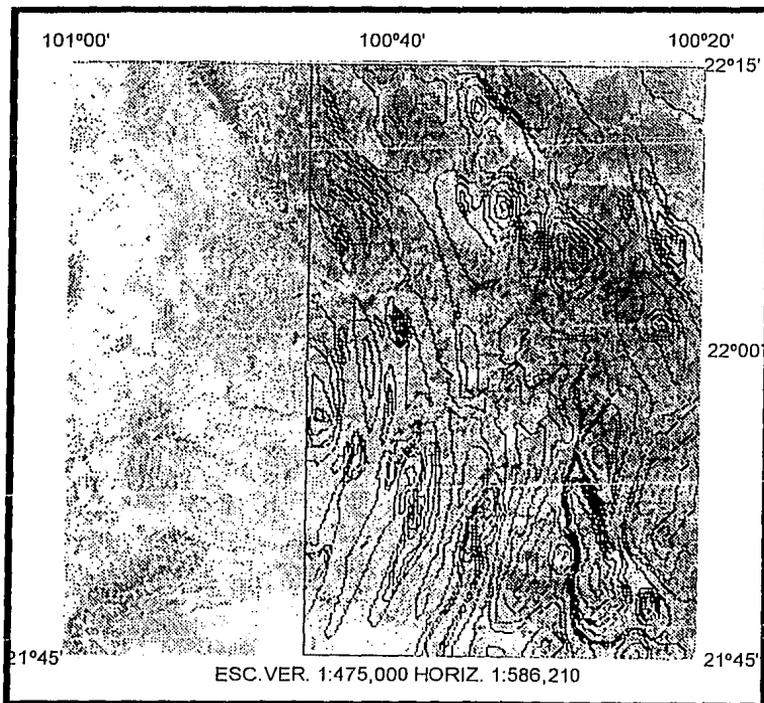


IMAGEN DE SATELITE-CONTORNOS DE INT.MAGNETICA TOTAL  
IMAGEN (30)

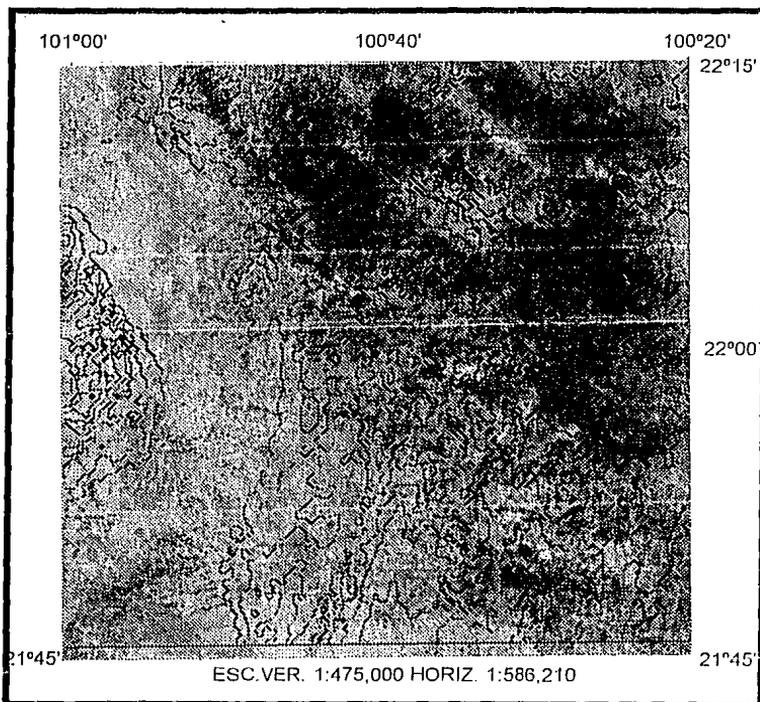
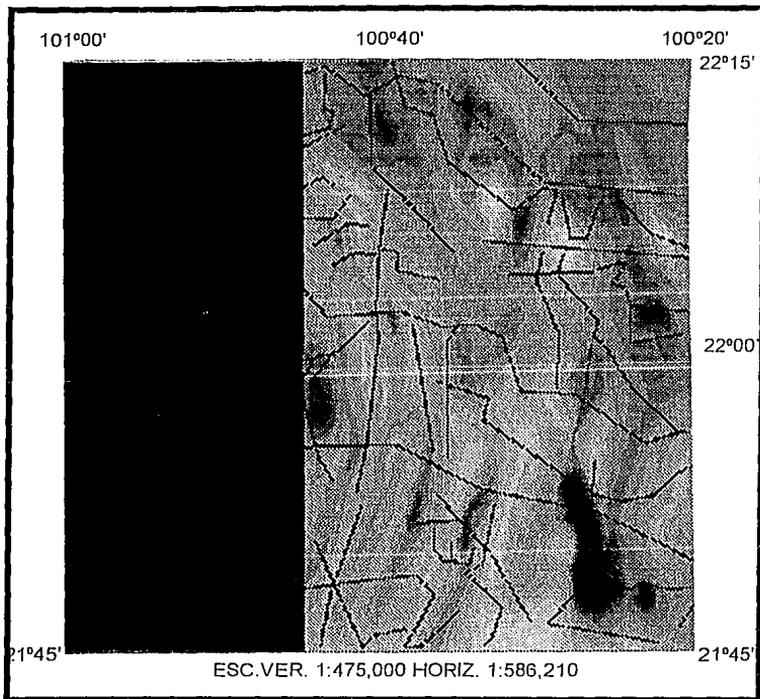


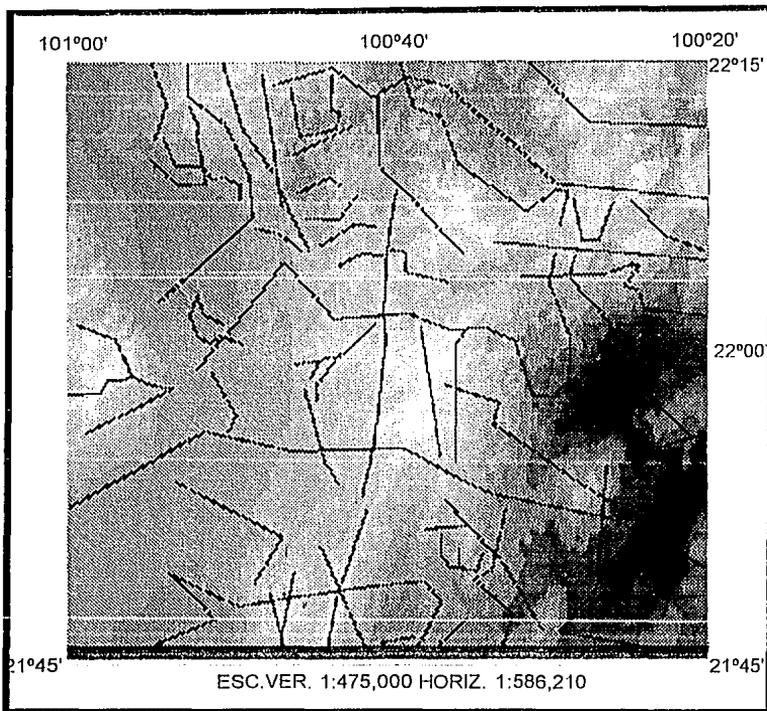
IMAGEN DE SATELITE CON CONTORNOS TOPOGRAFICOS.

IMAGEN (31)



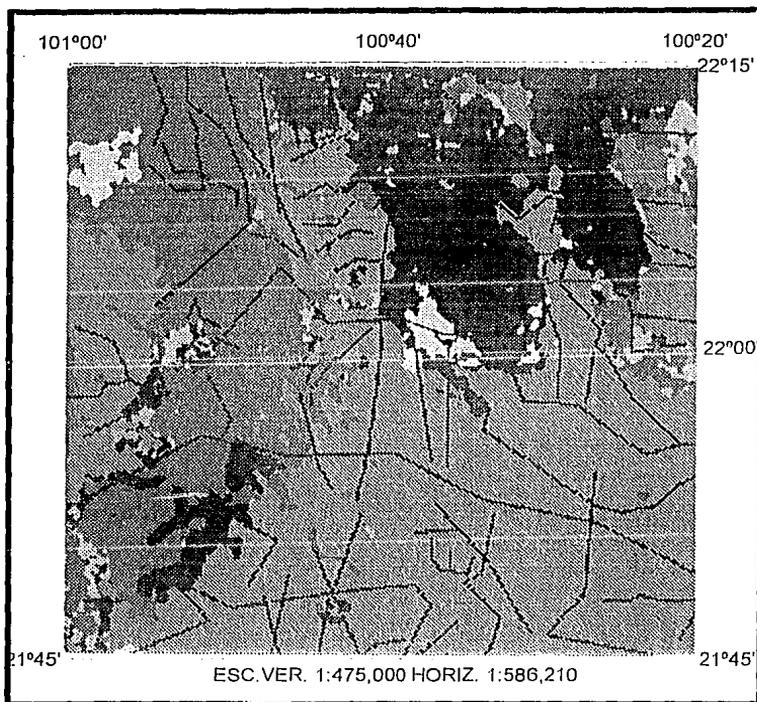
ALINEAMIENTOS DE LA IMAGEN DE SATELITE CON LA IMAGEN DE INT.MAG.TOT.  
 IMAGEN (32)

Observamos en la imagen 32 la poca relación existente entre los alineamientos marcados y los intrusivos descritos en la imagen magnetométrica, ésto nos lleva a pensar que dichos alineamientos superficiales no tienen representación a profundidad en el basamento.



**ALINEAMIENTOS DE LA IMAGEN DE SATELITE-IMAGEN TOPOGRAFICA.  
IMAGEN (33)**

Al contrario de la composición magnetométrica con los alineamientos de la imagen de satélite, en la imagen 33 vemos la gran coincidencia de dichos alineamientos con los desniveles topográficos.



**LINEAMIENTOS DE LA IMAGEN DE SATELITE-IMAGEN GEOLOGICA.  
IMAGEN (34)**

Esta composición de imágenes (imagen 34), permite detallar con mayor precisión la cartografía de la geología superficial con la ventaja de comprobar o detallar más eficazmente los trabajos que con fotogeología y con caminamientos se han elaborado a través del tiempo. Observamos también la enorme coincidencia entre los contactos geológicos y los alineamientos descritos de la imagen de Satélite, sobre todo en la porción NE. La parte SE corresponde a los derrames ígneos superficiales.

Considerando todas y cada una de las imágenes como una parte importante de un todo, pero con diferentes porcentajes de influencia (aplicación de reconocimiento de patrones, tratamientos estadísticos (análisis de datos multivariantes), descomposición en valores singulares, etc.), se desplegó en el monitor la sobreposición de imágenes, tomando en base la mayor influencia que tiene la imagen gravimétrica ya que es en nuestro caso la de mayor importancia debido a que la magnetometría no llena la totalidad del área de estudio, por lo que la inferencia interpretativa está influenciada por los rasgos de esta disciplina geofísica y corresponden a los eventos ya descritos en la etapa de interpretación de la anomalía de Bouguer.

## CONCLUSIONES

Durante las últimas décadas apareció, bajo la presión de los grandes avances tecnológicos un conjunto de disciplinas fuertemente interdependientes que tratan sobre los sistemas expertos: sensores remotos, el tratamiento digital de la información, los métodos de reconocimiento de formas, los métodos de clasificación y la teoría de la decisión. Estas disciplinas muy ligadas al procesamiento digital de imágenes sobre el plan científico y a la caracterización automática sobre el plan técnico, cobran una importancia cada vez mayor en la exploración petrolera y en la ingeniería de Ciencias de la Tierra en general.

El procesado de imágenes digitales geofísicas y de satélite, no tratan de competir con las técnicas aceptadas en Exploración sino que tratan de apoyarlas, mejorarlas y complementarlas.

La aplicación del análisis visual asistido por computadoras resulta ser una herramienta muy útil en la interpretación ya que de una manera rápida, pueden presentarse un sinúmero de posibilidades que ayudarán al interprete a tomar decisiones en su labor.

La metodología usada en este trabajo consistió en:

- 1.- Captura y despliegado de imágenes (interpolación, correcciones, etc.).
- 2.- Análisis de las imágenes (detección y clasificación tono de gris y/o color).
- 3.- Aplicación de procesos de realce (filtrados).
- 4.- Sobreposición de imágenes tanto en el monitor como en papel para su interpretación
- 5.- Interpretación de patrones estructurales.

Las bases de la interpretación temática y estructural se establecen mediante la "lectura" de la imagen digital con los mismos fundamentos y criterios del dominio de la fotografía aérea tradicional. Esta "lectura" permite analizar y limitar los patrones estructurales y asimilarnos a fenómenos geológicos.

Las imágenes de satélite proporcionan una gran cantidad de información acerca de lineamientos sobre todo a una escala diferente a la de un afloramiento. En geología, los lineamientos observados en las imágenes de satélite corresponden a fallas, fracturas, discordancias, estratificación, diques, etc., los cuales deben necesariamente ser verificados sobre el terreno, o mediante perforaciones.

Los conjuntos de datos con una alta densidad de muestreo (satélite, topografía y aeromagnetismo, gravimetría, etc.), ofrecen mayores posibilidades en la interpretación cuando se les aplica técnicas de iluminación artificial, ya que originan una mejor definición de anomalías con altos números de onda y baja amplitud. La técnica de iluminación artificial combina las ventajas de las imágenes a color con la ayuda de histogramas iso-poblacionales contra aquellas desplegadas en tonos de gris distribuidos linealmente.

La interpretación de la anomalía de Bouguer fue realizada apoyada mediante el proceso de Iluminación Artificial con lo cual fue posible determinar una serie de estructuras que originalmente no fueron vistas en la sola imagen de anomalía de Bouguer; se concluye que el comportamiento de las imágenes iluminadas con azimuth de 0 y 90 grados, son semejantes a las obtenidas mediante el gradiente horizontal y vertical respectivamente, pero se tiene la ventaja de que la imagen puede ser iluminada en cualquier dirección dando más posibilidades de interpretación.

El gradiente horizontal y vertical es un método simple que auxilia al intérprete en la delineación de las características geológicas asociadas a variaciones laterales en las mediciones de los campos potenciales involucrados, como pueden ser fallas geológicas de cualquier tipo, cambios laterales de propiedades físicas del basamento y/o paquete sedimentario, zonas de fracturas, límites de cuerpos intrusivos, etc.

La separación de las componentes regional-residual, guarda cierta similitud con el proceso de filtrado, pues existe la tendencia de los cuerpos regionales a producir bajas frecuencias, en tanto que los someros y locales las producen altas. Sin embargo existen dificultades que impiden que el proceso de separación sea tan simple como la aplicación de un filtro pasa-bandas, entre otras cosas debido a que existen traslapes de frecuencias entre ambos grupos, también la variabilidad de sus amplitudes espectrales y la elección de las frecuencias de corte. Existen diversos métodos para

separar la información residual de la regional, pero en todos ellos implica la intervención en mayor o menor grado del intérprete, hecho que puede ser ventajoso siempre y cuando la experiencia sea aplicada, en nuestro caso se obtuvieron mediante el proceso utilizado por Spector y Grant (1970). El regional y residual obtenidos no ofrecieron aspectos extras en la interpretación por lo que se incluyó su aportación con lo hecho con la anomalía de Bouguer.

Las imágenes compuestas se crearon mediante la superposición de varios atributos de las imágenes de entrada. La imagen desplegada en el monitor "imagen de campo potencial compuesto" probó ser útil en la correlación e interpretación de la información originada por la geofísica, satélite y topografía que dependen de varias escalas dentro de la corteza terrestre; como pudo observarse la interpretación realizada con esta técnica es indudablemente la más eficaz ya que reúne los atributos de varias disciplinas que como un todo proporciona las partes complementarias unas de otras.

En cuanto a los resultados obtenidos en el área de Guaxcama, diremos que se reconocieron dos columnas sedimentarias diferentes entre sí, una de cuenca y otra de plataforma; dentro de la columna de cuenca, las rocas más antiguas que afloran son las de la Formación Tamaulipas Inferior, le continúan La Peña, Cuesta del Cura, Indidura; Soyatal y Mezcala. La secuencia sedimentaria en la plataforma la componen las evaporitas de la Formación Guaxcama, El Abra, con su cambio de facies a Tamabra, Tamasopo y Cárdenas.

El plegamiento y fallamiento de las rocas mesozoicas se inicia en el Cretácico Superior-Paleoceno, provocando que la zona de pliegues y cabalgaduras se ubiquen sobre la plataforma San Luis Potosi-Valles, dando lugar a una tectónica superpuesta, donde rocas de cuenca de las Formaciones Indidura, Soyatal, y Mezcala del Oriente de la Cuenca Mesozoica del Centro de México, cabalguen sobre la plataforma Valles-San Luis Potosi, causado por la Orogenia Laramide.

Para el Jurásico Superior representado por las Formaciones Santiago, Tamán y sus respectivos cambios de facies, hacia el borde Occidental de la Plataforma, son ricos en materia orgánica, capaces de generar aceite. Ahora bien, conociendo las características litológicas, estratigráficas y estructurales de las rocas, se puede considerar que los hidrocarburos se encuentran

actualmente entrampados, en los sedimentos calcáreos así como en sus facies arrecifal y pre-arrecifal.

Al Oriente del área, las rocas de plataforma capaces de almacenar hidrocarburos, se encuentran aflorando sin tener una cobertura sello, por lo que las posibilidades de aceite se reducen a la porción Occidental de la plataforma San Luis Potosí-Valles, donde se tiene una cobertura sedimentaria por tectonismo superpuesto de las formaciones alóctonas (Soyatal y Mezcala).

Las rocas sello son consideradas las evaporitas, formadas por yesos y anhidritas de la formación Guaxcama; en menor importancia tenemos a la secuencia arcillo-cálcarea de las formaciones Soyatal y Mezcala.

El Cretácico Inferior es atractivo en rocas carbonatadas y dolomíticas, así como los cambios de facies laterales que pueden estar basculados por plegamientos, es posible que los hidrocarburos que se hayan originado en el Jurásico, pudieron haber migrado hacia la parte Oriental del Anticlinal de Alvarez,

Como resultado final, se propone la perforación de un pozo exploratorio, cuyo objetivo sería el de evaluar las condiciones Económico-Petroleras del Cretácico Inferior y Jurásico Superior en el flanco Oriental del Anticlinal de Alvarez, apoyando la sugerencia hecha por Gonzalez G. (I.G. 721 PEMEX, 1991).

En general podemos afirmar que la Integración e Interpretación en la Exploración Petrolera ha sufrido severas transformaciones en los últimos años debido a la dinámica que ofrecen las nuevas computadoras (estaciones de trabajo), no hay duda que en dicha Exploración el futuro se prevee alagueño utilizando técnicas como la presentada en este trabajo, más sin embargo la rapidéz con que se obtengan los resultados no indica que sean los correctos, por ello indiscutiblemente la experiencia del intérprete en el área de estudio seguirá siendo fundamental para obtener los mejores resultados.

## BIBLIOGRAFIA

Aero Service (1978-1979), Levantamiento Aeromagnético de Alta Sensibilidad. Area Morelia-Pachuca, Tamazunchale-Huautla. Escala 1:200,000, Hojas M-11, M-12, L-11 y L-12.

Anson R. W., (1992) "Basic Cartography", International Cartography Association, 143 p.

Barnes J., (1991) "Basic Geological Mapping", Geological Survey of London, Open University Press, 118 p.

Bhattacharyya, B.K. (1965). Two Dimensional Harmonic Analysis as a Tool for Magnetic Interpretation. Geophysics, Vol. 30 No. 5 p. 829-857.

Broome H. J., (1990). "Generation and Interpretation of Geophysical Images with Examples from the Rae Province, Northwestern Canadian Shield.", Geophysics, V. n. 8, pp 977-997.

Broome H. J., (1987), "An IBM - Compatible Microcomputer Workstation for Model Imaging Potential Data.", Computers and Geosciences, V. 75, n. 3, pp 102-125

Butterfield, (1989), "Map Generalisation", Prentice Hall, 430 p.

Carrere, V., (1987), "Exploitation de données multisources et traitement d'images en cartographie géologique.", Tesis de Doctorado de Estado, Universidad Pierre et Marie Curie, 2 vol., 418 p.

Ceja M. L. (1977) Paquete de Generación de Mapas de Propósito General. Petróleos Mexicanos (Inédito) p. 1-25.

Cordell L. and Knepper H.D., (1987), "Aeromagnetic images: Fresh insight to the buried basement, Rolla quadrangle, Southeast Missouri.", Geophysics, Vol. 52, n. 2, pp 218-231.

Corkidi B. G., Marquez F. J., "Microestación de Procesamiento Digital de Imágenes Biomédicas.", Centro de Instrumentos U.N.A.M., 15 p.

Correa P. I., (1987), "Transformación Lineal en Frecuencias de Mapas Gravimétricos y Magnéticos.", tesis de grado de Maestría en Exploración del Petróleo, DEPEI - UNAM, 137 p.

Couzy, A., (1981), "La Teledetección", Prensas Universitarias de Francia, N. 1919, 128 p.

Davis, J., (1973), "Statistics and Data Analysis in Geology", Ed. Addison, 430 p.

Dobrin, M., (1985), "Geophysical Prospection.", Ed. John Wiley, 336 p.

Dods S. D., Teskey D. J. and Hood P. J., (1985). The new series of 1:1,000,000-scale magnetic anomaly maps of the Geological Survey of Canada: Compilation techniques and interpretation. In W.J.Hinze. Ed., Utility, of regional gravity and magnetic maps: Soc.Expl.Geophys., p. 69-87.

Gonzalez G. F. (1991), "Informe de Detalle Geológico No. 721.", Petróleos Mexicanos.

Gonzalez, R. C., and Wintz, P., (1977), "Digital Image Processing" Addison-Wesley.430 P.

Goodacre A. K., "Interpretación de Anomalías gravimétricas y magnéticas para no especialistas.", Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Hall E. (1979).

Green W. R., (1990), "Exploration With Computers Geoscience Data Analysis" Pergamon Press, 225 p.

Hall E., (1979), "Computer Image Processing and Recognition.", Academic Press, 389 p.

Hernández F. E. R., (1993), "Análisis Interactivo, Interpretación e Integración de Datos Potenciales En La Porción Norte de la Cuenca de Veracruz", tesis de grado de Maestría en Exploración del Petróleo, DEPEI - UNAM, 70 p.

Horn, B.K. and Bachman, B.L. (1978). Using Synthetic Images to Register Real Images with Surface Models. Communications of the Association for Computing Machinery, Vol. 21, No. 11 p. 914-924.

Kowalik W. S. and Glenn W. E., (1987), "Image processing of aeromagnetic data and integration with Landsat images for improved structural interpretation.", Geophysics, Vol. 52, n. 7, p. 875-84.

- Kwarteng A.Y. and Chavez P.S. (1990), "Digital image processing of airborne geophysical data for uranium-mineralized breccia pipes exploration in Northwestern Arizona.", *Geophysics*, Vol. 55, n. 8, p 965-976.
- Lillesand T. M. y Moore R., (1979), "Remote Sensing And Image", John Wiley & Sons, 125 p.
- Lira J., (1987), "La Percepción Remota", Ed. SEP-CONACYT, 150 p.
- Lira G. J. (1990) "Notas del Curso de Procesado Digital de Imágenes". Instituto de Geofísica (UNAM), cap. 4 p. 1-25.
- Lu H. y Chin B.O., (1993), "G.I.S.: Technology and Application", World Scientific, 447 p.
- Lugo H. J., (1986), "Los Métodos Geomorfológicos", *Revista de Geografía*, V.1, pp 13-25.
- Manmonier M. y Schwell A., (1988), "Map Appreciation", Prentice Hall, 427 p.
- Martínez A. R., (1986), "Cartografía y Cálculo de Reservas de Yacimientos Afallados mediante el Análisis Normal.", tesis de grado de maestría, DEPEI-UNAM 133 p.
- Martínez A. R., (1991), "Adquisición y Procesamiento Numérico de Imágenes Digitales en la Exploración y Explotación Petroleras.", *Revista Ingeniería Petrolera de la AIPM*, n. 3, pp 24-36.
- Mesko A., (1987). "Geophysical Interpretation in Petroleum Prospection.", Ed. Pitman, 563 p.
- Perez B.C. (1989), "Estudio de Detalle Geológico del Prospecto Xoconoxtle." *Petroleos Mexicanos*.
- Peters, L. J. (1949). *The Direct Approach to Magnetic Interpretation and its Practical Application*; *Geophysics*, Vol. 14, p. 290-320.
- Reyes F. R., (1992), "Exploración Petrolera de Sureste de la Plataforma San Luis Potosí - Valles, Sierra Madre Oriental.", *Revista Ingeniería Petrolera de la AIPM*, Vol. XXXII, n.10, pp. 19
- Robinson S., "Elements of Cartography", John Wiley, 540 p.

Rodríguez U. M. A., (1991), "Análisis de Mapas Gravimétricos y Magnetométricos con Imágenes desplegadas en tonos de gris.", DEPFI-UNAM, Trabajo de Investigación, Sección de Ingeniería Petrolera, 35 p.

Romo M. J. (1989), "Gray-scale maps with a personal computer.", Computers and Geosciences, Vol. 15, n. 8, pp 1249-1263.

Sabins F., (1978), "Remote Sensing Principles and Interpretation", Freeman, 350 p.

Scanvic J., (1983), "Utilisation de la Teledetection Dans Les Sciences de la Terre", Ed. BRGM, N. 7, 341 p.

Schetselaar M. E., Van Dijk M. P. and Al Fasatwi, (1990), "Digital image processing of geophysical data using a raster-based GIS.", ITC Journal. Vol.3 p. 248-252.

Simlgian S. and Stakey J. (1989), "Image: Modified for use on a microcomputer based system.", Computers and Geosciences, Vol. 15, n.3, pp 237-254.

Spector, A. and Grant, F.S. (1970). Statical Models for Interpreting Aeromagnetic Data, Geophysics, Vol. 35, No.2, p. 293-302.

Taranik J., (1978), "A Workshop Exercise Illustrating Targeting Ground Water Exploration in South Arizona", Technicolor Graph Services Inc., 222 p.

Toumazt J., (1987), "Traitement de l' image Sur Microordinateur", Ed. Cybex, 257 p.

Vacquier, V., Steen Laud, N.C., Henderson, R.G. and Zietz, I. (1951). Interpretation of Aeromagnetic Maps; Geological Society of America, Memoir 47, 151 p.

Verger F., (1982), "l' observation de la Terre par les Satellites", Prensas Universitarias de Francia, n: 1989, 129 p.

## ANEXO-A

### PROCESAMIENTOS CLASICOS APLICADOS A LAS IMAGENES DIGITALES.

En este anexo se llevan a cabo los procesos de transformación de las imágenes para obtener otras con anomalías atenuadas, realizadas o defasadas, con el objeto de delimitar con precisión las estructuras geológicas del subsuelo. Los operadores o filtros para realizar tal proceso, son los mismos publicados por diversos autores en la literatura geofísica; algunos de estos procesos caen dentro de las siguientes familias:

- a).- Las derivadas;
- b).- Las continuaciones analíticas de campo;
- c).- La reducción al polo y;
- d).- La separación Regional- Residual de anomalías.

Estas transformaciones se aplican a las imágenes por el operador de Convolución tanto en el dominio del espacio como en el de la frecuencia espacial (número de onda), este trabajo se apoyó en el último tipo de filtrado mediante el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier para hacer el procesado, pero el proceso de transformación en tonos de gris e iluminación artificial se hizo en el dominio espacial.

Como primer paso de esta cadena de procesamientos se requiere la separación de la señal observada en las contribuciones regionales (bajos números de onda) y residuales (altos números de onda). Lo anterior se obtiene mediante varias técnicas (Dobrin, 1985; Mesko, 1987), entre las que citaremos solo dos: por promedios pesados usando la operación de convolución en el dominio espacial y por la Transformada de Fourier donde la separación se realiza en el dominio de los números de onda. Este procedimiento se le aplicó sólo a los datos geofísicos en donde se retuvo la componente residual para los tratamientos posteriores.

Después, se utilizó el cálculo de la Primera y Segunda Derivadas Verticales al conjunto de imágenes digitales con el objetivo de separar las componentes de alto y bajo número de onda, es decir, suprimir el efecto del ruido y mejorar la resolución de las anomalías locales.

Una vez obtenido el resultado de la aplicación de este operador lineal, se desplegó en forma de imagen siguiendo todos los procedimientos requeridos; cálculo de histogramas de las intensidades de las poblaciones de los estadísticos mas relevantes (máximo, mínimo, media, mediana, varianza, desviación estandar, número de clases, etc.), cuantificación de la imagen, y creación de una paleta de colores.

A continuación se realiza un recordatorio de los principales tópicos de lo que consideramos tratamientos clásicos de la Información geofísica.

#### **A.1.- SEPARACION DE ANOMALIAS.**

La transformación de un mapa gravimétrico o magnético para obtener otro con anomalías atenuadas, realzadas o defasadas, es comunmente aplicada en los trabajos de interpretación, con el objeto de delimitar con precisión en el mapa las estructuras geológicas del subsuelo.

Estas transformaciones se aplican a las imágenes por convolución tanto en el dominio del espacio como en el dominio de la frecuencia espacial o número de onda.

Estando conscientes de las ventajas que proporciona la convolución en el dominio del número de onda en cuanto a precisión en el proceso de filtrado con respecto al realizado en el espacio, así como la igualdad en el tiempo de proceso, este trabajo se apoyó principalmente en el primero mediante el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier para realizar el procesado de

las imágenes gravimétricas y magnetométricas, pero para hacer los procesos correspondientes al desplegado en tonos de gris y de iluminación artificial, se utilizó el dominio del espacio.

### A.2.- OPERACION DE CONVOLUCION.

La convolución es la operación matemática a que nos referimos comúnmente como una representación general del filtrado. La convolución se puede realizar como una operación en el dominio del espacio y/o en el de los números de onda, por medio de la Transformada-Z y por medio de la Transformada de Fourier. Aquí nos referiremos a las dos, ya que serán aplicadas frecuentemente en esta investigación.

Sean  $A(m',n')$  y  $B(m',n')$ , dos funciones discretas bidimensionales representadas por los arreglos matriciales de dimensiones  $M \times N$  y  $K \times L$  respectivamente, donde  $M$  y  $K$  indican el número de renglones y  $N$  y  $L$  el número de columnas. La convolución de  $A(m',n')$  con  $B(m',n')$  da el arreglo matricial  $C(m,n)$  de  $M+K-1$  renglones por  $N+L-1$  líneas que puede ser escrita como:

$$C(m,n) = \sum_{m'=0}^{m-1} \sum_{n'=0}^{n-1} A(m',n')B(m-m')(n-n') \text{-----(1)}$$

donde:

$$m = 0, 1, 2, \dots, M+K-2$$

$$y \quad n = 0, 1, 2, \dots, N+L-2$$

$$y \quad C(m,n) = 0$$

Si se calcula la transformada de Fourier de (1) se tiene:

$$C(k,l) = A(k,l) B(k,l)$$

donde:  $A(k,l)$  es la Transformada de Fourier de  $A(m',n')$

$B(k,l)$  es la Transformada de Fourier de  $B(m',n')$

y  $C(k,l)$  es la Transformada de Fourier de la convolución en el espacio  $A^*B$ .

De donde se deduce la importante propiedad que dice que la convolución de dos funciones discretas es equivalente a la multiplicación término a término de sus transformadas de Fourier.

Explícitamente esta propiedad puede ser escrita como:

$$A(m,n) * B(m,n) \leftrightarrow A(k,l) \cdot B(k,l)$$

y

$$A(m,n) \cdot B(m,n) \leftrightarrow A(k,l) * B(k,l)$$

Donde  $(A(k,l), B(k,l))$  indica par transformado de Fourier y  $(*)$  indica convolución.

Usando esta propiedad, la convolución de dos funciones en el dominio del espacio se puede realizar transformando cada función al dominio de la frecuencia, multiplicando término a término estas transformaciones y transformando al dominio del espacio el producto.

Para llevar a cabo así la convolución,  $A(k,l)$  y  $B(k,l)$  deben satisfacer ciertas condiciones:

Puesto que la convolución en frecuencias involucra la multiplicación término a término de  $A(k,l)$  y  $B(k,l)$ , deben tener el mismo número de términos y los correspondientes términos deben representar las mismas componentes de frecuencia. Sea cual sea el tamaño de  $A(m,n)$  y  $B(m,n)$ ;  $A(0,0)$  y  $B(0,0)$  representan la misma componente de frecuencia, la frecuencia cero.

Si se puede hacer que los intervalos de muestreo en el dominio de la frecuencia  $\Delta u$  y  $\Delta v$  sean los mismos para  $A(k,l)$  y  $B(k,l)$ , entonces los términos de  $A(k,l)$  y  $B(k,l)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, M-1$ ,  $l = 0, 1, 2, \dots, N-1$  representarían las mismas componentes de frecuencia.

Los intervalos de muestreo en frecuencia  $\Delta u$  y  $\Delta v$  dependen del tamaño del arreglo y del intervalo de muestreo en el dominio espacial. Entonces, las condiciones para que se lleve a cabo la convolución  $A(k,l) B(k,l)$ , es:

$$\Delta u = 1/M\Delta x \quad \text{y} \quad \Delta v = 1/N\Delta y$$

Se satisfacen si  $A(x',y')$  y  $B(x',y')$  tienen el mismo intervalo de muestreo  $\Delta x$  y  $\Delta y$  son arreglos del mismo tamaño.

Comunmente los filtros tienen un tamaño menor que el arreglo de datos, por lo que el arreglo del filtro se le puede agregar ceros hasta tener el mismo tamaño que el arreglo de datos. Esto equivale en frecuencia a interpolar el espectro de frecuencia del filtro.

También se pueden especificar para ambos  $A(x',y')$  y  $B(x',y')$  los mismos intervalos de muestreo  $\Delta x$  y  $\Delta y$ .

Así  $A(k,\Delta u,l\Delta v)$  y  $B(k,\Delta u,l\Delta v)$  tendrán los mismos intervalos de muestreo  $\Delta u$  y  $\Delta v$  y serán de dimensiones  $M \times N$ .

### A.3.- SEPARACION REGIONAL-RESIDUAL.

Partiendo del hecho de considerar los campos de fuerzas gravimétricos y magnéticos dependientes de  $F_g = \rho(M1M)/r^2$  y  $F_m = (1/\mu)(P1P)/r^2$  respectivamente, es claro que el efecto de un cuerpo se extiende hasta el infinito, pero con una magnitud que decrece al aumentar la distancia. Esto provoca que la intensidad medida en cada punto dependa teóricamente del conjunto infinito de cuerpos que ocupan el espacio, no obstante, para fines prácticos, solo es necesario tomar en consideración la contribución correspondiente a los cuerpos que ocupan una zona de interés para cierto objetivo y que consideramos suficientemente densos (polarizados) y cercanos. De cualquier modo sin importar el tamaño del cuerpo, siempre y cuando tenga

dimensiones finitas, su efecto disminuye en amplitud y se hace más ancho a medida que su distancia aumenta, por lo que simplícidamente se maneja el criterio de que los efectos más suaves (anchos y menos picudos) de un mapa, corresponden a cuerpos profundos. En conclusión, en gravimetría y magnetometría, se considera que el campo medido en la superficie o cerca de ella, está determinado básicamente por dos conjuntos no bien diferenciados de cuerpos. Uno formado por cuerpos 'someros' con frecuencias poco extensas lateralmente y otros por cuerpos 'profundos' de mayor tamaño. Los efectos superpuestos de ambos, constituyen los planos de Anomalías de Bouguer, en los que con frecuencia son indistinguibles las contribuciones aisladas de cada grupo.

Este problema es común para los dos métodos de exploración citados, pero no lo afecta con la misma intensidad, ya que es bien conocido que la separación de las componentes regional y residual (profunda y somera) es más difícil en la prospección gravimétrica debido entre otras causas a que el campo gravitacional no es dipolar, como el magnético y los cambios de susceptibilidad son mayores que los de densidades, por otro lado se entiende que el efecto gravitacional de los cuerpos regionales tiende a ser más importante que el de los someros, cosa que no ocurre en el efecto magnético (Telford, 1976).

La separación de las componentes regional-residual, guarda cierta similitud con el proceso de filtrado, pues existe la tendencia de los cuerpos regionales a producir bajas frecuencias, en tanto que los someros y locales las producen altas. Sin embargo existen dificultades que impiden que el proceso de separación sea tan simple como la aplicación de un filtro pasa-bandas, entre otras cosas debido a que existen traslapes de frecuencias entre ambos grupos, también la variabilidad de sus amplitudes espectrales y la elección de las frecuencias de corte.

Existen diversos métodos para separar la información residual de la regional, pero en todos ellos implica la intervención en mayor o menor grado del intérprete, hecho que puede ser ventajoso siempre y cuando la experiencia sea aplicada, sin embargo, puede ser recomendable el uso de métodos de mayor grado de automatización para el tratamiento de grandes áreas, sobre todo si es difícil la aplicación de criterios geológicos.

El filtrado de datos puede hacerse por convolución en el dominio espacial o multiplicación en el dominio espectral. Aplicando esta técnica y usando el filtro adecuado, es posible realzar o eliminar parte de la información presente en un plano.

Para obtener un plano residual, debe eliminarse la contribución de los rasgos regionales, lo que visto espectralmente significa la eliminación de las bajas frecuencias. Esto puede realizarse mediante una gran variedad de filtros con diferentes amplitudes espectrales, que son a fin de cuentas, las que determinan la conveniencia o inconveniencia de usar un filtro en particular.

En principio bastaría con el uso de un filtro pasa-altas rectangular para alcanzar el objetivo deseado, sin embargo la presencia de ruido que predomina en las altas frecuencias, obliga a definir una adecuada frecuencia de corte y así evitar fenómenos como el de Gibbs, que se produce en los cortes abruptos.

Uno de los avances más importantes para decidir la frecuencia de corte en la separación regional-residual, fué dado por Spector y Grant (1970), quienes analizando el logaritmo natural del espectro radial de potencias de un plano, demostraron bajo la hipótesis de que los efectos medidos son producto de conjuntos de cuerpos prismáticos, caracterizados por las propiedades promedio de los cuerpos que los constituyen, entre ellas la profundidad. En consecuencia el logaritmo del espectro radial de potencias presenta dos o más sectores de pendiente aproximadamente constante, cuyo valor se relaciona con la profundidad promedio del conjunto que predomina en esa parte del espectro.

Usualmente el espectro es dominado por sólo dos conjuntos de cuerpos, de modo que pueden observarse dos zonas de pendiente aproximadamente constante. El punto de inflexión entre ambas rectas puede considerarse como una frecuencia de corte razonable para la separación regional-residual.

Por lo que respecta a la frecuencia de corte superior del filtro residual, éste debe definirse de tal manera que se elimine el ruido, caracterizado porque su contribución al espectro de potencia es constante para todas las frecuencias. La frecuencia para la cual la potencia espectral (su logaritmo) se hace prácticamente constante, constituye una frecuencia de corte razonable.

Con respecto a la forma de corte Gupta y Ramani (1980), proponen el uso de filtros óptimos de Winner, que multiplicados por el filtro pasabanda permite tener un corte adecuado en el extremo superior, con la propiedad de que la forma del filtro resultante se aproxima a la del original con un error cuadrático mínimo.

Basado en el espectro de potencias de la señal que desea filtrarse, la respuesta espectral del filtro óptimo es la siguiente:

$$H_o(f) = P_s(f) / P_s(f) + P_n(f) = P_s(f) / P_t(f) \text{-----}(2)$$

f = frecuencia

Ps = Potencia espectral de la señal

Pn = Potencia espectral del ruido

Pt = Potencia espectral de la señal completa.

Se encuentra que la ecuación espectral del filtro óptimo para la eliminación del ruido es:

$$H_o = 1 - e^{-x(f)} \text{-----}(3)$$

Expresión que deberá multiplicarse por el filtro residual con la forma espectral decidida.

Existen diferentes técnicas para obtener la respuesta del filtro de separación en el dominio de las frecuencias, por lo que las siguientes son sólo algunas de las más utilizadas:

### A.3.1.- CONTINUACION DE CAMPO.

El método de continuación de campo, permite realzar alguna porción del espectro a costa de disminuir otra. Se basa en calcular a partir de los datos en el plano medido (anomalía de Bouguer) el efecto gravimétrico en otros planos paralelos más cerca o más lejos de los cuerpos causantes del campo.

Por la dependencia de la fuerza gravitacional con el inverso del cuadrado de la distancia, un acercamiento tiene como consecuencia el aumento de la intensidad de las señales, pero además este efecto es más notorio para las fuentes cercanas que para las alejadas. Como consecuencia, en el plano resultante, el efecto de los cuerpos someros, las altas frecuencias se hacen dominantes, semejando un verdadero plano residual.

En la continuación ascendente, el plano de medida se lleva matemáticamente a una mayor distancia, por lo que la señal de todos los cuerpos disminuye. Sin embargo, la disminución es más notoria para cuerpos cercanos, por lo que el resultado final es una disminución relativa en la amplitud de las altas frecuencias y la facilidad de observar las bajas que corresponden al regional.

En este caso, el residual puede obtenerse restando el efecto regional al plano de Bouguer. La ecuación espectral de estos filtros, es la siguiente:

$$H_a(f) = e^{2hf} \text{-----}(4)$$

$h$  = altura de continuación, positiva es hacia abajo.

Dependiendo del valor y signo de  $h$ , se tendrán diferentes filtros pasa-altas o pasa-bajas. en el caso de la continuación descendente ( $h$  positiva) se realzarán las altas frecuencias por lo que aumentará el parecido con un plano de segunda derivada vertical. Sin embargo, la

coincidencia no será completa por la razón de que se trata de filtros con expresiones espectrales distintas.

Las continuaciones de campo, basan su funcionamiento en la validez de la ecuación de Laplace, por lo que en la continuación descendente se debe evitar acercarse demasiado a los cuerpos que originan el campo, pues se amplifica demasiado el ruido, y mucho menos rebasar la profundidad de su tapa superior, pues la ecuación de Laplace deja de ser válida.

Si bien el primer problema se elimina fácilmente con la introducción de una ventana espectral adecuada, el segundo es mucho más difícil de evitar, además de que con frecuencia se ignora la profundidad de los cuerpos someros y las oscilaciones de campo continuado hacia abajo, son el único indicio de que se está cerca de los cuerpos fuente. Los dos problemas se evitan si se trabaja únicamente con la continuación ascendente, para obtener así un regional que restado al plano de Bouguer, proporcione la respuesta de los cuerpos someros. Sin embargo, en este caso la altura de continuación que debe usarse para obtener un regional más parecido al esperado es incierto, por lo que debe determinarse empíricamente con apoyo en la información geológica, las características del muestreo en el plano inicial (tamaño de la celda) y la experiencia del intérprete.

Usando la misma técnica de los dos casos anteriores, el filtro óptimo para el cálculo del residual a partir de la continuación ascendente es:

$$H_r(f) = (1 - H_a(f))(1 - e^{-\lambda(f)}) \text{-----} (5)$$

### A.3.2.- SEGUNDA DERIVADA VERTICAL.

Tiene por objetivo realzar las fuentes someras a costa de las profundas, ya que se trata de una medida de la curvatura de la señal y ésta es mayor cuando corresponde al efecto de

los cuerpos cercanos a la superficie que cuando son lejanos, como el basamento. Espectralmente este comportamiento corresponde al de un filtro pasa-altas cuya ecuación es:

$$H_d(f) = (2\pi f)^2 \text{-----(6)}$$

$$f = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

donde u y v son números de onda.

Sin embargo la respuesta no es satisfactoria para el diseño, pues realza en demasía el ruido de los datos. Para evitarlo, la respuesta a altas frecuencias debe disminuirse, usando para ello alguna ventana o la técnica de filtro óptimo. El filtro de separación en este caso (segunda derivada), es multiplicado por el filtro óptimo que corta las altas frecuencias.

$$H_{der}(f) = (2\pi f)^2 (1 - e^{-x(f)}) \text{-----(7)}$$

Los planos de segunda derivada se caracterizan por mostrar las frecuencias altas, además de que el contorno cero correspondiente a los puntos de inflexión del plano original, tiende a delinear los bordes de los cuerpos que originan las anomalías. Sin embargo, la forma detallada del plano residual resultante no coincide con el obtenido por promediación, aunque los rasgos generales y la ubicación de las anomalías es aproximadamente igual.

### A.3.3.- REDUCCION AL POLO (Tomado de I. CORREA, 1990).

#### TRANSFORMACION DE UNA ANOMALIA A OTRA.

La distorsión de las anomalías magnéticas causada por los vectores de campo magnético total y de magnetización, comunmente inclinados, no permite la asociación directa entre la distribución de magnetización en el subsuelo y la forma de la anomalía, de manera análoga como en gravimetría, lo que dificulta la lectura e interpretación de los mapas magnéticos.

Por lo tanto una de las aplicaciones de las transformaciones magnéticas, será eliminar la mencionada distorsión, las otras aplicaciones son: atenuar, realzar y separar las anomalías y obtener otras componentes que ayuden en la interpretación.

### TRANSFORMACION DE LA COMPONENTE MEDIDA.

Para convertir una anomalía magnética  $T(u,v)$  dada por la ecuación:

$$T(u,v) = 2 m_s F_m(u,v,d) M_o(u,v) M_m(u,v) H(u,v,d) R(u,v) \text{-----}(8)$$

Donde:

$F_m(u,v,d)$  = Es la T.F. de la función de distribución de la magnetización.

$F(x,y,d)$  en el espacio.

$$M_o(u,v) = [iuL + ivm + (u + v) n]$$

es el factor que depende del vector de campo geomagnético medido en la región de observación.

$$M_m(u,v) = [iuL + ivM + (u + v) N]$$

Depende de la orientación del vector de magnetización.

$$H(u,v,d) = \text{EXP}[-d(u + v) ]$$

Depende de la profundidad de la capa equivalente.

$$R(u,v) = (uu + vv)$$

Es el radio vector de posición en coordenadas frecuenciales.

En otra denominada  $T'(u,v)$  con una nueva componente de campo medida cuya expresión es:

$$T'(u,v) = 2\pi ms Fm(u,v,d) M'o(u,v) Mm(u,v) R(u,v) H(u,v,d) \text{-----}(9)$$

Donde  $M'o(u,v)$  es el nuevo factor de campo medido.

Simplemente se multiplica  $T(u,v)$  por el filtro

$$M'o(u,v)/M_o(u,v) \text{-----}(10)$$

Donde:

$$M_o(u,v) = iul + ivm + Ruvn$$

$$M'o(u,v) = iul' + ivm' + Ruvn' \text{ y } Ruv = R(u,v) = \text{sqrt}(uu+vv)$$

$(l,m,n)$  son los cosenos directores del vector de campo medido

$(l',m',n')$  son los cosenos directores del nuevo vector de campo medido.

La nueva anomalía puede ser escrita como:

$$T'(u,v) = [M'o(u,v)/M_o(u,v)]T(u,v) \text{-----}(11)$$

### TRANSFORMACION DE LA DIRECCION DE MAGNETIZACION.

Para convertir una anomalía magnética  $T(u,v)$  en otra denominada  $T'(u,v)$  con nueva dirección de magnetización, definida por la expresión:

$$T'(u,v) = 2\pi ms Fm(u,v,d) M_o(u,v) M'm(u,v) R(u,v) H(u,v,d)$$

Donde  $M'm(u,v)$  es el nuevo factor de magnetización.

Simplemente se multiplica  $T(u,v)$  por el filtro

$$M'm(u,v)/Mm(u,v)-----(12)$$

Donde:

$$Mm(u,v) = iuL + ivM + RuvN$$

$$M'm(u,v) = iuL'+ivM'+RuvN'$$

(L,M,N) son los cosenos directores del vector de magnetización del cuerpo anómalo.

(L',M',N') son los cosenos directores del nuevo vector de magnetización del mismo cuerpo.

Así la nueva anomalía se puede escribir como:

$$T'(u,v) = [M'm(u,v)/Mm(u,v)]T(u,v)-----(13)$$

### TRANSFORMACION DE LA COMPONENTE MEDIDA Y DE LA DIRECCION DE LA MAGNETIZACION.

En el caso general, para convertir una anomalía magnética T(u,v), en otra anomalía T'(u,v) con una nueva componente de campo medida y una nueva dirección de magnetización, definida por la expresión:

$$T'(u,v) = 2PmsFm(u,v,d) M'o(u,v) M'm(u,v) R(u,v) H(u,v,d)$$

Donde:

M'o(u,v) es el nuevo factor de campo medido.

M'm(u,v) es el nuevo factor de magnetización Solo se multiplica T(u,v) por el filtro

$$[M'o(u,v)/Mo(u,v)][M'm(u,v)/Mm(u,v)]-----(14)$$

En forma similar a los casos anteriores, la nueva anomalía se puede escribir como:

$$T'(u,v) = [M'o(u,v)/Mo(u,v)][M'm(u,v)/Mm(u,v)][T(u,v)] \text{-----(15)}$$

Se puede observar que el filtro está expresado por el producto del filtro  $M'o/Mo$  que transforma la componente del campo medido por el filtro  $M'm/Mm$  que transforma la dirección de magnetización del cuerpo anómalo.

Visto de esta manera, el proceso de filtrado en el dominio de la frecuencia se convierte sencillamente en la sustitución de un factor por otro.

La reducción al polo es un concepto ingenioso creado por Baranov (1957) para minimizar la asimetría y el desplazamiento lateral, con respecto al cuerpo anómalo, de la anomalía magnética de intensidad total causada por la desviación de la vertical del vector de magnetización.

En la región del polo magnético el vector de campo es vertical y la dirección de magnetización a menudo también lo es. Entonces una anomalía de intensidad total reducida al polo es equivalente a aquella anomalía que fuese producida por el mismo cuerpo anómalo, pero situado en el polo y magnetizado solamente por inducción.

El filtro de la reducción al polo en el dominio de la frecuencia, es un caso particular del filtro dado por la ecuación (14) donde  $M'o$  y  $M'm$  son los factores que dependen de las direcciones de campo medido y de magnetización en el polo respectivamente.

Así para obtener la expresión del filtro en cuestión, como primer paso, se encuentra la expresión del filtro que transforma la componente del campo medida a una componente vertical, entonces de la ecuación (10)  $Mo$  es el factor de campo medido y  $M'o$  es el factor de la componente vertical. Esta nueva componente, tiene una inclinación  $I = 90$ . Sus cosenos directores son:

$$l' = \cos l \cos D = 0 \quad m' = \cos l \sin D = 0 \quad n' = \sin l = 1$$

y  $M^o$  queda como

$$M^o(u,v) = Ruv$$

Por lo tanto, el filtro para convertir la anomalía de componente total a una anomalía de componente vertical es:

$$RZ(u,v) = Ruv / (\cos l + \sin l \cos m + \cos n) \text{-----(16)}$$

(l,m,n) son los cosenos directores del vector de campo medido.

Entonces de acuerdo con la ecuación (11) la expresión de la anomalía de componente vertical, es:

$$T'(u,v) = 2\pi ms Fm(u,v,d) Mm(u,v) H(u,v,d) \text{-----(17)}$$

La cual ya no depende de la dirección del campo medido, pero  $Mm$  tiene la influencia de la dirección de magnetización del cuerpo anómalo.

Como segundo paso se obtiene la expresión del filtro que transforma la anomalía de componente vertical (17) a una anomalía reducida al polo, que por definición debe ser causada por una masa magnetizada por un vector vertical. De acuerdo a la ec. (12)  $M^m$  es el factor de magnetización real. Por lo que la inclinación de este nuevo vector de magnetización vertical es:  $l_m = 90^\circ$ .

Sus cosenos directores son también  $L^m = M^m = 0$  y  $N^m = 1$ . Por lo que.

$$M^m(u,v) = Ruv$$

Por lo tanto el filtro que convierte la anomalía de componente vertical a una anomalía reducida al polo es:

$$RM(u,v) = Ruv / (\cos L + \sin L \cos M + \cos N) \text{-----(18)}$$

(L,M,N) son los cosenos directores del vector de magnetización total del cuerpo anómalo. (La magnetización total es la suma vectorial de la magnetización inducida más la magnetización remanente).

De acuerdo con (15) el filtro para obtener la reducción al polo de una anomalía de intensidad total es:

$$RP(u,v) = Ruv^2 / [iuL + ivm + Ruvn][iuL + ivM + RuvN] \text{-----}(19)$$

Esta misma expresión fué dada por Gunn (1975).

Como un caso particular, si la anomalía que se desea reducir al polo se considera que es causado por un cuerpo magnetizado solo por inducción, las ecuaciones (16) y (18) son iguales y por lo tanto el filtro de reducción al polo es:

$$RP(u,v) = Ruv^2 / [iuL + ivm + Ruvn]^2 \text{-----}(20)$$

(l,m,n) son los cosenos directores del vector de campo geomagnético en la región donde se hizo la medición.

De otra manera la anomalía en el polo es:

$$To(u,v) = 2\pi msFm(u,v,d) R(u,v) H(u,v,d) \text{-----}(21)$$

La cual es independiente de los vectores de campo medido y de magnetización.

Se puede observar que esta última expresión es equivalente a la anomalía gravimétrica.

$$G(u,v) = 2\pi [iuL + ivM + (u + v) N] [ms(u,v,d) \text{EXP}(-(d-h)(u + v)) / (u + v) ]$$

## ANEXO B

### ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.

En el desarrollo y/o adaptación de técnicas especiales del tratamiento digital de imágenes, se ha establecido implantar la transformación obtenida por la descomposición de Valores Singulares y de diversas técnicas del preprocesado y mejoramiento del tratamiento digital de imágenes, así como el comparar la técnica del análisis de componentes principales.

#### FUNDAMENTOS INVOLUCRADOS.

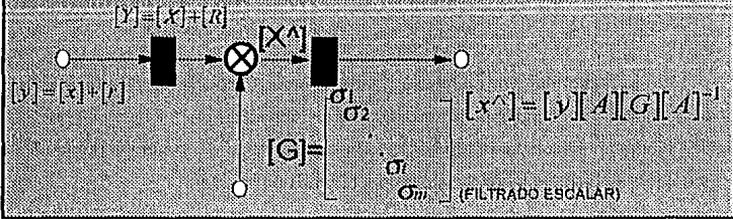
Desde el punto de vista del tratamiento de imágenes, la técnica de reconstrucción de Karhunen-Loeve o Transformación de Componentes Principales, puede ser descrita en el marco de la Transformación obtenida de la descomposición de Valores Singulares, y se establece la relación entre ellas.

La Transformación discreta de Karhunen-Loeve, aísla una o varias componentes espectrales que conforman un campo Geofísico observado. El proceso corresponde a una transformación lineal de carácter adaptivo, cuyos vectores de base no son constantes como ocurre en otras transformaciones similares. Los vectores de base están determinados por las características estadísticas de los datos.

Una imagen digital o numérica, puede representarse como una matriz  $[X]$  de orden  $(n \times m)$  o por un vector de  $N = n \times m$  elementos.

Sea  $[X_{(n \times m)}]$  una matriz ó  $[X_{(N \times 1)}]$  un vector de carácter aleatorio de muestras espaciales o temporales. Para eslimar  $[X^{\wedge}_{(n \times m)}]$  de los datos  $[X_{(n \times m)}]$ , encontramos el sistema ortogonal de coordenadas determinado por los autovectores  $[U_{(n \times n)}]$  de la matriz varianza-covarianza  $[Cf_{(n \times n)}]$ . La matriz  $[Cf_{(n \times n)}]$  de los datos  $[X_{(n \times m)}]$  es estimada numericamente por:

## TRANSFORMACION DE KARHUNEN-LOEVE



$$Cf = 1/L \sum_{i=1}^L X_i X_i^T$$

Donde:

$X_i$ , son realizaciones de los datos  $[X_{(n \times m)}]$ . y

$L$ , es un número finito de gran magnitud. Y está definida por:

$$[Cf] = E [[X_{(n \times m)}][X_{(n \times m)}]^T]$$

En la que:

$E$ , es el operador de esperanza matemática, y

$T$ , indica la operación de transposición matricial.

La reconstrucción  $[X^A_{(n \times m)}]$  de  $[X_{(n \times m)}]$  apropiadamente está expresada por:

$$X^A(M) = \sum_{i=1}^M U_i K_i$$

Donde:

$[U_i]$ , la  $i$ -ésima columna de la matriz de autovectores  $[U_{(n \times n)}]$ , de  $[Cf_{(n \times n)}]$ ,

$[K_i]$  la  $i$ -ésima columna de la matriz de Karhunen-Loeve, definida como:

$$[K_{(n \times m)}] = [U_{(n \times n)}]^T [X_{(n \times m)}].$$

$M$ , es el número máximo de autovectores considerado en la reconstrucción  $[X^A_{(n \times m)}]$  de los datos  $[X_{(n \times m)}]$ . y

$n$ , es el número de muestras.

Con  $M < n$ .

En resumen, la recuperación  $[X^{\wedge}_{(n \times m)}]$  de los datos registrados  $[X_{(n \times m)}]$ , específicamente requiere:

a.- La estimación de la matriz varianza-covarianza  $[Cf_{(n \times n)}]$  de la matriz de datos  $[X_{(n \times m)}]$

$$[Cf_{(n \times n)}] = E[(X_{(n \times m)})(X_{(n \times m)})^T]$$

b.- La determinación de la matriz de autovectores  $[U_{(n \times n)}]$  de la matriz varianza-covarianza  $[Cf_{(n \times n)}]$

c.- La proyección de los datos  $[X_{(n \times m)}]$  en el espacio determinados por los autovectores  $[U_{(n \times n)}]$  de  $[Cf_{(n \times n)}]$ .

$$[K_{(n \times m)}] = [U_{(n \times n)}]^T [X_{(n \times m)}]$$

Y finalmente,

d.- La reconstrucción  $[X^{\wedge}_{(n \times m)}]$  de  $[X_{(n \times m)}]$ , mediante:

$$[X^{\wedge}_{(n \times m)}] = [U_{(n \times n)}] [K_{(n \times m)}]$$

ó

$$X^{\wedge}(M) = \sum_{i=1}^M K_i U_i$$

En donde  $[U_1], [U_2], [U_3], \dots, [U_n]$  son los autovectores (columnas) de la matriz  $[U_{(n \times n)}]$  de  $[Cf_{(n \times n)}]$ .

Por otra parte, la matriz varianza-covarianza  $[Cf_{(n \times n)}]$ , puede escribirse en términos de sus autovectores  $[U_{(n \times n)}]$  y de la matriz diagonal  $[\lambda_{(n \times n)}]$ , como:

$$[Cf_{(n \times n)}] = [U_{(n \times n)}]^T [\lambda_{(n \times n)}] [U_{(n \times n)}]$$

En la que  $[\lambda_{(n \times n)}]$  es una matriz cuyos elementos diagonales son los autovalores,  $[\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{i+1}, \dots, \lambda_n]$  de la matriz varianza-covarianza  $[Cf_{(n \times n)}]$ .

La matriz diagonal  $[\lambda_{(n \times n)}]$ , puede escribirse a su vez, en términos de  $[Cf_{(n \times n)}]$  y  $[U_{(n \times n)}]$ , como:

$$\lambda[\lambda_{(n \times n)}] = [U_{(n \times n)}] [Cf_{(N \times N)}] [U_{(n \times n)}]^T$$

Y con la matriz de Componentes Principales  $[K_{(n \times m)}]$ , de los datos  $[x_{(n \times m)}]$ , como:

$$[K_{(n \times m)}] = [U_{(n \times m)}]^T [x_{(n \times m)}]$$

### DESCOMPOSICION DE VALORES SINGULARES.

Sea la matriz  $[X]$  de orden  $(n \times m)$  correspondiente a datos de una imagen digital,

$$[X_{(n \times m)}] = X_{ij} ; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$$

La matriz  $[X]$  puede factorizarse en términos de las matrices:

$$[U_{(n \times n)}], [\Lambda_{(n \times m)}] \text{ y } [V_{(n \times m)}]$$

puediendo escribirse:

$$[X] = \sum_{i=1}^r \sigma_i U_i V_i^T$$

En donde:

$[\Lambda]$  es una matriz diagonal de orden  $(n \times m)$  cuyos elementos son los valores singulares  $\sigma_i$

$[U_i]$  Es el  $i$ -ésimo autovector de  $[Cf] = E [[X][X]^T]$

$[V_i]$ , Es el  $i$ -ésimo autovector de  $[Cf] = E [[X]^T [X]]$

$r$  Es el rango de  $[X_{(n \times m)}]$

$\sigma_i = +\sqrt{\lambda_i}$  Es el  $i$ -ésimo valor singular.

$\lambda_i$  Es el  $i$ -ésimo autovalor de matriz de varianza-covarianza  $[Cf_{(n \times n)}]$ .

Siendo,

$$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_i, \sigma_{i+1}, \dots, \sigma_n$$

El Producto  $(\sigma_i u_i)^T$  corresponde a una matriz de orden  $(n, m)$  y rango unitario denominada autoimagen. Dada la ortogonalidad de los autovectores las autoimágenes forman una base ortogonal de la matriz  $[X_{(n \times m)}]$ .

Una autoimagen asociada a un valor singular dado  $\sigma_i$ , contribuye a la reconstrucción de  $[X_{(n \times m)}]$  proporcional a la magnitud del valor singular. La mayor contribución en la representación o reconstrucción de  $[X_{(n \times m)}]$ , estará contenida por lo general en las primeras autoimágenes.

### ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES EN TÉRMINOS DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA DESCOMPOSICIÓN DE VALORES SINGULARES.

La matriz de datos  $[X_{(n \times m)}]$ , de acuerdo a la transformación de descomposición de valores singulares, puede expresarse como:

$$[X_{(n \times m)}] = [U_{(n \times n)}] [\Lambda_{(n \times m)}] [V_{(m \times m)}]^T$$

Que al considerar la matriz de Karhunen-Loeve o de Componentes Principales

$$[K_{(n \times m)}] = [U_{(n \times m)}]^T [X_{(n \times m)}]$$

Para  $[K_{(n \times m)}]$  obtenemos:

$$[K_{(n \times m)}] = [U_{(n \times n)}]^T [U_{(n \times n)}] [\Lambda_{(n \times m)}] [V_{(m \times m)}]^T = [\Lambda_{(n \times m)}] [V_{(m \times m)}]^T$$

Las componentes principales pueden concebirse como el producto de la matriz transpuesta  $[U_{(n \times n)}]^T$ , con la matriz de datos  $[X_{(n \times m)}]$ ; o como la matriz transpuesta  $[V_{(m \times m)}]^T$ , multiplicada o pesada con sus valores singulares  $[\Lambda_{(n \times m)}]$ .

La reconstrucción  $[X_{(n \times m)}^\wedge]$  de  $[X_{(n \times m)}]$  a partir de las Componentes Principales o de la matriz de Karhunen-loeve  $[K_{(n \times m)}]$  puede obtenerse de:

$$[X_{(n \times m)}^\wedge] = [U_{(n \times n)}] [K_{(n \times m)}] = [U_{(n \times n)}] [\Lambda_{(n \times m)}] [V_{(m \times m)}]^T$$

$$[X^{\wedge}(n \times m)] = [U(n \times n)] [U(n \times n)]^T [X(n \times m)]$$

$$[X^{\wedge}(n \times m)] = [X(n \times m)] [V(m \times m)] [V(m \times m)]^T$$

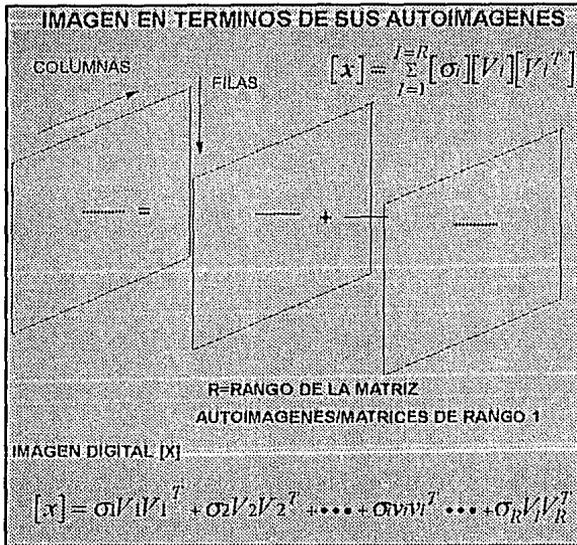
Donde:

$[U(n \times n)]$  Es una matriz diagonal cuyo i-ésimo elemento es el i-ésimo valor singular de la matriz de datos  $[X(n \times m)]$ ; con  $\sigma = +\sqrt{\lambda}$  y  $\sigma_i > \sigma_{i+1}$  siendo  $\lambda$  el i-ésimo valor propio de la matriz varianza-covarianza  $[Cf(n \times n)]$ .

## METODOLOGIA.

El análisis de la configuración o representación en formato vector del campo en estudio, permite una explicación e interpretación de carácter cualitativo de la información; análisis que a su vez permite la identificación de áreas anómalas representativas que quedan determinadas en planta por una matriz de orden (n,m).

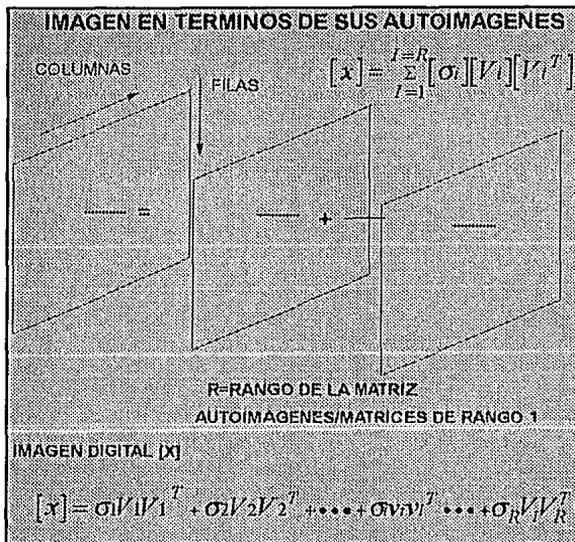
Para la aplicación de Análisis de componentes Principales, de los datos del área seleccionada, se estima la matriz varianza-covarianza de orden (n,n), en la que implícitamente están incorporadas las características estadísticas propias de los datos. De la matriz varianza-covarianza se calculan los autovectores y autovalores correspondientes, y se grafica la magnitud relativa de estos últimos, en función de su índice de posición.



De la gráfica de la magnitud relativa de los autovalores, en función del índice de posición, se adopta el porcentaje que determinará el número de componentes principales que intervendrán en la reconstrucción.

Del número de autoimágenes eslimadas necesarias y convenientes en la reconstrucción, posterior a la proyección de los datos en el sistema ortogonal, definido por los autovectores de la matriz varianza-covarianza o matriz de Karhonen-Loeve, se efectúa la reconstrucción propiamente dicha.

A partir de la reconstrucción de la imagen se procede a su vectorización o rasterización y despliegue y/o configuración.



De la gráfica de la magnitud relativa de los autovalores, en función del índice de posición, se adopta el porcentaje que determinará el número de componentes principales que intervendrán en la reconstrucción.

Del número de autoimágenes estimadas necesarias y convenientes en la reconstrucción, posterior a la proyección de los datos en el sistema ortogonal, definido por los autovectores de la matriz varianza-covarianza o matriz de Karhonen-Loeve, se efectúa la reconstrucción propiamente dicha.

A partir de la reconstrucción de la imagen se procede a su vectorización o rasterización y despliegue y/o configuración.

## ANEXO C

### FILTRADO

Los mapas obtenidos mediante métodos potenciales, en ocasiones es necesario aplicarles procesos de filtrado para realizar las interpretaciones tanto cualitativas como cuantitativas, ya que con ello podrán reconocerse alineamientos estructurales regionales o bien anomalías residuales asociadas a estructuras someras de interés económico. Los procesos de filtrado digital pueden realizarse en el dominio espacial mediante la convolución o bien, mediante el producto Espectral en el dominio de la frecuencia (número de onda).

**Filtrado Espacial.**- Es realizado mediante la convolución de la función espacial discreta con una función de peso denominada operador, y está definida por:

$$C_{x,y} = \sum_{x'=0}^{M-1} \sum_{y'=0}^{N-1} a_{x',y'} b_{x-x',y-y'} = a_{x',y'} * b_{x',y'}$$

Donde  $C_{x,y}$  es la función discreta filtrada.

$a_{x',y'}$  es la función discreta de entrada

$b_{x-x',y-y'}$  es la función de peso u operador y  $*$  denota la convolución.

**Filtrado Frecuencial.**- Es realizado mediante la aplicación del Teorema de la Convolución, el cual establece que la convolución de dos señales en el dominio espacial es equivalente al producto espectral de sus transformadas de Fourier y esta definido por:

$$C_{x,y} = a_{x,y} * b_{x,y} \Leftrightarrow C(u,v) = A(u,v)B(u,v)$$

Donde  $A(u,v)$  es la Transformada de Fourier de la matriz de datos.

$B(u,v)$  es la Transformada de Fourier del operador.

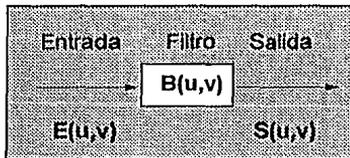
$C(u,v)$  es la matriz resultante del producto puntual de  $A(u,v)$  por  $B(u,v)$

El símbolo  $\Leftrightarrow$  representa la Transformada de Fourier.

**Función de Transferencia.**- Un filtro puede verse como un sistema lineal, en donde la señal de salida está en función de la señal de entrada.

$$S(u,v) = B(u,v)E(u,v)$$

La ecuación queda ilustrada en la figura siguiente:



De esta ecuación se tiene:

$$B(u,v) = S(u,v) / E(u,v)$$

A la relación anterior se le conoce como Función de Transferencia o Respuesta en Frecuencia y representa el comportamiento del filtro en el dominio de la frecuencia.

## ANEXO D

### BREVE DESCRIPCION DE LAS FORMACIONES GEOLOGICAS DEL AREA GUAXCAMA (PLATAFORMA SAN LUIS POTOSI-VALLES)

#### FORMACION TAMAULIPAS INFERIOR.

Se encuentra un sólo afloramiento de escasa proporción en la parte Nor-Oriental en la hoja San Luis Potosí. (F-14-A-85) al Norte del poblado San José de Gomez y sobre el flanco Occidental de la Sierra de Alvarez y con dimensiones de 600 m de largo por 500 m de ancho. En el subsuelo el Pozo Xoconoxtle-1 corto 1156 m. de esta Formación, sin embargo, este espesor esta afectado por una falla de empuje mostrando que su columna está aumentada. El depósito de esta Formación se efectuó durante el Bemiasiano al Barremiano. Cronológicamente se puede correlacionar con parte de la Formación Guaxcama, Calizas sin nombre formacional, Santuario y Taraises.

El contacto inferior no se observó se infiere por información del Pozo Xoconoxtle-1 que descansa concordantemente en sedimentos de la Formación Pimienta e infrayace de igual manera a la Formación La Peña en la parte Occidental del Anticlinal de Alvarez mientras que al Oriente el afloramiento se encuentra montado por fallamiento inverso a la Formación Tamabra.

El ambiente de depósito se describe considerando la micrita que es su principal componente ortoquímico de las rocas que componen esta Formación, ésto indica un medio sedimentario marino de baja energía mecánica, afectado por un clima cálido a templado que favoreció la precipitación química de los carbonatos, éstos al depositarse conjuntamente con los microfósiles planctónicos observados en los estudios ópticos revelan un medio de depósito de aguas profundas. La presencia de escasos fragmentos de organismos bentónicos comunes de plataforma, como los moluscos, equinodermos y briozoarios en un medio de baja energía mecánica, deben considerarse de mayor aloctonía que los organismos planctónicos. La presencia de los nodulos y lentes dolomíticos es una evidencia que también se ha considerado como índice de que estas rocas se formaron fuera de los medios de plataforma. La dolomitización debió ser penecontemporanea más que post-depositacional.

## FORMACION GUAXCAMA.

Aflora en el extremo Nor-Oriental hoja Sta. Catarina (INEGI F-14-A-85 ) en la Rancheria Laguna de Sto. Domingo, también se encuentra expuesta en menor dimension en los poblados La Salidita y Paraiso de la misma hoja.

En esta área de trabajo, la Formación se encuentra sumamente deformada y plegada, sólo se pudo observar su cima, la cual se encuentra cubierta en forma concordante por las calizas de la Formación El Abra.

El Pozo Guaxcama-1 cortó 3009 m. de evaporitas, aunque se piensa que está aumentado por fallamiento.

La edad de la Formación se ha considerado Barremiano-Apliano. Cronológicamente se puede correlacionar con parte de las Formaciones Tamaulipas Inferior, Cupido, Santuario, Taraises, La Peña y con las Calizas Ahuacallán.

Subyace concordantemente a las rocas de la Formación El Abra, su contacto inferior no se observó pero por información antecedente (I.ES.22) sobreyace a sedimentos del Jurásico Superior, (Pozo Agua Nueva-1), a lechos rojos (Pozo Guaxcama-1) y a sedimentos de cuenca (Pozo Colmena-1) Formación Tamaulipas Inferior.

La Formación Guaxcama se depositó en una extensa plataforma somera separada de mar abierto, donde la circulación de agua debió ser restringida y la evaporación muy fuerte para dar lugar a las altas concentraciones del sulfato de calcio y su posterior precipitación formando en sus bordes barreras de tipo orgánico. La presencia de calizas de mar abierto, marca un cambio brusco en las condiciones sedimentológicas, dando origen a rocas de cuenca representadas por depósitos de lodo calcáreo sobre una plataforma marina sumergida a profundidades batiales, con una buena oxigenación y circulación de agua; donde el área posiblemente se encontraba sufriendo inestabilidad tectónica.

## **FORMACION LA PEÑA.**

Se encuentra aflorando en el flanco Occidental del Anticlinal de Alvarez, al Norte del poblado El Capulín, con dimensiones de 100 m de ancho por 800 m de largo, en el extremo Nor-Oriental de la hoja San Luis Potosí, F-14-A-84.

No se midió su espesor por estar erosionada la cima, sin embargo, el Pozo Xoconoxtle-1 cortó 182 m.; en base a su contenido faunístico se le considera una edad Aptiano. Se correlaciona cronoestratigráficamente con las Formaciones Horizonte Otates, parte de Calizas Ahuacatlán, Tamabra y Guaxcama.

En el área de estudio, esta unidad se encuentra infrayaciendo concordantemente a la Formación Cuesta del Cura y descansa de igual manera sobre la Formación Tamaulipas Inferior en la parte Occidental del área, mientras que en el extremo Oriental se encuentra montada por fallamiento inverso en la Formación Tamabra.

Su contenido faunístico y caracteres litológicos permiten suponer que se depósito bajo aguas neríticas profundas con aporte de terrígenos, ocasionados quizá por un ligero aumento en la velocidad de hundimiento.

## **FORMACION TAMABRA.**

Esta unidad aflora en la porción Occidental de la Sierra de Alvarez formando una larga franja con una longitud aproximada dentro del área de estudio de 24 Kms. hacia el margen Occidental de la hoja S.L.P. (F-14-A-84), extendiéndose hacia el Norte y hacia el Sur fuera del prospecto con una amplitud de 1 a 4 Kms., desaparece al Oriente del Anticlinal de Alvarez por estar cubierta de sedimentos de cuenca sobrepuestos del Cretácico Superior, hacia el Occidente del mismo anticlinal se trunca por fallamiento inverso; predominando rocas de cuenca, sin poder observar con precisión sus cambios de facies.

Por el contenido orgánico, se le asigna una edad del Aptiano al Cenomaniano. Es isocrona con parte de las Formaciones La Peña, El Abra, Cuesta del Cura, Tamaulipas Superior y con las Calizas Ahuacallán.

Su contacto inferior no se observó, pero en el subsuelo, dentro de los bordes de la plataforma de San Luis Potosí-Valles y en los del Atolón de la Faja de Oro, se le ha encontrado descansando concordantemente sobre la Formación Tamaulipas Inferior; en tanto la cima de esta unidad se encuentra sobreyacida discordantemente por sedimentos de la Formación Soyatal.

El ambiente de esta unidad está representado fundamentalmente por una mezcla de sedimentos autóctonos y alóctonos, el tamaño y forma del sedimento alóctono es variable, siendo desde litoclastos con tamaños diferentes, generalmente transportados en forma de corrientes, como depósitos turbidíticos alrededor de una pendiente o talud arrecifal, a profundidades neríticas en áreas de plataforma continental.

#### **FORMACION EL ABRA.**

Las calizas de plataforma de esta Formación se encuentran dentro del prospecto enmascaradas respecto a su distribución por las rocas terrígenas de cuenca, que por tectónica de sobrecoimiento se hallan encima de esta unidad

Esta unidad se encuentra aflorando en la porción Occidental (Hoja Sta. Catarina F-14-A-85 INEGI) formando franjas alargadas con orientación NW-SE, también se tienen pequeños afloramientos en forma de ventanas tectónicas al Norte de la Ranchería San Jerónimo y en el extremo Oriental del área de trabajo, al Sur-Este del poblado de Sta. Gertrudis, se tienen otros afloramientos de menor dimensión al Norte del mismo poblado.

No se midió su espesor ya que no se encuentra totalmente expuesto en el área de trabajo, pero es bien sabido que tiene variaciones en dicho espesor debido a las irregularidades que debió tener el fondo marino durante su depositación. Se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano. Esta

unidad se correlaciona con las Formaciones Cuesta del Cura, Tamabra, Tamaulipas Superior y las Calizas Ahuacatlán.

Los sedimentos de la Formación El Abra fueron depositados en extensas zonas de plataforma estable de aguas someras en dos ambientes mayores: arrecifal, caracterizado por una gran diversidad de fauna y lagunoso, distinguido por microfauna principalmente bentónica.

Se definen una gran variedad de subambientes que varían de tatud externo, arrecifal, borde arrecifal, post-arrecifal-lagunoso, de planicie de mareas y lagunoso.

El hundimiento en estas plataformas fue lento pero continuo, lo que propició su gran espesor, Aguayo (1978) hace notar que el medio arrecifal de El Abra contiene fábricas diagenéticas que reflejan ciclos repetitivos tanto de sumersión como de emersión de la Plataforma S.L.P.-Valles.

#### **FORMACION CUESTA DEL CURA.**

Se encuentra aflorando al Norte de los poblados Cuesta de Campo y Monte Calera en el extremo Nororiental de la hoja S.L.P. (F-14-A-84) con una longitud de 6 Kms. de ancho, extendiéndose hacia el Sur del prospecto, hasta el extremo Suroccidental, hoja Sta. Catarina F-14-A-85.

Los afloramientos observados en el área de estudio no permitieron medir el espesor por estar fallada y plegada; la fauna encontrada permitió establecer una edad Albiano-Cenomaniano. Se correlaciona isocronamente con las Formaciones Tamabra, El Abra y Tamaulipas Superior.

La Formación Cuesta del Cura descansa concordantemente en la Formación La Peña y en forma normal está cubierta por los sedimentos de la Formación Indidura.

Esta Formación se depositó en ambientes neríticos profundos, de pendientes inclinadas e irregulares, en mares abiertos con facies transgresivas, donde la fuente de suministro de sílice pudo provenir de la disolución continental de silicatos.

### **FORMACION INDIDURA.**

Se encuentra aflorando en el extremo Nor-Oriental, hoja S.L.P. F-14-A-84 formando valles principalmente. Por su contenido faunístico y posición estratigráfica, se le asigna una edad del Turoniano. Se correlaciona con las Formaciones Agua Nueva, Soyatal y en el miembro Inferior de Tamasopo.

Dentro del área descansa concordantemente a la Formación Cuesta del Cura y en partes se encuentra abrigada por rocas ígneas extrusivas ácidas.

Se depositó en ambientes muy variados, desde profundos hasta litorales. Tardy y Maury (1973) suponen que se depositó a consecuencia de una fase pretectónica que dio como producto una sedimentación tipo "Flysh Precoz" que tuvo como fuente de suministro una área emergida dando lugar a una depositación progresiva de sedimentos areno-arcillosos sobre la paleogeografía que existía durante el Cénomaniaco.

### **FORMACION SOYATAL.**

Se encuentra aflorando en el extremo Nor-Oriental, hoja INEGI F-14-A-84 y se continúa hacia la parte Sur-Occidental (hoja Sta. Catarina F-14-A-85) formando franjas alargadas con orientación NW-SE. También se presentan otros afloramientos de menor magnitud al Occidente del poblado Sta. Catarina, S.L.P. Esta Formación presenta un corrimiento, debido a fallas por empujes tangenciales, cubriendo parte de las rocas autóctonas de la Plataforma Valles-S.L.P., en ocasiones se encuentran separadas por erosión y rodeando la superficie desgastada de la Formación El Abra, formando Klippes.

Varios autores consideran que esta Formación tiene una edad Turoniano, pero la fauna que se encontró permitió establecer una edad del Turoniano-Coniaciano.

Se depositó en una secuencia marina pre-flysh, en ambientes variados con un mar transgresivo de la parte Occidental hacia la parte Oriental de la Cuenca Mesozoica del Centro de México.

#### **FORMACION TAMASOPO (MIEMBRO SUPERIOR).**

Se tiene un sólo afloramiento en el área y se localiza en la porción Norte, hoja Sla. Catarina, al Oriente del poblado Morenos y al Norte del Rancho La Presa, de forma alargada con dirección NW-SE con amplitud de 3.5 Kms. y longitud 7 Kms. prolongándose hacia el Norte fuera del área de trabajo.

En base a su posición estratigráfica y al contenido microfaunístico observado, se estima una edad del Coniaciano - Santoniano. Se correlaciona con las Formaciones San Felipe y Soyatal.

Esta unidad se depositó sobre una plataforma de aguas someras, en áreas cercanas a zonas arrecifales con alta energía.

#### **FORMACION CARDENAS.**

Se encuentra aflorando en el flanco Occidental del Anticlinal San Nicolas, en el extremo Nor-Central, hoja ENEGI F-14-A-85, al Oriente del poblado Morenos, con una longitud de 3 Kms. por 800 m. de ancho con dirección NW-SE, también se tienen otras dos ventanas de forma irregular y de menor tamaño al Norte y al Sur del mismo poblado.

Por su contenido de microfósiles que se encontraron y su posición estratigráfica, se determinó una edad del Campaniano- Maestrichtiano. La Formación Cardenas es Isócrona con Mezcala y Méndez. En el área abriga concordantemente a sedimentos de la Formación Tamasopo y sólo se observaron sedimentos recientes sobre estas rocas.

Su depósito fue en ambientes deltaicos o transicionales, donde el área se encontraba sometida a un continuo levantamiento y fuertes erosiones dando lugar a frecuentes aportes de sedimentos terrígenos.

### **FORMACION MEZCALA.**

Se encuentra distribuida a lo largo del flanco oriental de la Sierra de Alvarez (hoja S.L.P. F-14-A-84), también se localizan pequeños núcleos sobre una parte del borde Occidental de la plataforma Valles-S.L.P. (hoja Sta. Catarina F-14-A-85), hacia la parte central del área de trabajo.

Por su posición estratigráfica y contenido microfaunístico, se le ha designado una edad del Santoniano-Maastrichtiano. Es isócrona con las formaciones Cardenas, Tamasopo (miembro Sup.) y Méndez.

Descansa concordantemente en la Formación Soyatal, en partes abriga en forma discordante a la Formación El Abra; su contacto superior se encuentra erosionado y sólo se observó en forma discordante con sedimentos recientes.

Esta Formación al igual que la Soyatal se encuentra afectada por fallas de empujes tangenciales, resbalándose sobre los sedimentos autóctonos de una parte en la plataforma, al irse erosionando van quedando afloramientos rodeados por la Formación El Abra formando klippes.

Se depositó en un ambiente marino de aguas someras y baja energía, formando una sedimentación lipo Flysch, con frecuentes aportes de sedimentos terrígenos.

## **DEPOSITOS RECIENTES.**

**CONGLOMERADOS.-** Sobreyacen discordantemente a rocas sedimentarias del Cretácico e infrayace de igual manera a rocas volcánicas del Terciario. Esta unidad se originó durante los eventos de deposición aluvial Pleistoceno y Reciente que provocaron depósitos gravosos, sobre todo en las fajas de Piamonte.

**ALUVION.-** Se distribuye en las partes topográficas más bajas de los valles, así como a lo largo de los ríos y arroyos.

## **ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS.**

El vulcanismo y magmalismo presentes en el área de estudio y regiones aledañas, pertenecen a la provincia alcalina del Oriente de México y han sido datadas de edad Oligoceno Superior, Mioceno Inferior por el I.M.P.; producto de la subducción del Pacífico considerado como evidencia de un plutonismo sinorogénico (De Csema, 1952).

## **ROCAS INTRUSIVAS ACIDAS.**

Se infiere un pequeño dique diorítico no mapeable al SW del poblado de Sta. Catarina, S.L.P., afectando rocas extrusivas andesíticas y calizas de plataforma; además supone la existencia de un cuerpo intrusivo que lo colocan en el Oligoceno-Mioceno (Del Prospecto Sta. Catarina I.G.-618).

**INTRUSIVO PALO VERDE.-** Es un pequeño afloramiento que se localiza en la parte Centro-Sur de la hoja F-14-C-15. Está clasificado mineralógicamente como un granito alcalino, en el cual es típico encontrar intemperismo esferoidal y abundantes inclusiones de rocas pertenecientes a la ignimbrita Santa María.

## **ROCAS EXTRUSIVAS INTERMEDIAS.**

Se encuentran aflorando en la porción Nor-Oriental de la hoja F-14-A-85, rellenando fracturas en forma de dos diques que se intersectan en su porción Sur, dando la apariencia de una herradura, de dimensiones de 1 a 1.2 Kms. de longitud por 100 m. de ancho. Existe otro afloramiento de este tipo de rocas en el poblado de Sta. Catalina con dimensiones de 6 Kms. de largo por 2.5 de ancho.

Estas rocas están formadas principalmente por andesitas, aglomerados y tobas andesíticas. Presentan textura porfídica de color café grisáceo que sobreyacen a cuerpos ígneos intrusivos de probable composición granítica. G.Baillet, (1984) sugiere que para originar este tipo de vulcanismo, se necesitan las siguientes condiciones dentro de un marco tectónico de subducción de placas.

Primero: La fusión parcial y progresiva de la corteza oceánica de la placa busante que libera el potasio resultante de los minerales presentes en ella.

Segundo: La diferenciación de magmas bajo el arco volcánico por cristalización fraccionada.

De acuerdo a lo anterior para que exista un vulcanismo intermedio, se necesita inferir la existencia de un sistema de Islas volcánicas alineadas en torno al margen Occidental de la Placa Americana, que resultaron de la colisión de ésta con la Farallon en la zona de subducción, donde la fusión de ambas placas (continental de composición ácida y oceánica de un agregado básico) originaron la formación de los magmas de mezcla intermedia.

## **ROCAS EXTRUSIVAS ACIDAS.**

Los diferentes derrames riolíticos, ignimbriticos y tobáceos, configuran la mayor parte de rocas volcánicas del área han sido datados por el Instituto de Geología U.A.S.L.P. (folleto técnico 107), y

por la Comisión Federal de Electricidad (Folleto GH-S de Julio de 1990). A continuación se describen de acuerdo a los resultados obtenidos.

1.- RIOLITA PANALILLO.- Oligoceno Temprano (Chaliano).- Fue descrita formalmente por Labarthe, Tristan y Aranda (1982), dando este nombre a un grupo de flujo de cenizas soldadas (Trp) y tobas depositadas por aire (Tap), tomando el nombre de su localidad tipo, localizada al Oriente de la Ciudad de San Luis Potosí, en el poblado de Panalillo. Esta riolita se encuentra en la hoja F-14-A-84 sobre el entronque a Zaragoza y al Oriente de San Luis Potosí. Sobreyace discordantemente a los sedimentos marinos de la Sierra de Guanajuato, a las formaciones Indidura y Caracol en localidades esporádicas y a todas las rocas volcánicas terciarias en lugares dispersos.

2.- IGNIMBRITA STA. MARIA.- Fue propuesta formalmente con este nombre por Labarthe, Tristan y Aranda, (1982) considerando su localidad tipo en los cerros inmediatamente al Norte de la Ciudad de Sta. María del Río, S.L.P., los afloramientos se encuentran dispersos en la hoja F-14-A-84 al Oriente de esta, la mayoría de estos. Sobreyace discordantemente a la parte transicional de las formaciones Indidura y Caracol. Este paquete de rocas constituye la base de la secuencia volcánica del Oligoceno de San Luis Potosí.

3.- LATITA PORTEZUELO (OLIGOCENO TEMPRANO). Fue descrita por Labarthe, Tristan y Aranda (1982), considerando su localidad tipo en los cerros al Oriente del poblado Cerro de San Pedro, S.L.P. hoja F-14-A-84.

La Lalita Portezuelo sobreyace discordantemente a las formaciones Indidura y Cuesta del Cura.

#### **ROCAS EXTRUSIVAS BASICAS.**

Se sitúan al S-SW del poblado de Sta. Catarina, S.L.P., donde se localizan derrames basálticos que cubren un área aproximada de 16 Km , dentro del prospecto presenta una forma amorfa y se continúa hacia el Sur formando amplias mesetas que pueden correlacionarse en origen y en edad a la

localidad estudiada por el I.M.P. (Proyecto C-2010) al Norte del área datada de edad Mioceno; se considera de un evento volcánico más joven a los anteriores y es atribuido a un fenómeno distensivo.

## **ROCAS METAMORFICAS.**

Son aquellas generadas por la tectónica superpuesta que afectó el área durante el Cretácico Superior-Paleoceno. Se encuentra aflorando en zonas de corrimientos, en los planos de fallas principalmente, están formadas por milonitas, filitas y calizas marmorizadas en pequeños afloramientos que por su forma y espesor son imposibles de mapear.

### **III.1.3.- GEOLOGIA ESTRUCTURAL.**

#### **ANTICLINALES.**

##### **ANTICLINAL DE ALVAREZ.**

Se encuentra ubicado en la porción Nor-Oriental (hoja F-14-A-84) y se continúa al Sur-Este (hoja F-14-A-85) con una longitud dentro del área de 30 Kms. y una amplitud de 2 a 3 Kms., prolongándose hacia el Sur y hacia el Norte a las hojas vecinas, formando parte de la Sierra de Alvarez.

Se encuentra representando a la Sierra de Alvarez, de forma alargada, con una elevación máxima de 800 m. sobre el nivel del terreno del valle de San Luis Potosí, con una altura promedio de 2600 m. s.n.m. Las rocas aflorantes en la parte culminante del núcleo de la estructura es la Formación Tamabra y en el flanco Occidental del anticlinal se tiene expuesta la Formación Tamaulipas Inferior, montada por una falla de empuje sobre sedimentos de la Formación Tamabra, en la porción Nor-Occidental de la hoja F-14-A-84.

### **ANTICLINAL SAN FRANCISCO.**

Se encuentra situado en la parte Sur-Occidental de la hoja Santa Catarina F-14-A-85, continuándose hacia el Sur, presenta una longitud de 14 Km. y una amplitud de 4 a 7 Kms. aproximadamente.

Se encuentra representando el Valle de los Fantasmas, con una elevación de 500 m. sobre el nivel del terreno adyacente, presentando una altura máxima de 2300 m. sobre el nivel del mar. Las rocas que se encuentran aflorando son de la Formación El Abra del Cretácico Medio.

### **ANTICLINAL LA COLMENA.**

Se sitúa en la parte Sur-Occidental de la hoja F-14-A-85, con una amplitud de 3 a 4 Kms. y una longitud de 11 Kms. enmascarándose al Norte con sedimentos de la Formación Mezcala.

Está representando al puerto de la Descubridora, con una elevación de 500 m. sobre el Valle de Santa Catarina, alcanzando una altura promedio de 2200 m. sobre el nivel del mar. Las rocas aflorantes pertenecen a la Formación El Abra del Cretácico Medio y hacia la parte Norte de la estructura en ambos flancos lo forman sedimentos de la Formación Soyatal.

### **ANTICLINAL EL AGUACATAL.**

Se sitúa en la parte Centro-Occidental de la hoja F-14-A-85, alcanza una longitud aproximada de 17 Kms. y una amplitud de 3 a 5 Kms. busando hacia el Sur en el Valle de Santa Catarina.

Está representando un conjunto de Sierras alargadas, con una elevación promedio de 400 m. sobre el Valle de Santa Catarina y Morenos, alcanzando una altura de 1900 m. sobre el nivel del

mar. Las rocas que afloran pertenecen a la Formación EL Abra y en su flanco Oriental rocas ígneas extrusivas ácidas.

#### **ANTICLINAL DE TREJO.**

Se encuentra formando la Sierra de Trejo, localizándose hacia la parte central, Hoja F-14-A-85, presenta una longitud de 13 km. y una amplitud de 8 km. dentro del prospecto, desconociéndose su prolongación hacia el Norte y Sur, buzando en sus dos extremos en sedimentos Recientes del valle de Santa Catarina.

Topográficamente se comporta como una Sierra de forma irregular, alcanzando una altura máxima de 1850 m. sobre el nivel del mar y una mínima de 1200 m., produciendo un desnivel de 650 m. con respecto a los valles adyacentes.

A lo largo de la porción axial de esta estructura se encuentran aflorando rocas del Cretácico Medio de la Formación El Abra, limitada en sus extremos por rocas ígneas extrusivas y sedimentos Recientes.

#### **ANTICLINAL SAN NICOLAS.**

Se encuentra ubicado en la porción Nor-central, Hoja F-14-A-85 alcanzando una longitud de 6.5 km. y una amplitud de 1 a 3 km. dentro del área de trabajo, se continúa hacia el Norte fuera del prospecto y hacia el Sur desaparece en sedimentos Recientes.

Topográficamente se encuentra formado por una sierra angosta y alargada, alcanzando una altura máxima de 1800 m. sobre el nivel del mar, y mínima de 1400 m. produciendo un desnivel de 400 m. con respecto al valle de Morenos.

Las rocas que afloran en el núcleo de la estructura pertenecen a la Formación Tamasopo (Miembro Superior), en su flanco Occidental se encuentran rocas de la Formación Cárdenas y hacia el Oriente lo limitan sedimentos Recientes.

#### **SINCLINALES.**

##### **SINCLINAL DE ALVAREZ.**

Se encuentra ubicado en la parte Nor-Oriental, (Hoja San Luis Potosí F-14-A-84), continuándose hacia el extremo Sur-Occidental (Hoja Santa Catarina F-14-A-85), presenta una longitud de 28 km. y una amplitud de 1 a 5 km. dentro del área de trabajo, desapareciendo hacia el Norte en sedimentos Recientes y al Sur se prolonga a la hoja vecina.

Topográficamente está representando el flanco Oriental de la Sierra de Alvarez, con una elevación que fluctúa entre 1700 y 2100 m. sobre el nivel del mar.

Las rocas que se encuentran expuestas en su núcleo, pertenecen a sedimentos de la Formación Soyatal y hacia el extremo Norte se encuentran aflorando rocas más jóvenes de la Formación Mexcala.

##### **SINCLINAL LOS LLANITOS.**

Se encuentra situado en la parte Sur-Occidental Hoja F-14-A-85 presenta una longitud de 15 km. y una amplitud de 2 a 3 km. dentro del área de trabajo, hacia el Norte se pierde en sedimentos de la Formación Mexcala y al Sur se continúa fuera de la hoja de estudio.

Topográficamente está representando el valle del poblado Los Llanitos, está formado por pequeños lomeríos con elevaciones que fluctúan entre 1600 m. y 1800 m. sobre el nivel del mar.

Las rocas que se encuentran aflorando en su parte axial pertenecen a sedimentos de la Formación El Abra y en menor proporción se encuentran remanentes de la Formación Soyatal, presentes en las partes más bajas.

#### **FALLAS.**

Dentro del prospecto se observaron fallas inversas y de corrimientos de carácter regional, que modifican y enmascaran la estructura de las rocas autóctonas del Cretácico Medio, por efectos de la Orogenia Laramide, provocando que los sedimentos de cuenca cabalguen y cubran parte de la Plataforma San Luis Potosí-Valles, dando lugar a una tectónica superpuesta.

#### **FALLA XOCOONXTLE.**

Se encuentra ubicada en la porción Nor-Oriental (Hoja San Luis Potosí F-14-a-84), continuándose hacia la Hoja Santa Catarina F-14-A-85, en el extremo Sur-Occidental, sobre el flanco Occidental de la Sierra de Alvarez.

El tipo de esta falla es inverso, cabalgando hacia el Nor-Este, con una longitud de 22 km. aproximadamente dentro del área de trabajo. Tiene un rumbo de NW-SE 22, con un hechado aparente de 36 aproximadamente. Se tiene un salto de 800 m., en donde el bloque Occidental se movió hacia arriba con respecto al bloque del piso, poniendo en contacto anormal rocas de la Formación La Peña sobre sedimentos de la Formación Tamabra.

#### **FALLA LA CALERA.**

Se localiza en la porción Nor-Oriental de la Hoja San Luis Potosí F-14-A-84 y se continúa hacia la parte Sur-Occidental de la Hoja Santa Catarina F-14-A-85. Es de tipo inverso con traslape hacia el Occidente, con una longitud de 29 km. El rumbo general que presenta es de NW\_SE 25, con un

echado aparente de 50 . que los sedimentos arcillo-calcáreos se encuentran desplazados sobre el bloque de piso, poniendo en contacto anormal rocas de la Formación Soyatal sobre la Formación Tamabra.

#### **FALLA ARMADILLO DE LOS INFANTES.**

Se localiza en el extremo Nor-Occidental de la Hoja Santa Catarina F-14-A-85 en el flanco Oriental de la Sierra de Alvarez.

Es de tipo inverso con traslape al Oriente, con una longitud de 12 km. aproximadamente. Presenta un rumbo general de NW-SE 5 con un echado aparente de 30°. Tiene un salto de 500 m., el bloque del techo se desplazó hacia lo alto con respecto al bloque del piso, poniendo en contacto anormal sedimentos de la Formación Soyatal sobre rocas de la Formación Mexcala.

#### **CABALGADURA VALLE DE LOS FANTASMAS.**

Esta cabalgadura envuelve el flanco Oriental de la Sierra de Alvarez, sobre el margen Occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, formado por rocas de tipo Flysch de las Formaciones Soyatal y Mexcala del Cretácico Superior, sobre el complejo calcáreo arrecifal de edad Albiano-Cenomaniano.

El sobrecorrimiento cubre de forma parcial las rocas calcáreas autóctonas y en ocasiones se encuentra separado por erosión, rodeando la superficie desgastada de la Formación El Abra, formando Klippes.

#### **FALLA SAN NICOLAS.**

Se tiene la presencia de una falla de desplazamiento a rumbo, la cual es de tipo dextral, localizada en la parte Norte-Centro, Hoja F-14-A-85, y se infiere para explicar la brusca terminación del Anticlinal de Trejo al Norte, se orienta de una manera general WSW-ENE.

ANEXO E

IMAGENES COMPUESTAS

IMAGEN DE SATELITE

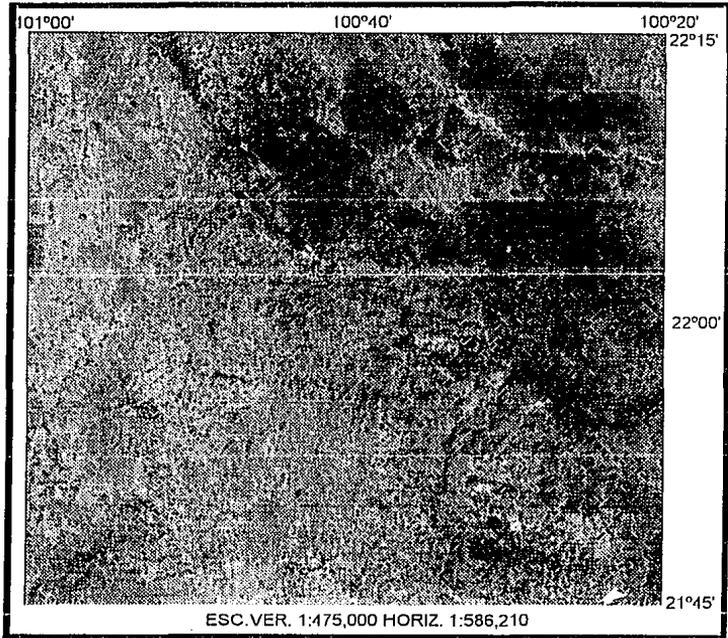
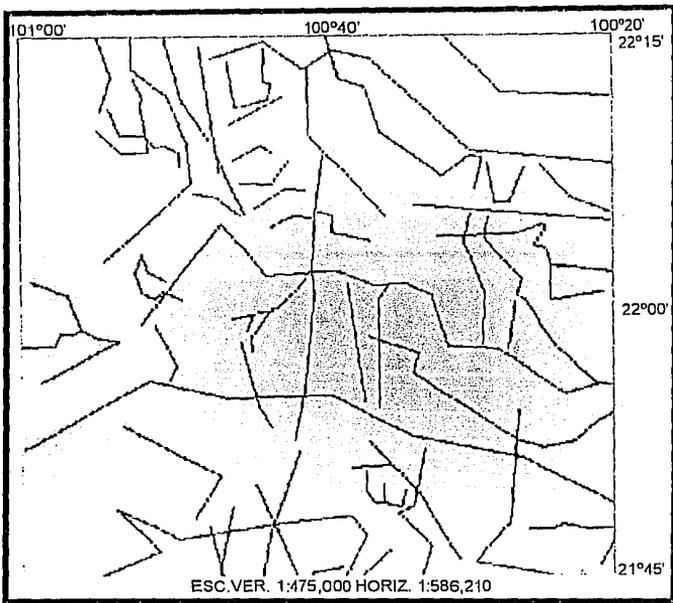
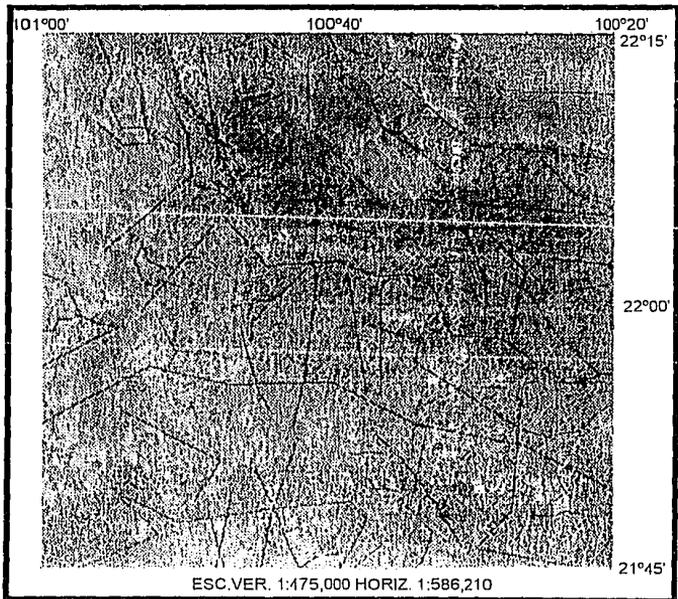


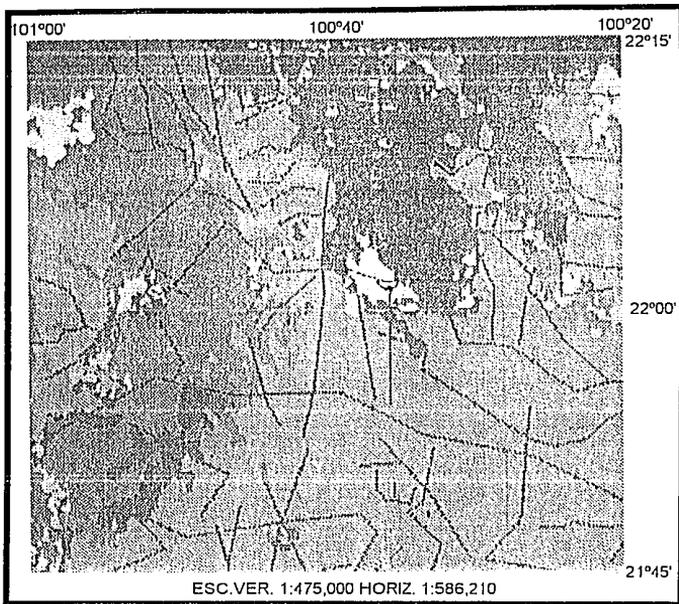
IMAGEN DE SATELITE



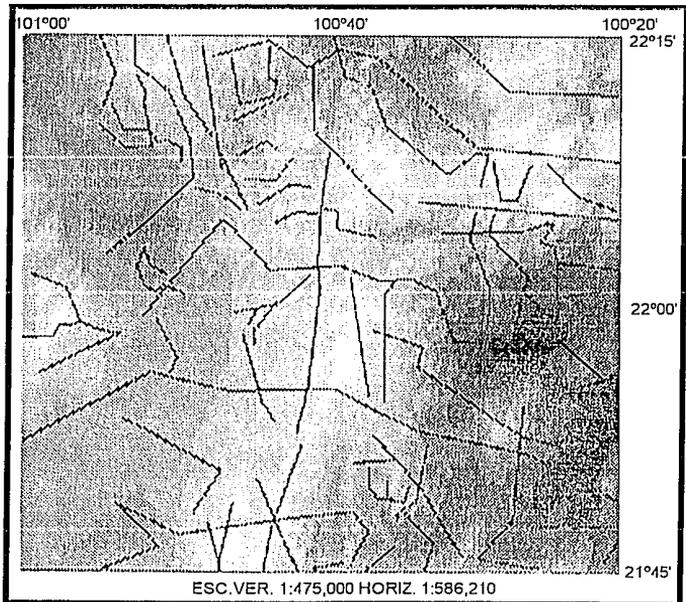
LINEAMIENTOS DE LA IMAGEN DE SATELITE



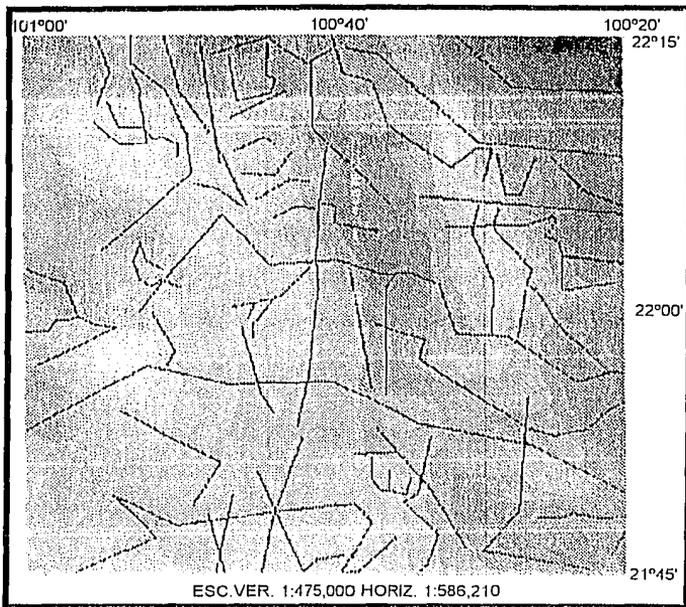
LINEAMIENTOS DE LA I. DE SATELITE-IMAGEN DE SATELITE



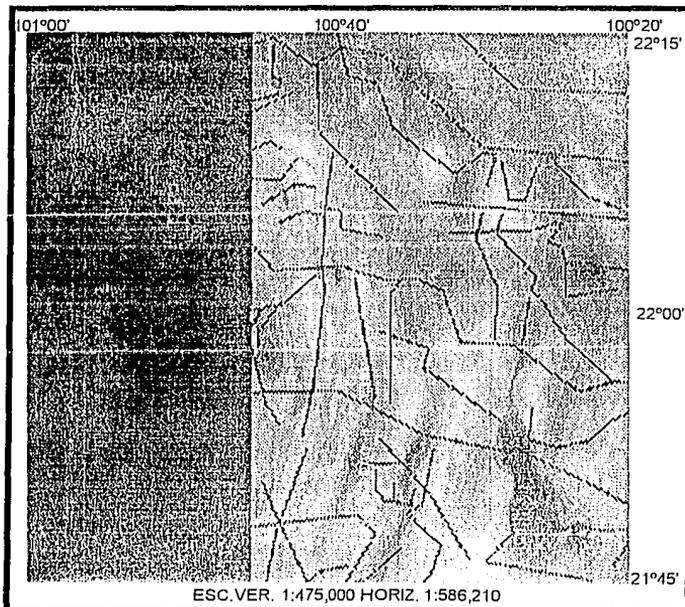
LINEAMIENTOS DE I.DE SATELITE-IMAGEN GEOLOGICA



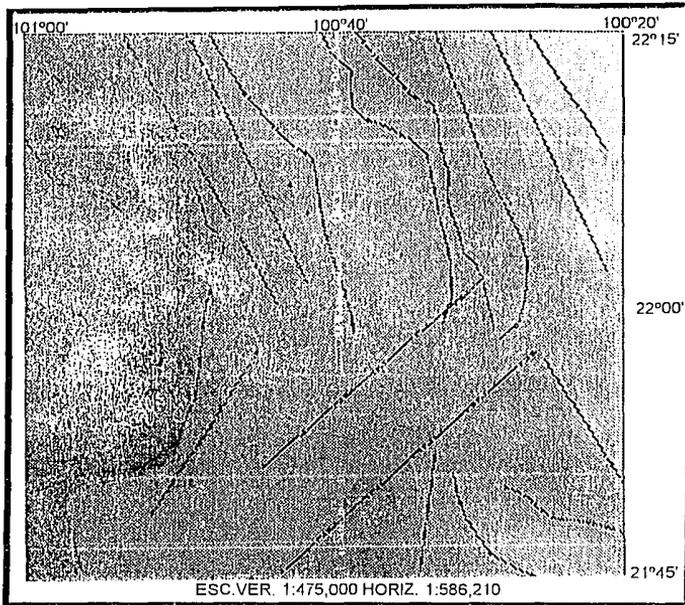
LINEAMIENTOS DE LA I.DE SATELITE-IMAGEN TOPOGRAFICA



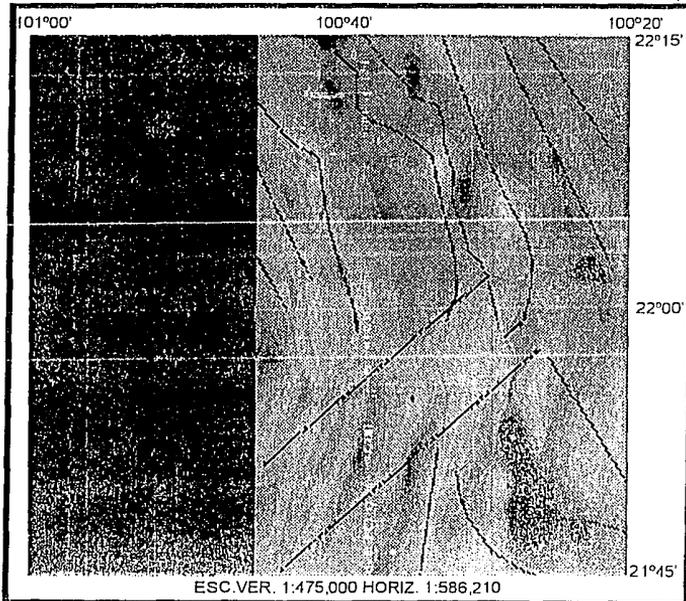
LINEAMIENTOS DE I.DE SATELITE-IMAGEN DE A.B.



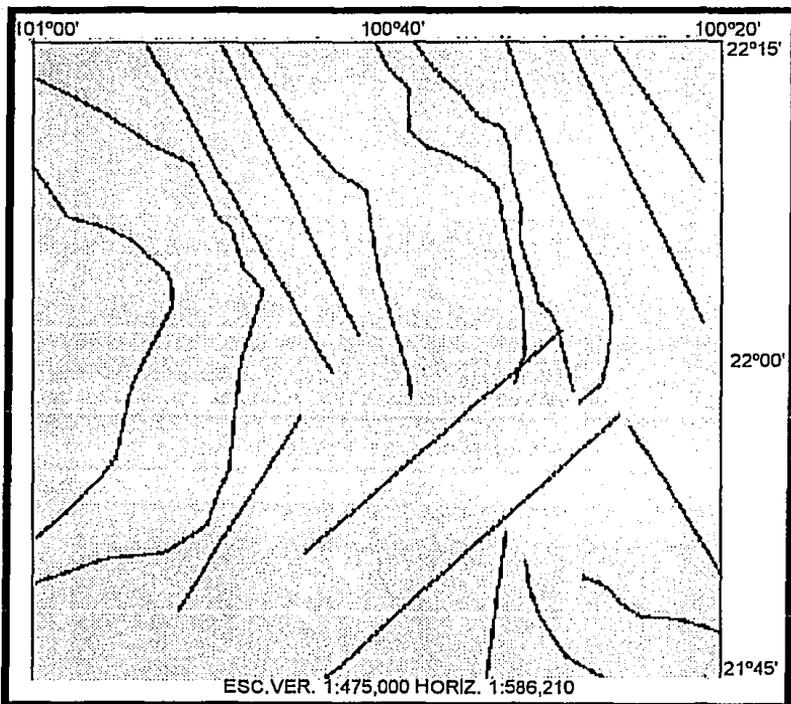
LINEAMIENTOS DE LA I.DE SATELITE-IMAGEN DE I.M.T.



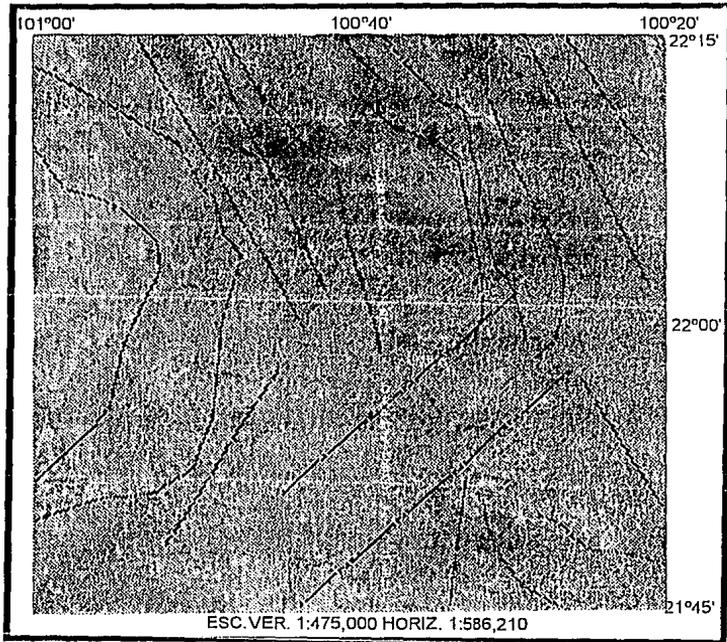
LINEAMIENTOS DE A.B.-IMAGEN DE A.B.



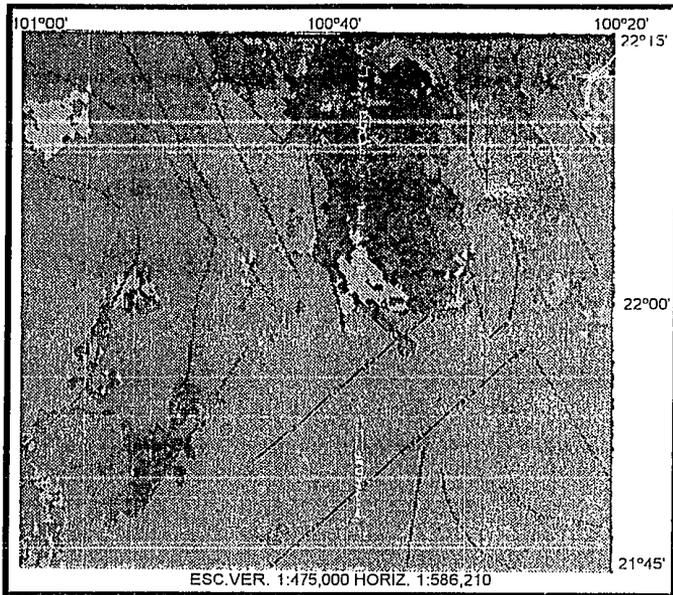
LINEAMIENTOS DE A.B.-IMAGEN DE I.M.T.



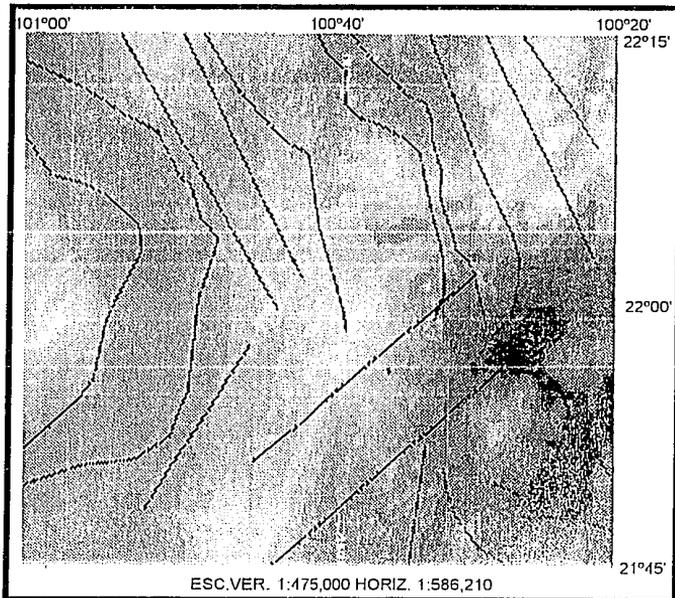
LINEAMIENTOS DE A.B.



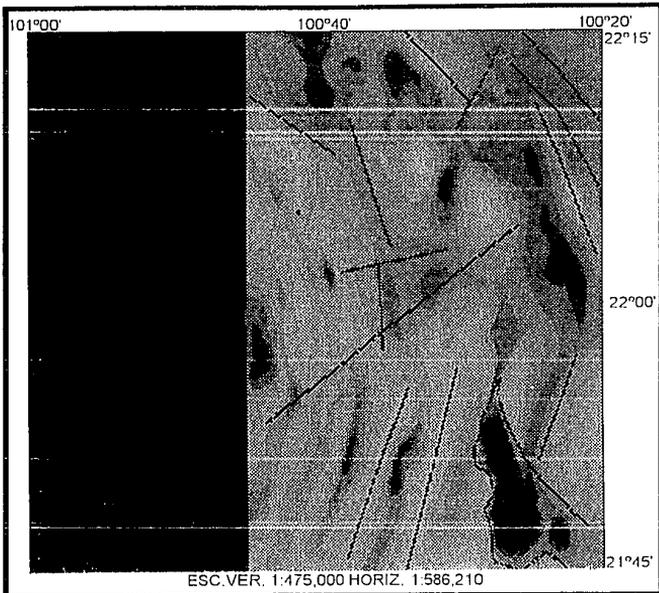
LINEAMIENTOS DE A.B.-IMAGEN DE SATELITE



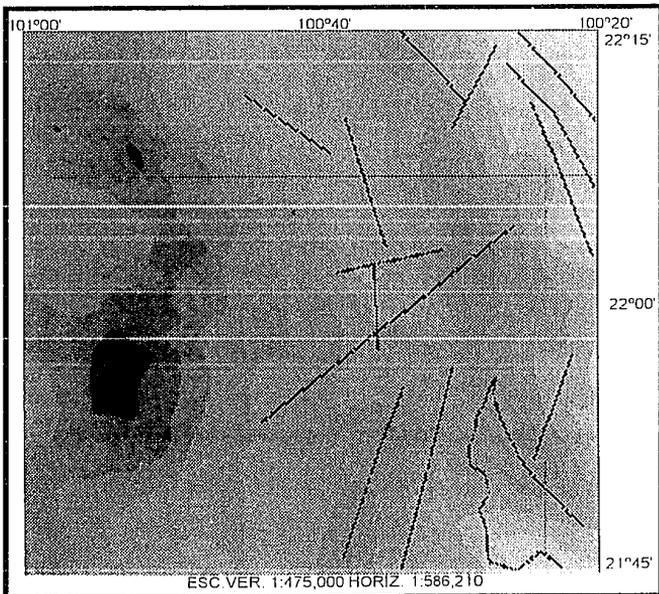
LINEAMIENTOS DE A.B.-IMAGEN GEOLOGICA



LINEAMIENTOS DE A.B.-IMAGEN TOPOGRAFICA

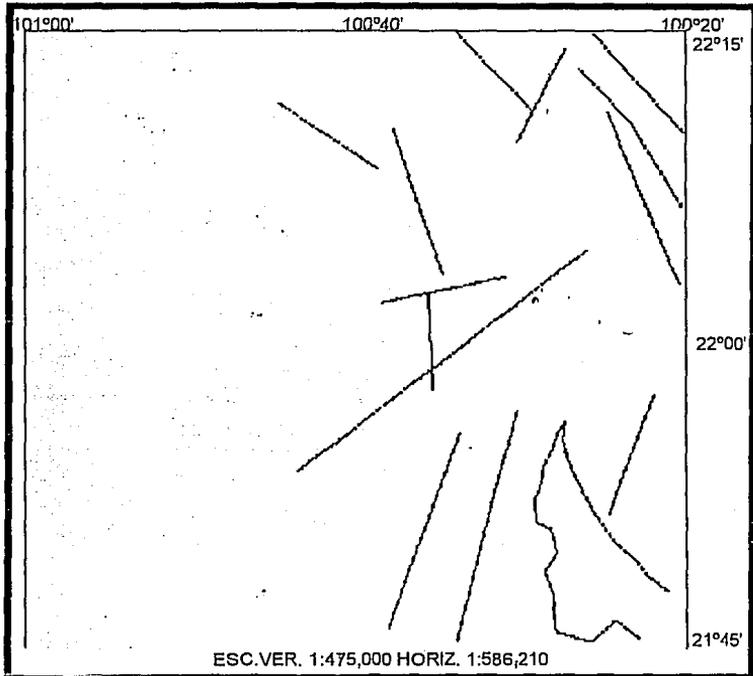


LINEAMIENTOS DE I.M.T.-IMAGEN DE I.M.T.

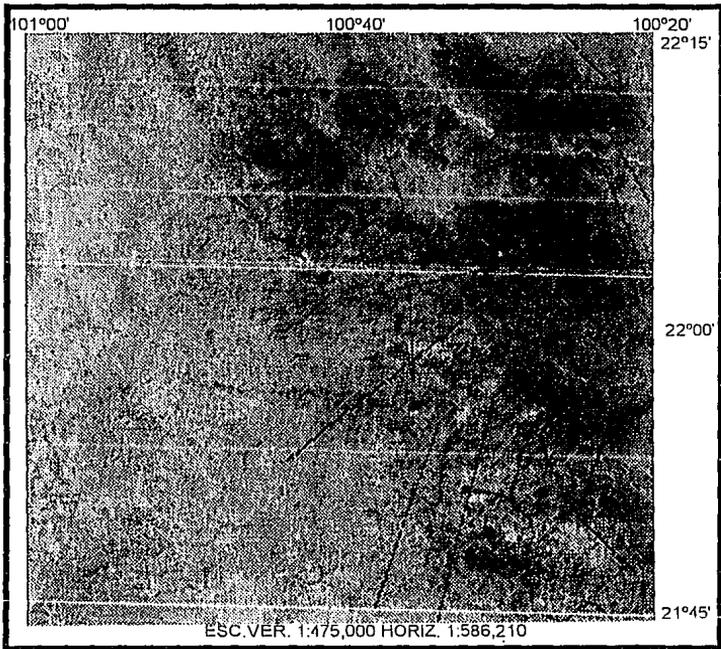


LINEAMIENTOS DE I.M.T.-IMAGEN DE A.B.

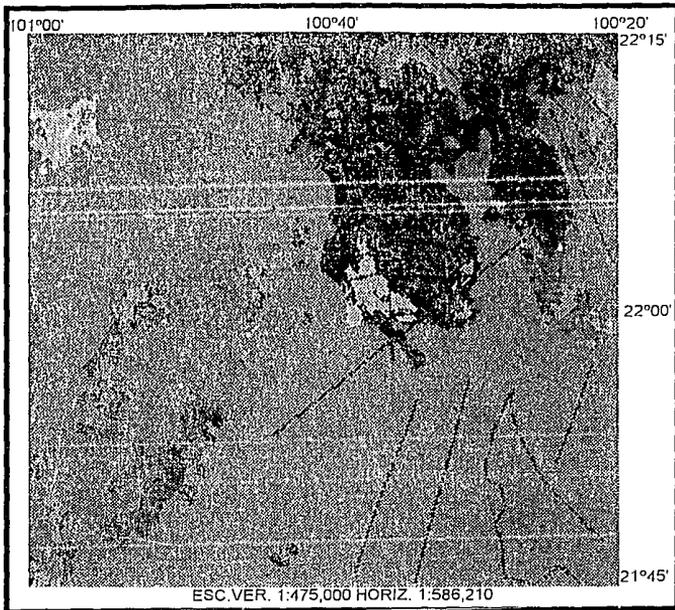
LINEAMIENTOS DE INTENSIDAD MAGNETICA TOTAL (I.M.T.)



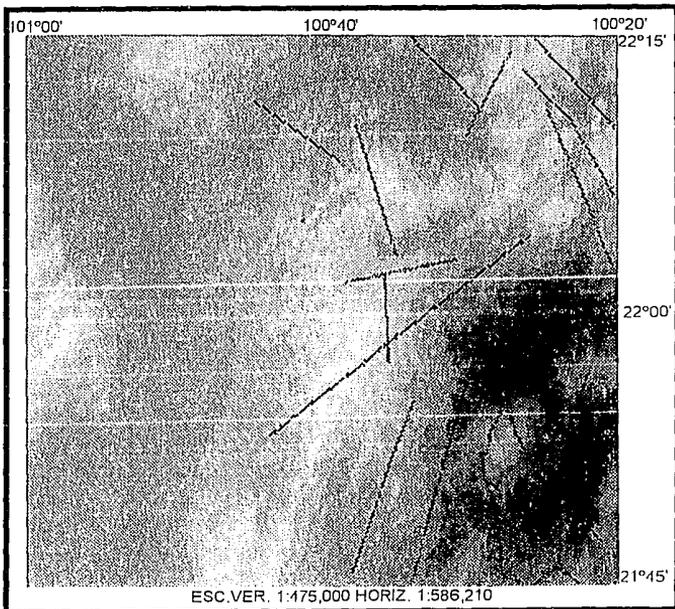
LINEAMIENTOS DE I.M.T.



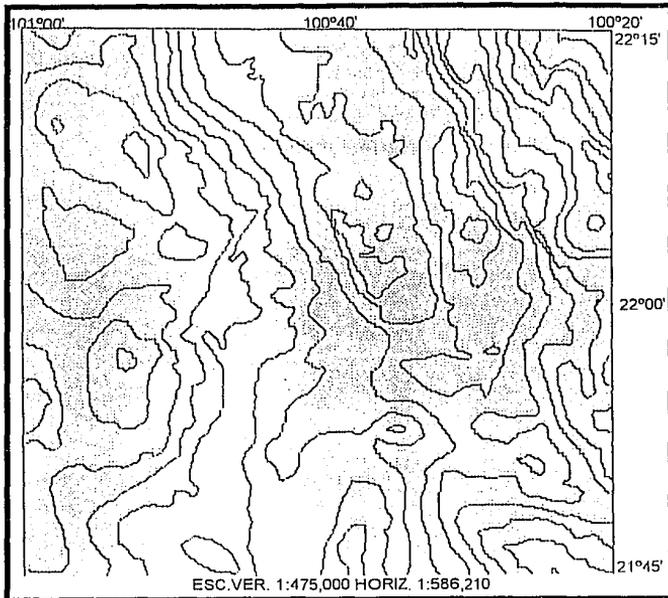
LINEAMIENTOS DE I.M.T.-IMAGEN DE SATELITE



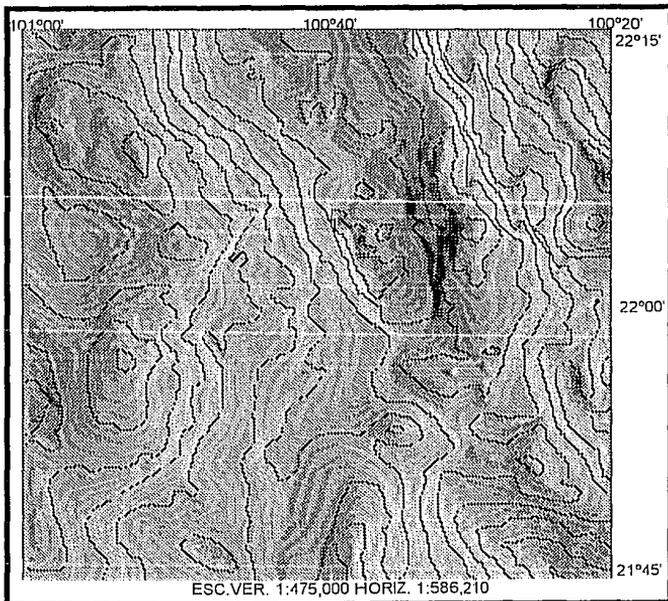
LINEAMIENTOS DE I.M.T.-IMAGEN GEOLOGICA



LINEAMIENTOS DE I.M.T.-IMAGEN TOPOGRAFICA



CONTORNOS DE ANOMALIA DE BOUGUER



CONTORNOS DE A.B.-GRADIENTE HORIZONTAL DE A.B.

IMAGEN GRAVIMETRICA

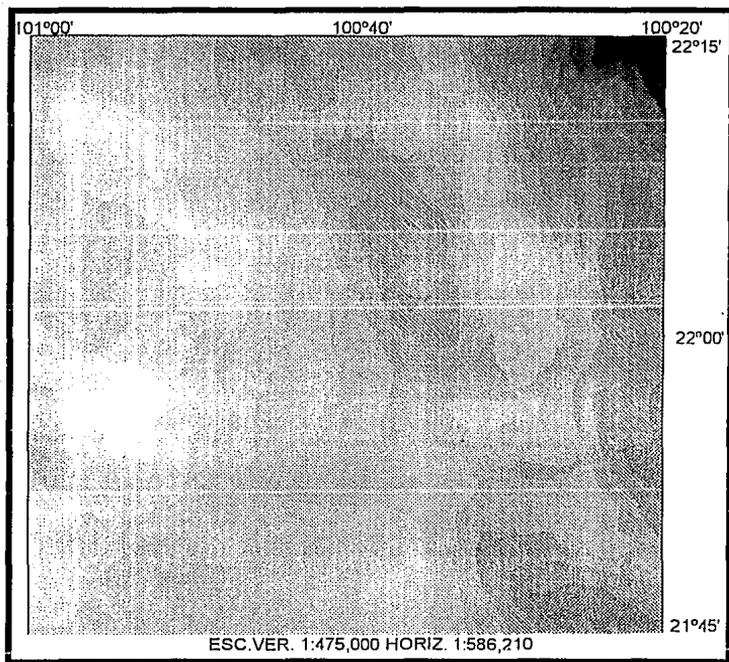
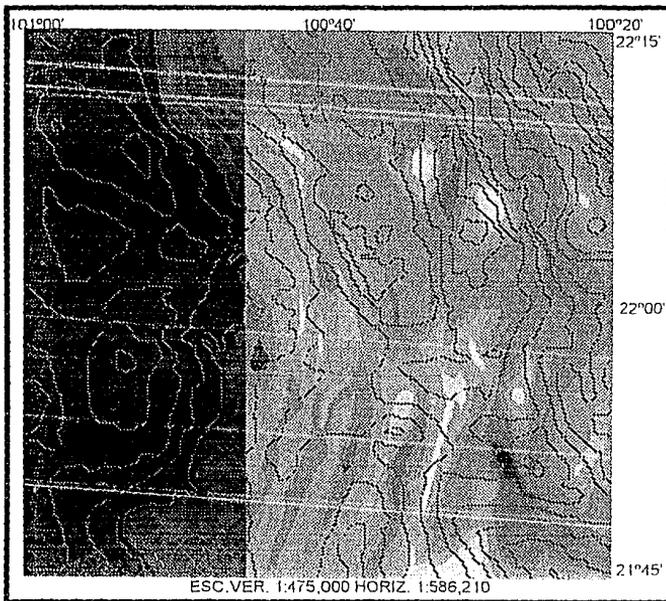
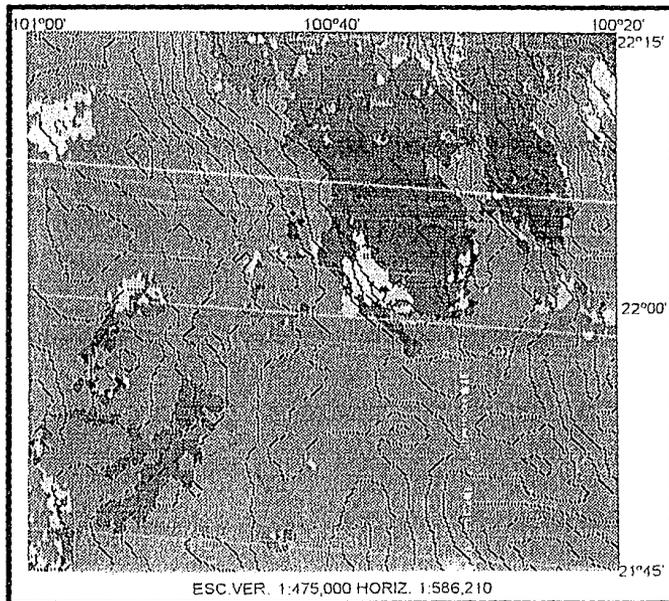


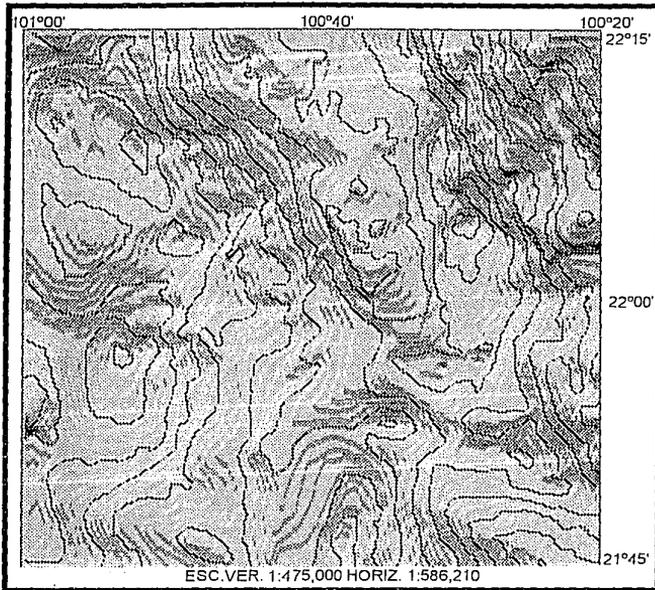
IMAGEN DE ANOMALIA DE BOUGUER



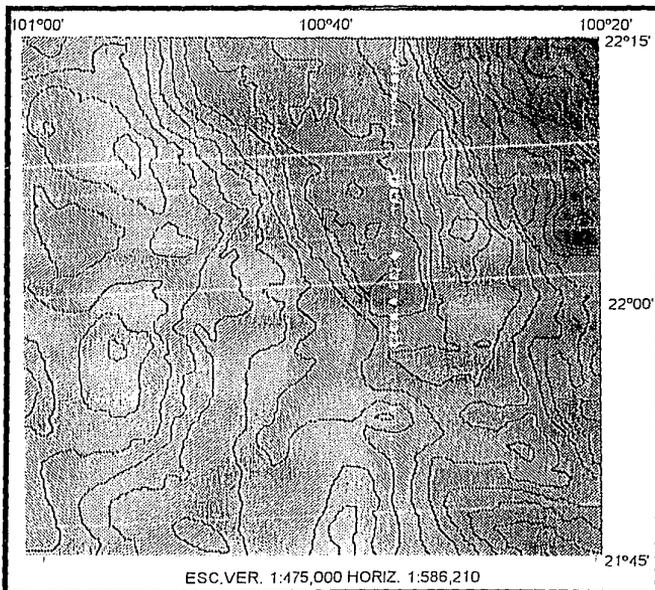
CONTORNOS DE A.B.-IMAGEN DE I.M.T.



CONTORNOS DE A.B.-IMAGEN GEOLOGICA



CONTORNOS DE A.B.-GRADIENTE VERTICAL DE A.B.



CONTORNOS DE A.B.-IMAGEN DE DE A.B.

IMAGEN DE INTENSIDAD MAGNETICA TOTAL (I.M.T.)

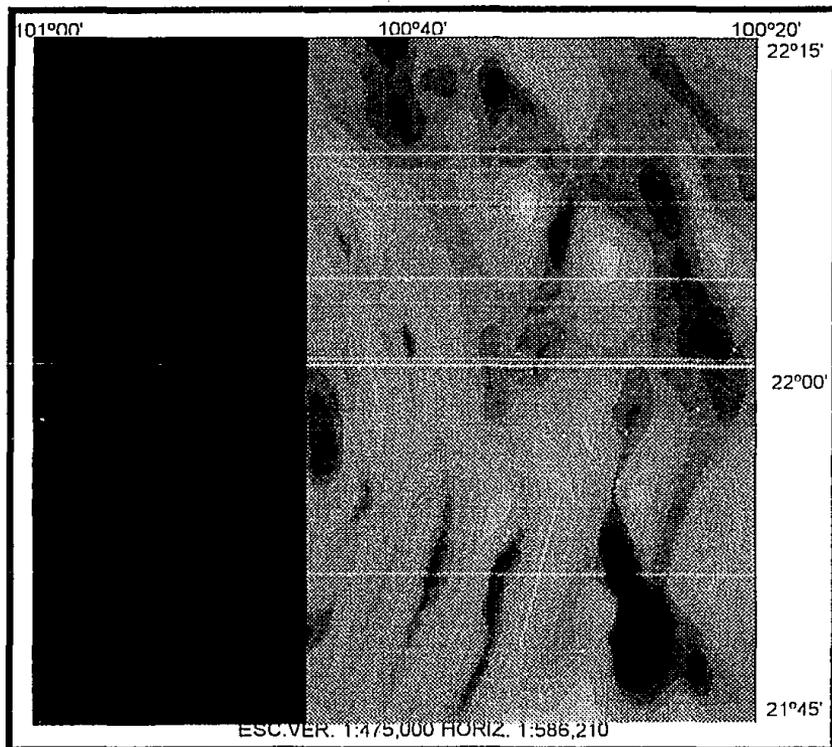
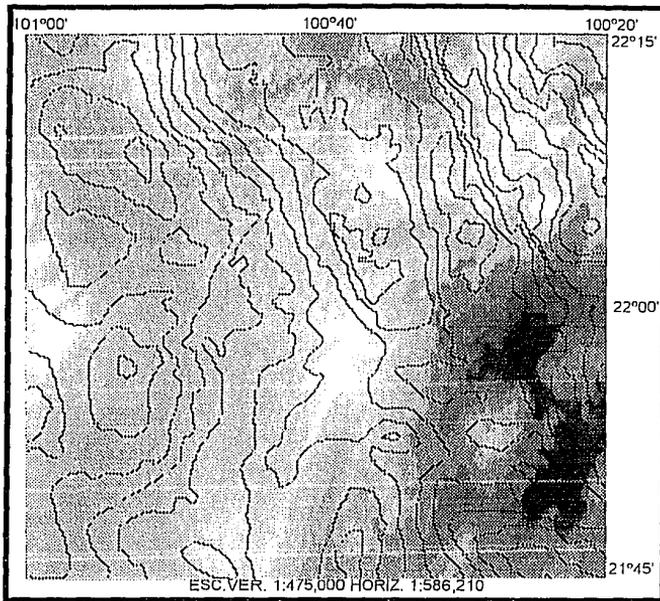
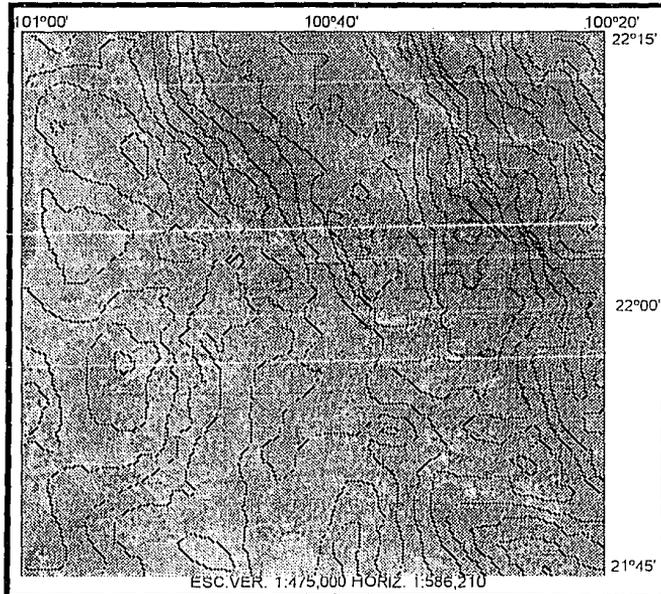


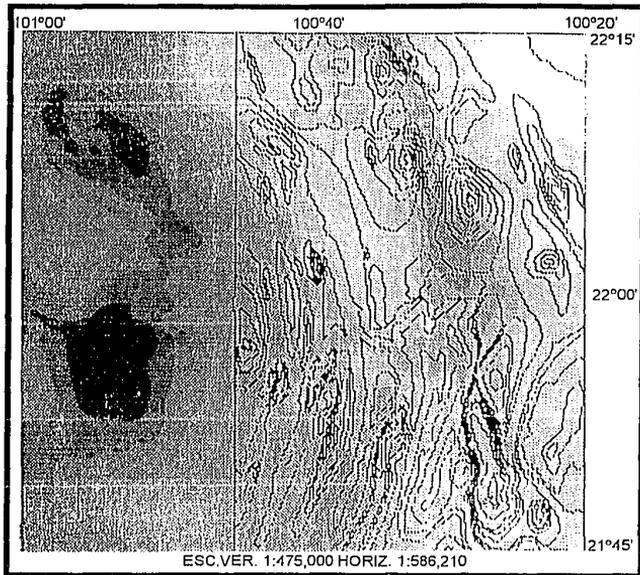
IMAGEN DE I.M.T.



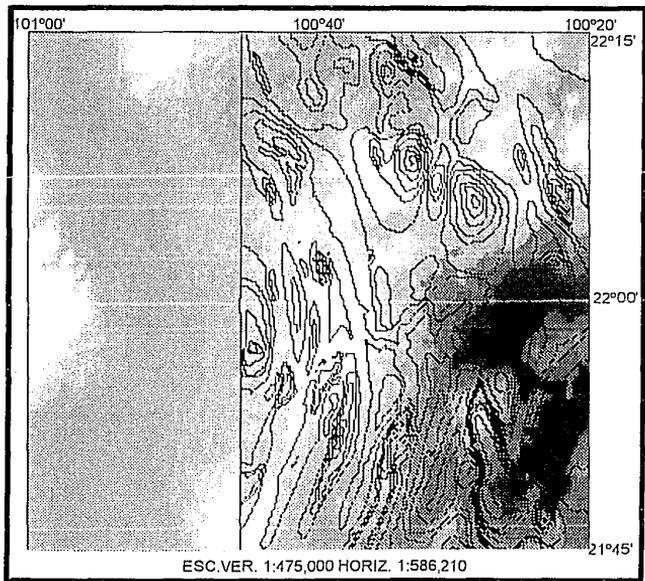
CONTORNOS DE A.B.-IMAGEN TOPOGRAFICA



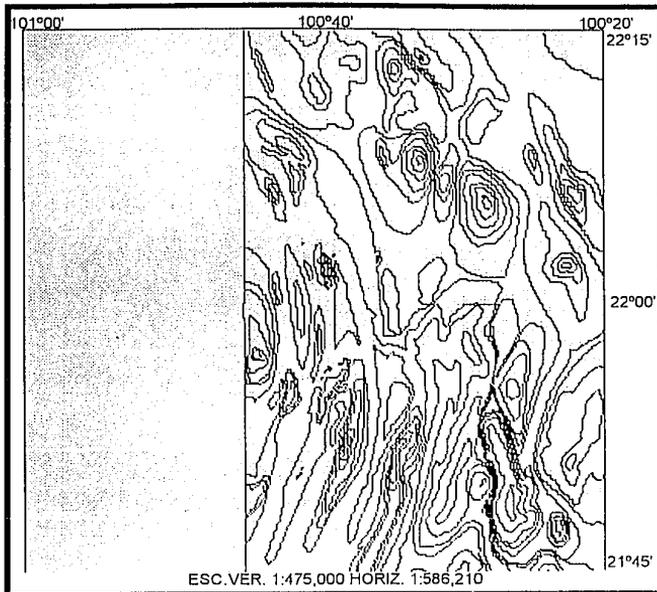
CONTORNOS DE A.B.- IMAGEN DE SATELITE



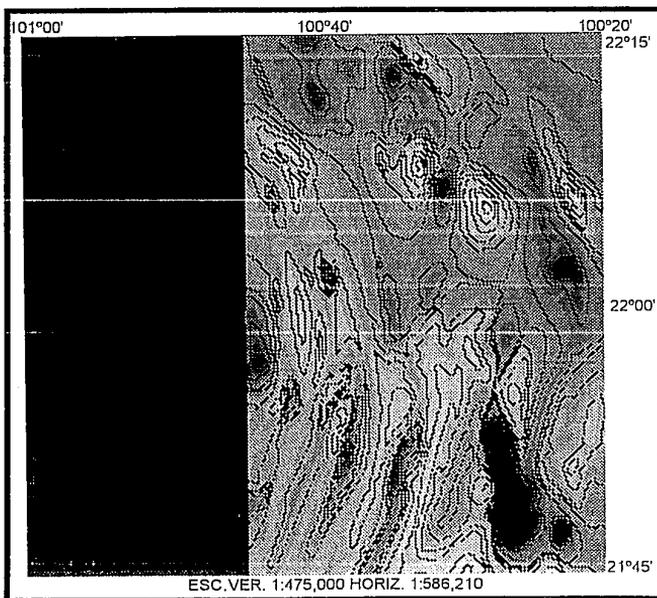
CONTORNOS DE I.M.T.-IMAGEN DE A.B.



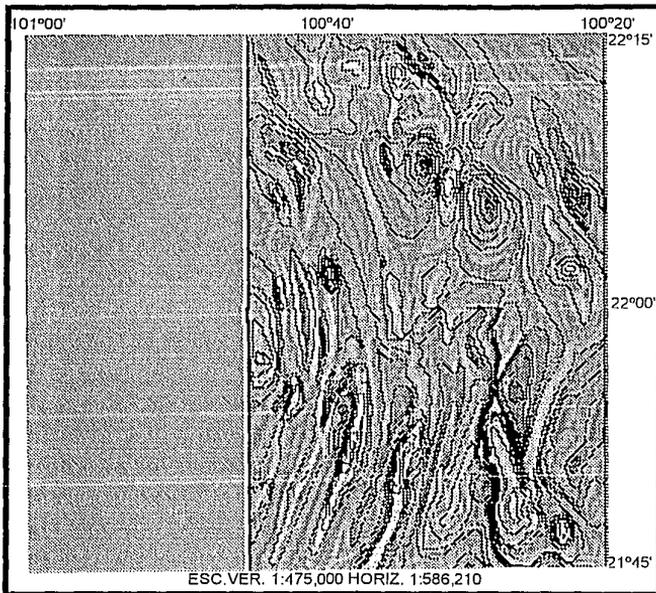
CONTORNOS DE I.M.T.-IMAGEN TOPOGRAFICA



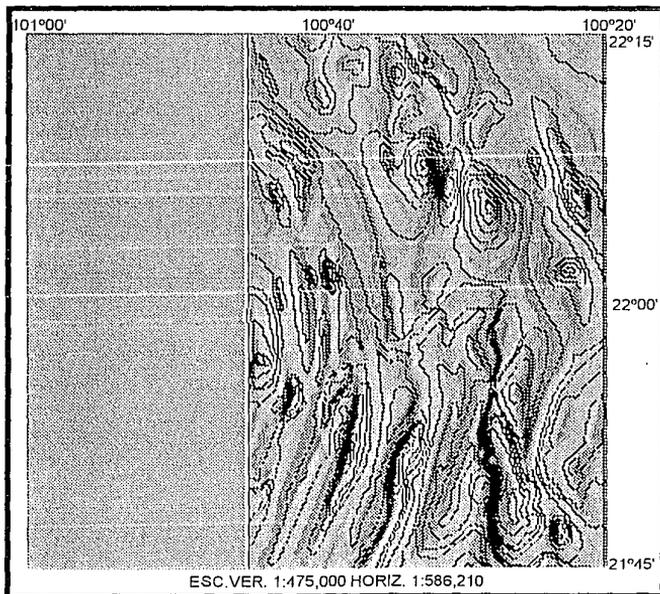
CONTORNOS DE I.M.T.



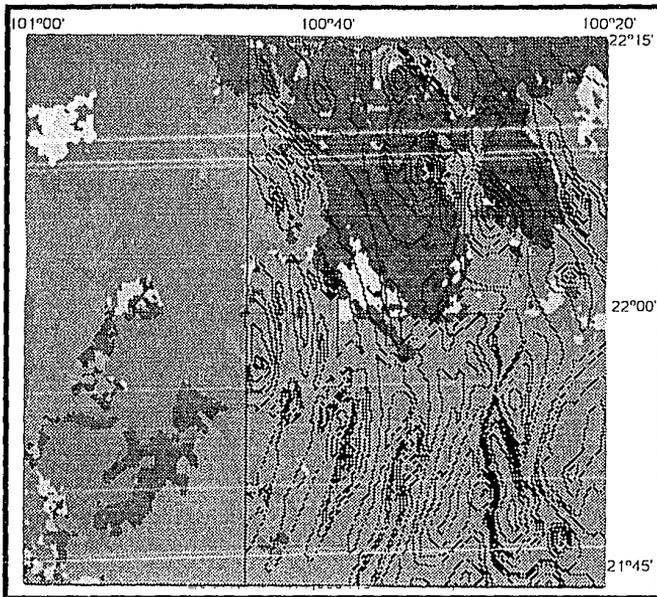
CONTORNOS DE I.M.T. IMAGEN DE I.M.T.



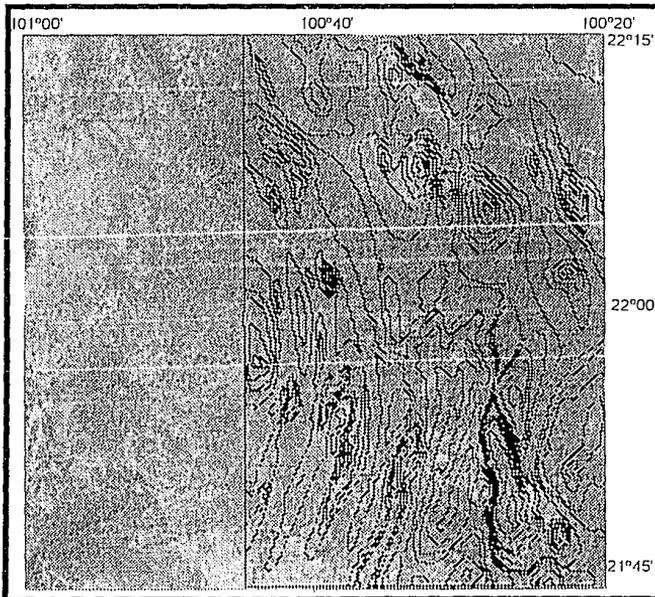
CONTORNOS DE I.M.T.-GRADIENTE HORIZONTAL DE I.M.T.



CONTORNOS DE I.M.T.-GRADIENTE VERTICAL DE I.M.



CONTORNOS DE I.M.T.-IMAGEN GEOLOGICA



CONTORNOS DE I.M.T.-IMAGEN DE SATELITE

IMAGEN GEOLOGICA

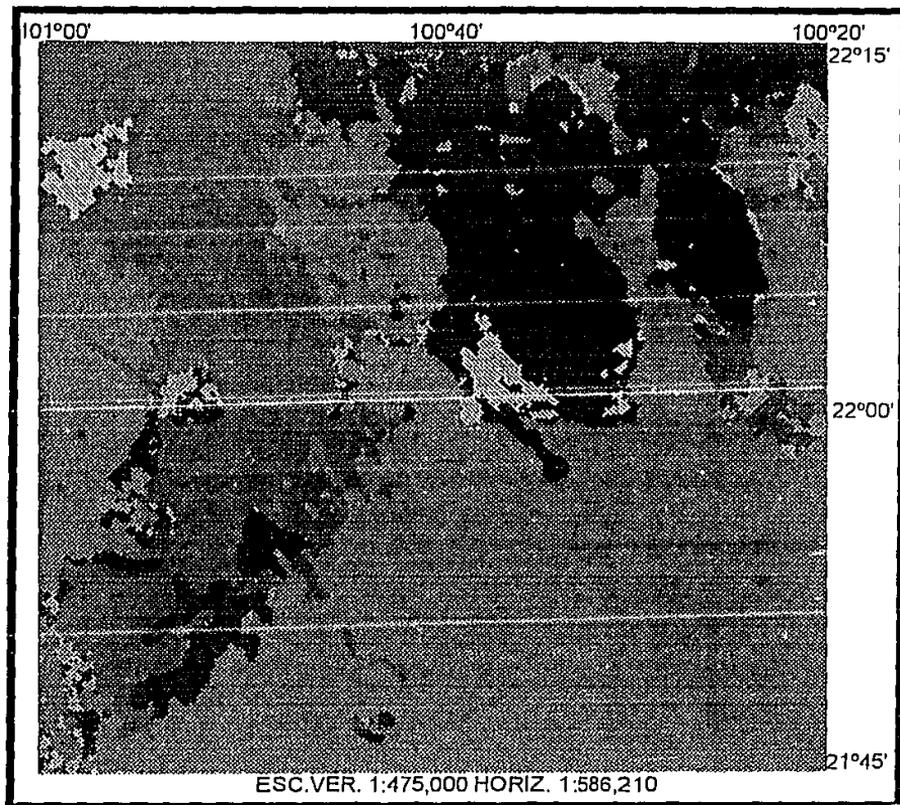
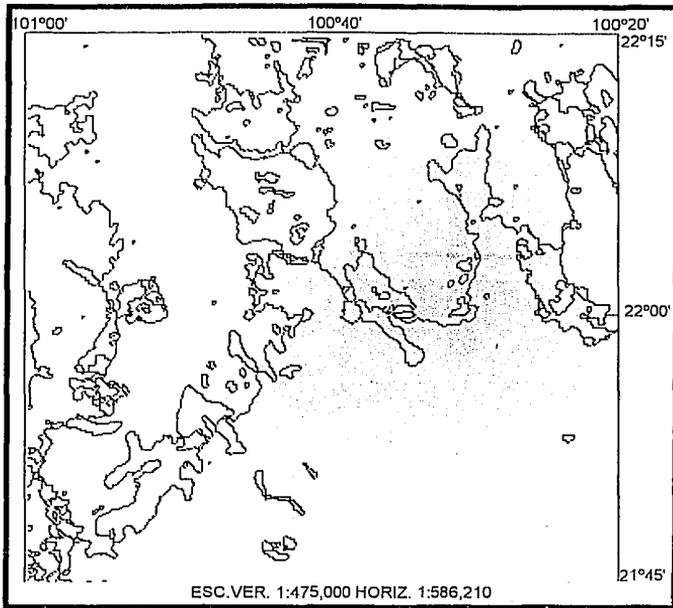
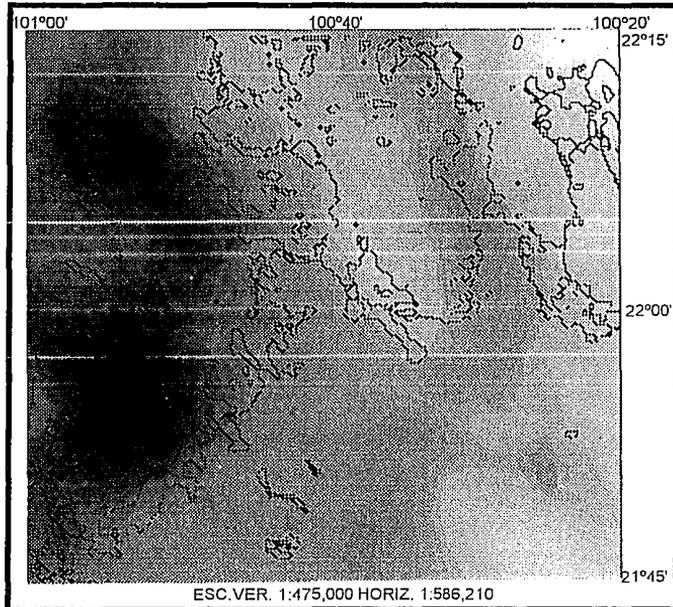


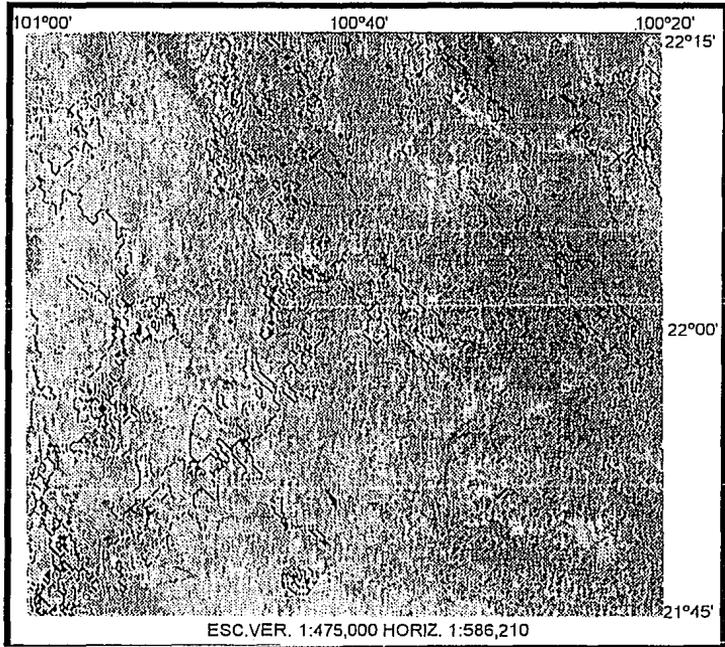
IMAGEN GEOLOGICA



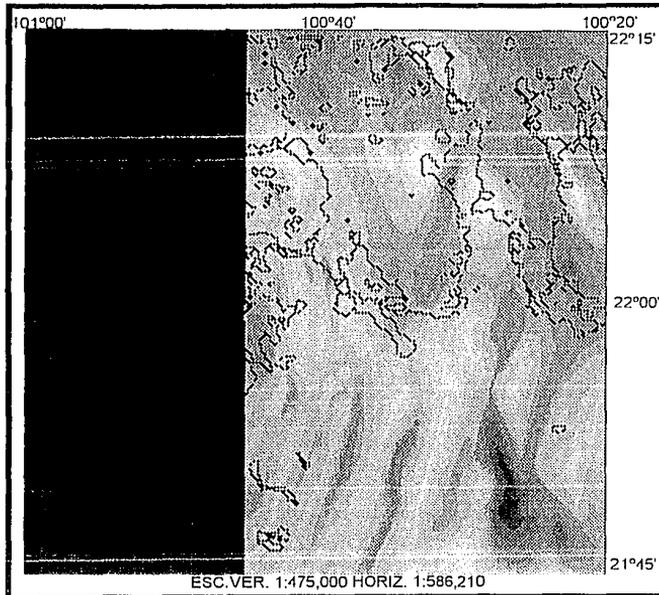
**CONTACTOS GEOLOGICOS**



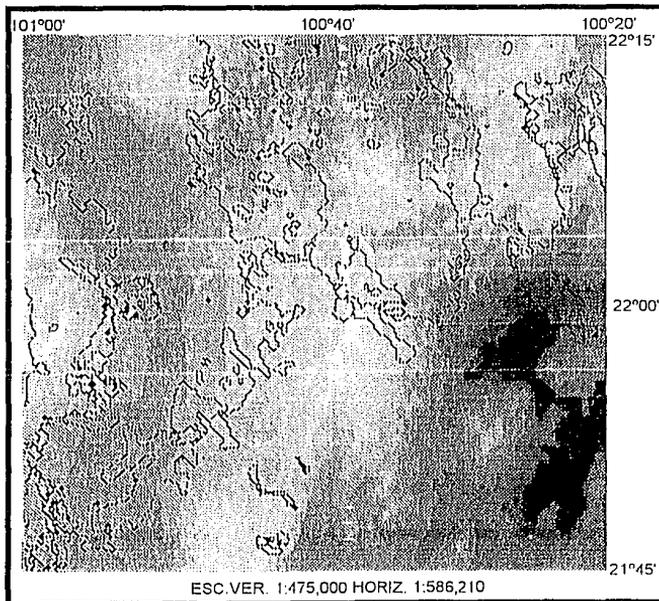
**CONTACTOS GEOLOGICOS-IMAGEN DE A.B.**



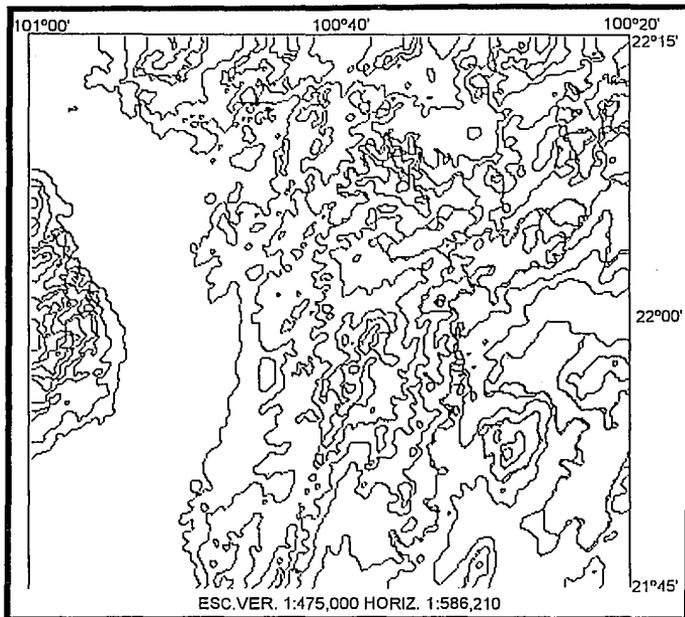
CONTACTOS GEOLOGICOS-IMAGEN DE SATELITE



CONTACTOS GEOLOGICOS-IMAGEN DE I.M.T.



CONTACTOS GEOLOGICOS-IMAGEN TOPOGRAFICA



**CONTORNOS TOPOGRAFICOS**

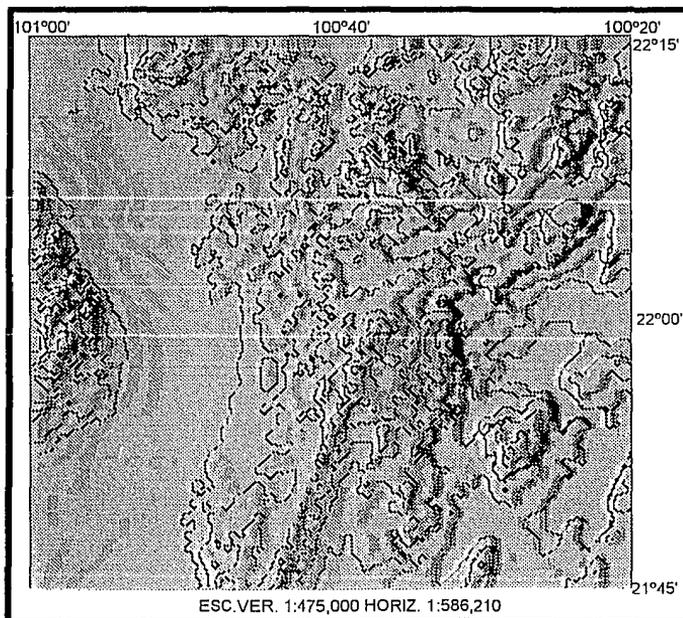


IMAGEN TOPOGRAFICA

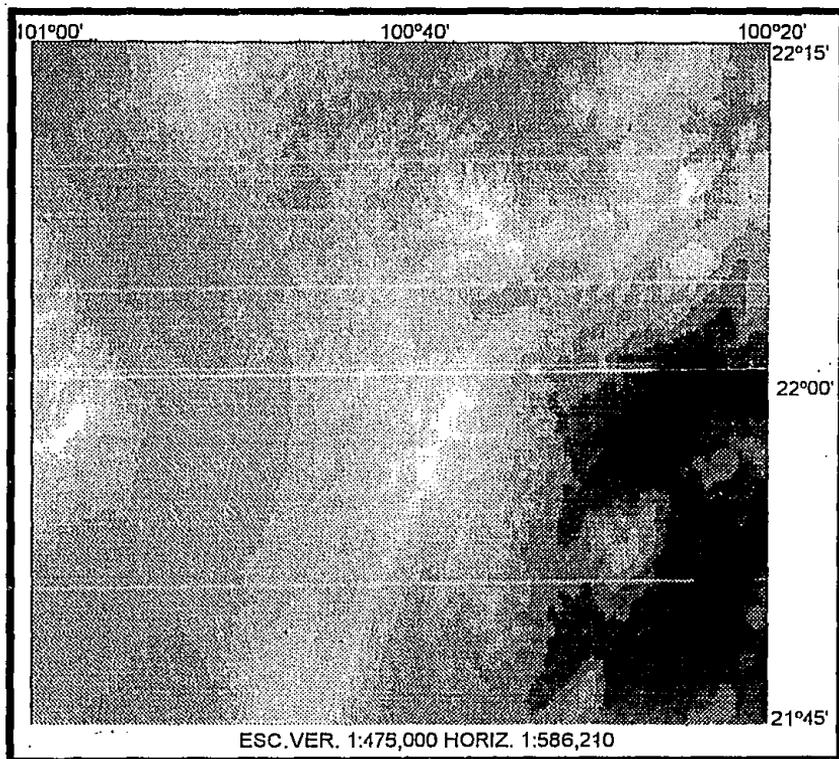
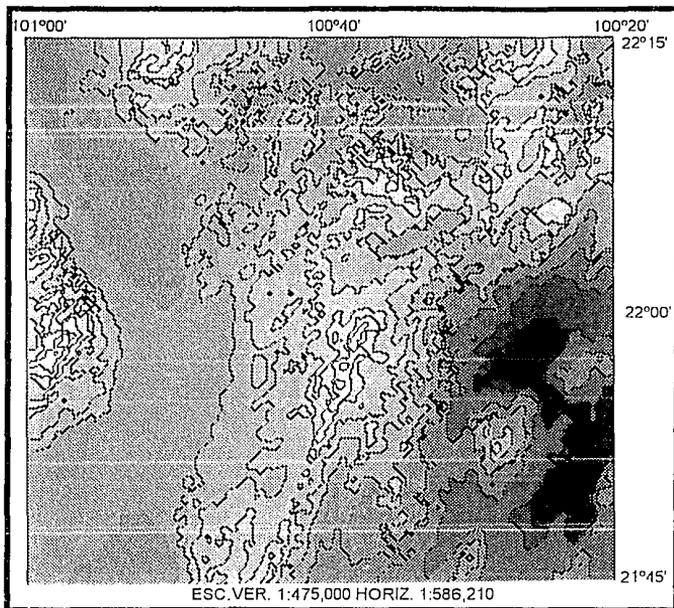
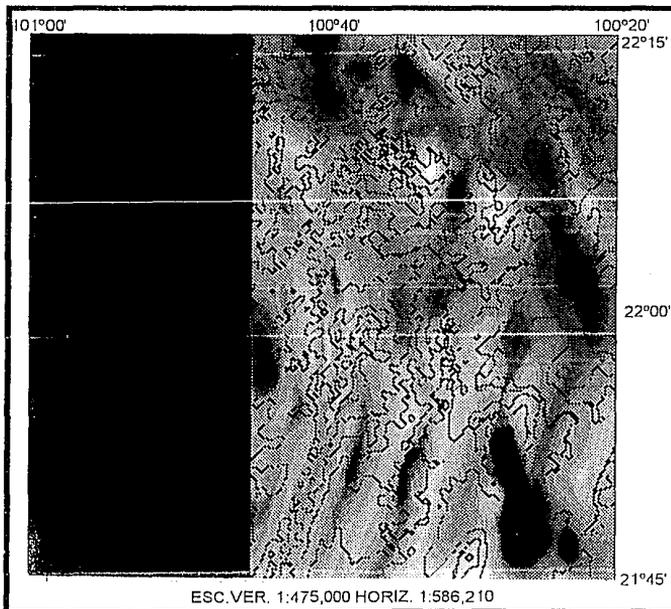


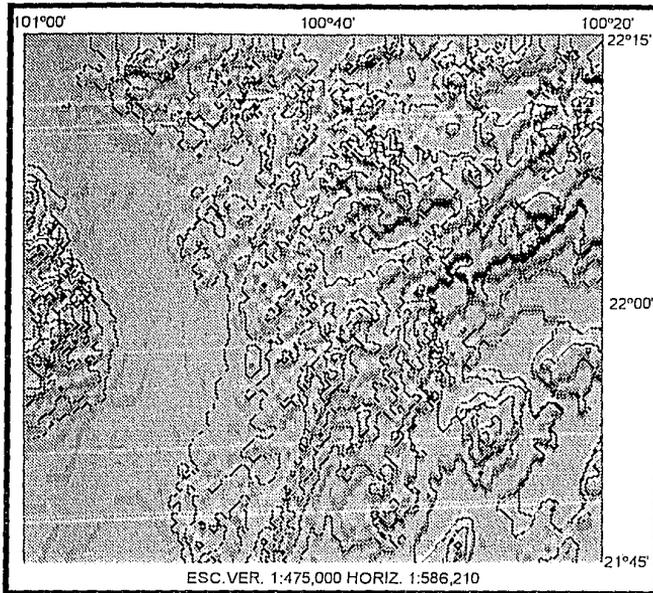
IMAGEN TOPOGRAFICA



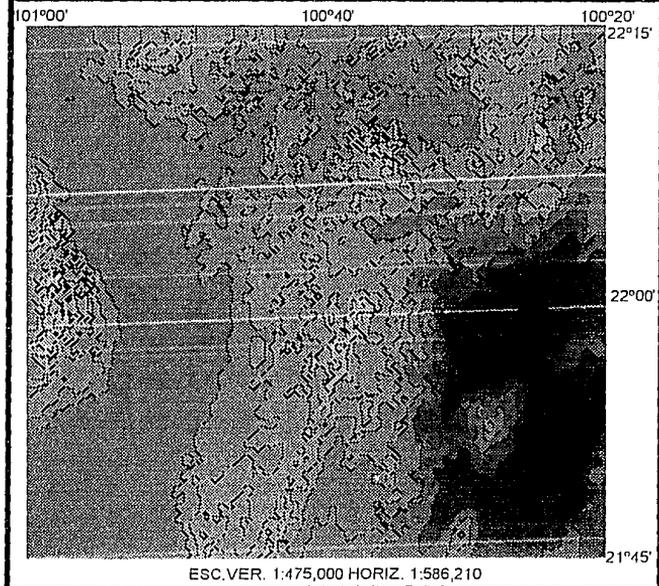
CONTORNOS TOPOGRAFICOS-IMAGEN DE A.B.



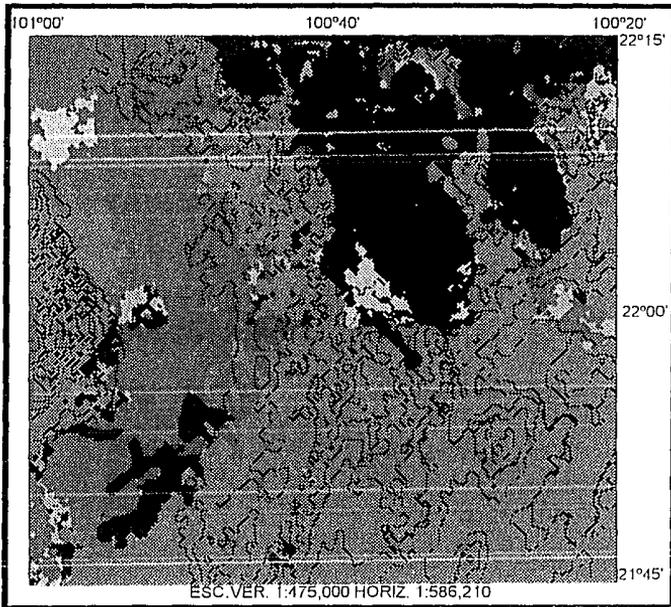
CONTORNOS TOPOG... OS-IMAGF...



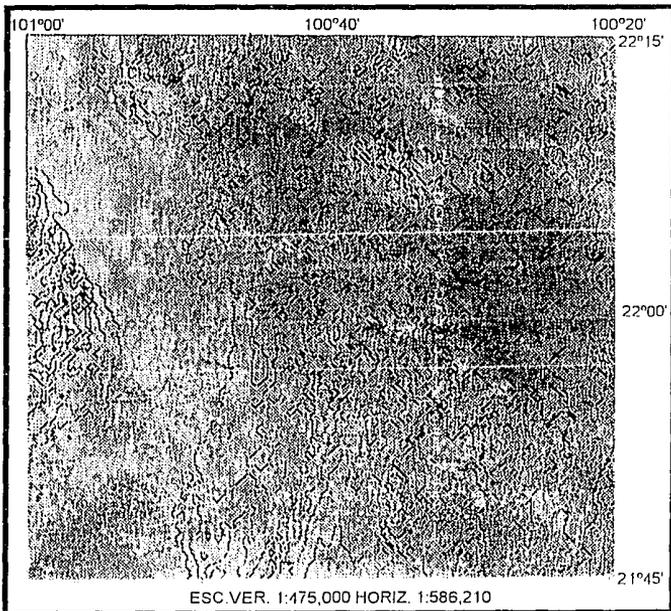
CONTORNOS TOPOGRAFICOS-IMAGEN DEL GRADIENTE VERTICAL TOPOG.



CONTORNOS TOPOGRAFICOS-IMAGEN TOPOGRAFICA



CONTORNOS TOPOGRAFICOS-IMAGEN GEOLOGICA



CONTORNOS TOPOGRAFICOS-IMAGEN DE SATELITE