

^^ 262
00 363
3
2e1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

PERCEPCION REMOTA APLICADA A GEOTERMIA:

REGION NORESTE DE MORELIA

T E S I S

Que para optar por el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (GEOFISICA)

P r e s e n t a :

LEON DEL RIO LUYANDO

México, D. F.

XC5/L46p 1980

301035

1980

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo consisten en: a) formular un método de trabajo empleando técnicas de Percepción Remota y Tectónica, para: b) proponer un esquema tectónico y seleccionar los lugares de mayor potencial geotérmico aparente, de una región con manifestaciones termales.

Con base en la teoría sobre el fracturamiento de sólidos frágiles de Coulomb-Navier, cartas climáticas, mapas geológicos y topográficos, imágenes orbitales y aéreas, técnicas de Percepción Remota y Tectónica se desarrolla un método. En éste se analiza la información en etapas sucesivas, principiando con material en gran escala y finalizando con material en pequeña escala. En cada etapa se propone la ocurrencia de distintos procesos tectónicos que posiblemente han dado lugar a la configuración actual de la región modificando las proposiciones de etapas anteriores.

Se presenta un ejemplo completo de la aplicación del método en una región situada al NE de Morelia y limitada por los paralelos $19^{\circ}35'$, $20^{\circ}05'$ y los meridianos $100^{\circ}16'$ y $101^{\circ}22'$. Los resultados indican que el fallamiento dominante ocurre en dirección N 70° E y el secundario en rumbo N 25° W. En la dirección del primero se observan alineamientos de edificios volcánicos, rasgos circulares: Los Azufres y Araró, y un graben: Graben de Cuitzeo. El fallamiento secundario se

manifiesta con mayor intensidad en la parte oriental de la región, rasgo circular de Los Azufres, dando lugar a un graben superpuesto: Graben Acámbaro-Hidalgo.

Las áreas de mayor potencial geotérmico aparente son: Los Azufres, las riberas Sur y Este del Lago de Cuitzeo y la región vecina a la falla Morelia-Queréndaro.

INDICE

Resumen	1
Indice	3
Prólogo	4
Introducción	7
Capítulo I, Método	13
Percepción Remota	14
Geotermia	19
Tectónica	21
Diagramas de Rosas	29
Interpretación de los Diagramas de Rosas:	
Principales tipos de Fracturamiento	30
Interpretación Regional con Diagramas de Rosas	38
Método de Trabajo	39
Comentarios	41
Capítulo II, Aplicaciones y Resultados en la Región Noreste de Morelia	47
Geología Regional	48
Rasgos Topográficos	52
Clima	53
Esfuerzos Regionales	61
Tectonismo	77
Resultados	85
Conclusiones y Comentarios	87
Bibliografía	93

PROLOGO

En la época actual la cantidad de energía que el hombre emplea en su vida diaria y sus industrias tiende a aumentar rápidamente. Hasta ahora el energético de uso común ha sido el petróleo, pero éste es una materia prima cada vez más escasa que se agotará algún día. Nuestro país, México, aunque cuenta con grandes reservas de petróleo susceptibles de ser empleadas como combustible para generar la energía que necesita, por su vital importancia se impone su uso racional y la búsqueda de alternativas que permitan reservarlo para la industria química moderna.

México está localizado en una región de la Tierra caracterizada por una gran actividad subterránea que ha producido y continúa produciendo levantamientos, hundimientos, plegamientos, desplazamientos horizontales y vulcanismo, entre otros resultados, empleándose en ello las grandes cantidades de energía que provee la naturaleza. Un resultado de esa liberación de energía es la generación de calor en cantidades proporcionales a la magnitud del fenómeno. Existen en el país más de 300 manifestaciones termales conocidas, CFE (1977), cuya extensión y temperatura varían en un amplio intervalo. Dado que el calor puede ser transformado en electricidad es factible el aprovechamiento económico del calor contenido en rocas y aguas que subyacen a algunas de esas manifestaciones.

Sin embargo, el primer problema consiste en seleccionar las áreas apropiadas en las cuales se emprenda la exploración detallada, pues ésta es cara y lenta, y a la fecha no existen procedimientos de uso general para seleccionar las localidades de mayor potencial geotérmico de una región dada.

El procedimiento de selección debe considerar las características propias de cada región con base en las cuales se formulen recomendaciones.

Con el fin de facilitar esta selección y sin pretender dar un procedimiento infalible, se ha realizado el presente trabajo. Empleando técnicas de percepción remota se deducen las características tectónicas que tiene una región dada, pudiendo de esa manera inferir las localidades de mayor interés geotérmico aparente, en una región donde se conoce la presencia de manifestaciones termales.

De esta manera, los objetivos de este trabajo son:

- 1) Formular un método de trabajo empleando técnicas de Percepción Remota y Tectónica para
- 2) Seleccionar, de acuerdo al inciso 1), los lugares de mayor interés geotérmico aparente en una región con manifestaciones termales conocidas.

El trabajo se compone de cuatro partes principales. La primera parte consiste de una Introducción. En ésta se describen, brevemente, las principales líneas de investigación

en las cuales se pueden englobar las distintas aplicaciones de la Percepción Remota para localizar y evaluar preliminarmente zonas con actividad geotermal, presente o pasada, y se ubica al método desarrollado en este texto en el contexto de esas líneas. El Capítulo I constituye la segunda parte y en él se desarrolla el método y se presentan las bases en que se sustenta. En la tercera parte, Capítulo II se presenta un ejemplo completo de la aplicación del método en una región situada al noreste de Morelia, Michoacán. Finalmente se formulan Conclusiones y Comentarios acerca del método, su aplicación, costo y perspectivas de mejoramiento.

INTRODUCCION

Por Percepción Remota (PR), o más propiamente Teledetección, en este trabajo se entenderá como el conjunto de técnicas por medio de las cuales se registran y/o cuantifican instrumentalmente algunas propiedades de cuerpos situados a distancia, cuando la interacción con los instrumentos es por medio de radiación electromagnética cuya longitud de onda excede de $0.3 \mu\text{m}$, es decir, más larga que el ultravioleta y no más allá que la longitud de onda del radar (e.g. SLAR, 10^{-1} m).

La Tectónica es la ciencia de la Tierra que estudia las estructuras que forman las rocas, su desarrollo cronológico y los procesos físicos que dan lugar a la arquitectura observada.

La Geotermia, también ciencia de la Tierra, estudia la distribución de la temperatura de la Tierra y los fenómenos internos que la gobiernan (Gogel, 1976).

La aplicación de la PR a la búsqueda y mapeo de fuentes geotérmicas se remonta a los últimos 20 años y desde entonces se han desarrollado varias líneas de trabajo. Al final de este trabajo se presenta, junto con la bibliografía consultada, una de PR de interés para la Geotermia; extraída de Fischer et al (1976), Hodler (1977) e IGF (1979) como fuentes principales. Del análisis de ésta se desprende que actualmente los esfuerzos se concentran en 4 líneas principales:

detección de anomalías termales, medición de inercia térmica, detección de anomalías en suelo y vegetación, e identificaciones litológicas y tectónicas.

Las anomalías termales se detectan por medio de barredores o sistemas de televisión en infrarrojo térmico. Debido a la baja resolución de los sistemas montados sobre satélites artificiales es más común ver el empleo, cuando la aplicación es a Geotermia, de sistemas a bordo de aeronaves. El resultado de la operación de estos sistemas son imágenes cuyo brillo o color es función de la temperatura del blanco observado. Por el alto costo de operación su aplicación se ha visto reducida a regiones donde es cierta la existencia de manifestaciones termales, su objetivo principal es el producir mapas en los cuales se muestra la posición de estas anomalías y a veces una estimación de su temperatura. En esta línea se encuentran trabajos sobre el comportamiento y/o distribución de anomalías termales en campos volcánicos aún activos: Cassinis et al (1970), Fischer et al (1964), Friedman et al (1973) y Moxham (1973). Los trabajos documentan la distribución, configuración e intensidad relativa de las anomalías termales y logran, en algunos casos, (e.g., Fischer et al (1964)), relacionarlas con erupciones como precursoras de las mismas. Los termogramas para mapear fallas y fronteras litológicas en regiones desérticas o semidesérticas están siendo empleados por El Shazly et al (1974), Vincent (1975), Vinogradov et al (1972),

y Wallace y Moxham (1967); esta técnica permite registrar fallas y fronteras litológicas que por otros medios serían más difíciles de mapear. En el estudio de zonas con manifestaciones geotérmicas se cuentan los trabajos de Friedman et al (1969), Gómez-Valle et al (1970), Hase et al (1975), Hochstein y Dickinson (1970), Hodder et al (1973), Lee (1978), Moxham (1969) y Palmason et al (1970); los termogramas han permitido, al igual que en el estudio de áreas volcánicas, documentar la posición, estructura, extensión e intensidad relativa de las manifestaciones en una región, dando como resultado inventarios más completos al incorporar a éstos las manifestaciones hasta esa fecha no reportadas.

El método de Inercia Térmica (Kahle, 1977; Pratt y Ellyet, 1979 y Watson, 1974) se vale de termogramas de un mismo blanco obtenidos a distinta hora del día en conjunción con datos de temperatura, viento, insolación, humedad, etc. medidos en el campo. A través de procesos matemáticos aplicados a las termografías y la información de campo se llega a una imagen sintética que despliega la inercia térmica aproximada del blanco. Puesto que la inercia térmica (IT) depende de la conductividad térmica (k) y de la capacidad calorífica por unidad de volumen (C); $IT = \sqrt{kC}$; es una variable que permite identificar distintas unidades litológicas y anomalías termales en éstas.

La vegetación, además de ser característica del suelo y

clima de la región, es sensible a los gases presentes en el aire, la temperatura del suelo y a las sustancias disueltas en el agua que la riega. Si el agua proviene de fuentes geotérmicas es común observar que es rica en solutos. En la superficie, la evaporación y el enfriamiento pueden dar lugar a la precipitación de solutos cuyo depósito algunas veces se diferencia del suelo de los alrededores; los solutos también pueden reaccionar químicamente con el suelo y lograr el mismo resultado. Estas diferencias de tipo de suelo y/o vegetación y el vigor y color de esta última pueden registrarse con barredores o sistemas de televisión o fotografías en infrarrojo cercano (en color falso o blanco y negro), color y algunas veces en fotografía pancromática en blanco y negro. Es en esta línea donde se han desarrollado y aplicado con buen éxito técnicas de procesamiento digital de imágenes. Empleando fotografía aérea infrarroja de color falso Babcock (1971) detecta fallas en una región desértica debido al efecto vigorizante sobre la vegetación que tiene la humedad ascendente a través de éstas. Hunt (1977), Hunt y Salisbury (1978), Salisbury y Hunt (1974), Vincent (1972), Vincent y Pillars (1974), Vincent y Thomson (1972) y Vincent et al (1972), entre otros, enfocan su esfuerzo al estudio de las características espectrales de minerales como medio para su identificación, mientras que Rowan (1972), Rowan et al (1974-1977),

analizan una extensa zona semiárida y mapean depósitos de materiales de origen hidrotermal con gran éxito.

La búsqueda tanto de fuentes geotérmicas como de minerales por medio del estudio de las estructuras geológicas de la región y su relación con la litología es actualmente el procedimiento más poderoso y menos sistematizado. En la realización del estudio se pueden emplear termogramas y relacionar la vegetación y/o suelo anómalos en el contexto de la tectónica y litología regional. Los medios de adquisición de la información pueden ser radar, barredores, sistemas de televisión y fotografía, ya sean en una o varias bandas espectrales, recolectando información en las bandas más convenientes. Los trabajos en esta línea se pueden dividir en 2 grupos: estudio geológico general de una región o búsqueda específica de alteraciones geotérmicas, manantiales o minerales. Dentro de los comprendidos en el primero se encuentran: Hodler (1977), Rowan y Wetlaufer (1973), Vincent (1972), que estudian la geología y tectónica únicamente con PR y O'Leary y Simpson (1977), Pratt et al (1978), entre otros, que las estudian pero acompañados de técnicas geofísicas como gravimetría, magnetometría y sismicidad. En el grupo de aplicaciones específicas destacan Missalatti et al (1978), y Offield et al (1977) que encuentran con gran éxito Uranio el primero y oro, estaño y cobre el segundo.

El presente trabajo se encuadra en esta última direc-

ción al considerar en forma sinérgica las fallas, fracturas, pliegues, edificios volcánicos, esfuerzos que han actuado y están actuando, litología, orografía, clima y alteraciones en suelo y vegetación conjuntando las técnicas de PR, Tectónica y Geotermia. Esta conjunción, aquí, implica cuantificar o registrar parte de la superficie terrestre por Percepción Remota. Examinando la información recabada y toda la información pertinente disponible de la región, se delimitan estructuras que son analizadas para formular una posible historia de la región y sus procesos físicos. Finalmente se extraen, con base en la Geotermia, las implicaciones que resulten sobre el régimen de temperatura y conducción de calor y se recomienda el estudio detallado de la parte que resulte con mayor posibilidad de explotación económica.

CAPITULO I

METODO

PERCEPCION REMOTA

En este estudio se dispone de información en la banda de radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida en el intervalo de .5 a 1.1 μ m, es decir, desde el verde hasta el infrarrojo cercano. En esta banda la radiación interactúa con las capas electrónicas de los iones (Adams, 1968; McCord et al 1970), de manera que no es posible identificar directamente a las moléculas (Adams y McCord, 1971; Salisbury, 1972), sino que se formulan hipótesis sobre las moléculas que pueden estar presentes con base en, (Burns 1970), los iones identificados. (e.g. Adams y McCord (1972), Antípova et al (1972), McCord y Johnson (1970)).

La penetración de la radiación en esta banda es baja, sólo algunos metros en agua y prácticamente unos micrómetros en la mayoría de las rocas. Esto implica que la información recibida por un detector procede de las capas superficiales de los materiales. En esta banda no es posible determinar la temperatura de los cuerpos si ésta es próxima o inferior a la ambiente; para determinarla se deben emplear otras bandas espectrales.

Para este trabajo, los instrumentos empleados en la adquisición de la información son aquellos que producen imágenes de la escena captada. Por escena entendemos una

colección de objetos, que pueden ser de tamaño, forma, color, brillo y composición diferentes, en un emplazamiento tal que pueden ser vistos desde el aire. Una imagen es el despliegue gráfico de la información registrada por un instrumento al captar una escena.

La imagen está formada por un número finito de elementos de imagen "pixels", los cuales pueden estar uniformemente distribuidos y tener las mismas dimensiones (imagen digital), o, alternativamente constituir una imagen analógica, como la de una imagen fotográfica. En ambos casos la brillantez del "pixel" es función del flujo de radiación procedente del área que representa. Y si es detectado, las longitudes de onda de dicha radiación están comprendidas en la banda a la que es sensible el detector. El color de la imagen se logra mediante la superposición de imágenes de la misma localidad registradas en distintas bandas del espectro y desplegadas a la misma escala, empleando un color primario para cada una. Si los colores con que se despliegan las imágenes son distintos a los que representan en la realidad, entonces se dice que la imagen es de color falso.

La interpretación fotográfica, o fotointerpretación, se realiza actualmente en su mayor parte "a mano". Esto es así debido a que buena parte de los procesos mentales que lleva a cabo el fotointérprete son de naturaleza compleja

y todavía no se han podido traducir en un algoritmo matemático. La fotointerpretación se define como (American Society of Photogrammetry, 1960): "El acto de examinar imágenes fotográficas con el propósito de identificar objetos y juzgar su significado". En Ciencias de la Tierra ésta se lleva a cabo considerando lo que se llaman elementos de interpretación (Guerra, 1959; Olson, 1973): tono, textura, color, forma, tamaño, sombra, tipo de configuración, relaciones con objetos o rasgos asociados, relieve, sitio, pendiente, discordancias, anomalías topográficas, cambios de pendiente, alineación, erosión, drenaje, anomalías geomorfológicas, suelo, vegetación y uso del suelo. La aplicación de la fotointerpretación de fotografías aéreas (Avery, 1968), o de imágenes orbitales (Del Río, 1974) puede requerir parte de estos elementos o de otros adicionales.

Las imágenes pueden ser analizadas por intérpretes humanos o autómatas. En el primer caso lo hace un sujeto entrenado que trabaja sobre una imagen a la vez, en busca de relaciones o datos predeterminados. En el segundo, el autómata ejecuta las instrucciones recibidas y trabaja no con la información desplegada (imagen) sino almacenada en su memoria, desplegando el resultado de su procesamiento. Cuando un intérprete humano trabaja con un autómata, se establece un proceso interactivo.

Una síntesis elemental del proceso interactivo es la

siguiente (Fu, 1974, 1976, 1977):

1. Los elementos de imagen se agrupan en conjuntos co
nexos formados por elementos con brillo y color si
milares. Por similares se entienden aquéllos que
caen en un intervalo que fija el intérprete. Estos
conjuntos son los elementos primitivos que se orga
nizarán para llevar a cabo la interpretación.
2. Los primitivos similares se agrupan en conjuntos,
uno para cada intervalo de brillos y colores.
3. Estos conjuntos pueden ser corregidos por el efec-
to de la pendiente y sombra y tomar en cuenta las
condiciones de elevación, azimut e intensidad de
la radiación incidente y las condiciones de obser-
vación, si es que conviene al objetivo de la inter
pretación.

Los objetivos pueden ser: reconocimiento de patro-
nes o clasificación de la imagen.

4. a) Reconocimiento de patrones: En este tipo de in
terpretación, la información que determina la
presencia de un patrón o forma es la distribu-
ción de brillos y colores, por esta causa la ima
gen no se corrige para eliminar el efecto de la
iluminación, etc., se toma un conjunto de primi
tivos y se compara con el aspecto que tendría
un patrón en esas condiciones por medio de trans

laciones, rotaciones, reflexiones y cambios de escala de ésta hasta que se satisface un criterio de aceptación; en caso negativo, se modifica la unión de conjuntos y se repite el procedimiento hasta agotar las posibilidades y determinar si hay o no los patrones buscados en la imagen.

- b) Clasificación. La imagen se corrige para eliminar el efecto de la pendiente y la elevación y azimut de la fuente de iluminación como del punto de observación y las sombras. Con los nuevos conjuntos de "pixels" de brillo, color y textura similares se emprende la clasificación deseada.

Por clasificación se entiende el proceso mediante el cual los conjuntos de "pixels" formados arriba se asignan a grupos o clases definidos por medio de reglas de decisión construídas en las fases iniciales del análisis.

En este trabajo se interpretan las imágenes en busca de patrones como: edificios volcánicos, fallas y fracturas, domos, pliegues y coladas de lava. Y también se clasifican para determinar las zonas correspondientes a cuerpos de agua, alteraciones de suelo y vegetación y actividad cultural.

GEOTERMIA

Un campo geotérmico es una trampa geológica donde ocurren corrientes de convección, de aguas subterráneas cuya temperatura es mayor que la temperatura media en la superficie. La exploración de esta clase de recurso natural se dirige a la búsqueda de áreas de temperatura anormalmente alta en formaciones permeables dentro de zonas calentadas.

Hasta ahora las indicaciones más importantes sobre la presencia de flúidos termales en el subsuelo son las manifestaciones termales en la superficie. Por tal razón la mayor parte de los pozos productores de vapor están localizados cerca de éstas. Por otro lado este hecho también se debe a que la exploración a menudo se ha circunscrito únicamente a los alrededores de las manifestaciones (Kappelmeyer y Haenel, 1974).

McNitt (1970) clasifica las zonas donde es más alta la ocurrencia de flujos térmicos, según su edad y características geológicas (ver tabla I).

Tomando estos hechos en consideración resulta que al menos la parte central de México, el llamado Eje Volcánico Mexicano, tiene un alto potencial geotérmico debido a sus numerosas manifestaciones termales situadas en regiones de vulcanismo cuaternario al pie de edificios volcánicos y/o en los límites de bloques fallados y fisuras corticales. (Del Río, 1979 a).

La gran extensión del territorio con esas condiciones exige, antes de emprender cualquier estudio, la selección de las manifestaciones termales en torno a las cuales se examinará la región. El examen se hará para encontrar las fallas y fracturas, el dominio que ejerce cada una, las estructuras que componen la región y la historia tectónica de ésta. El objetivo del examen será decidir si la región ofrece, o no, la posibilidad de tener una trampa geológica

-
- I. Campos Asociados con Centros Volcánicos Cuaternarios.
 - A) en estructuras producidas por procesos volcánicos, tales como calderas y fracturas periféricas a domos volcánicos.
 - B) en estructuras causadas por procesos tectónicos (no volcánicos), tales como bloques fallados y fisuras regionales.
 - II. Campos Asociados con Tectonismo Cenozoico.
 - A) estructuras de bloques fallados en el interior de continentes.
 - B) zonas de formación de Corteza Terrestre.
 - C) cuencos en el interior de continentes.
 - III. Campos en promontorios (cabos) y regiones de plataforma continental.
-

Tabla I. Clasificación geológica de los lugares donde ocurren flujos geotérmicos, en orden de importancia, según McNitt (1970).

de rocas permeables llenas de agua en contacto con cuerpos intrusivos aún calientes. Después de encontrar una zona de alto potencial geotérmico se recomendará su estudio por otros métodos, geofísicos, geoquímicos, etc., que contribuyan a un conocimiento detallado de la zona y a una evaluación cuantitativa de su potencial.

TECTONICA

Las fallas, fracturas y pliegues son los principales productos estructurales de esfuerzos que actuaron en la roca deformándola primero y fragmentándola cuando el esfuerzo iguala o rebasa su resistencia. Según la naturaleza del esfuerzo fué la fractura o falla producida, de manera que en primera aproximación, analizando éstas se pueden enumerar algunas propiedades de los esfuerzos que han contribuído a modelar el paisaje (Hafner, 1951; Hubbert, 1951; Odé, 1957; Sandford, 1959; Tapponnier y Molnar, 1979).

Una de las teorías para explicar las fracturas se debe a Coulomb que posteriormente fué modificada por Navier. (Anderson, 1951; Jaeger, 1969). Esta teoría establece que la fractura ocurre en un punto donde el esfuerzo tangencial es igual a un valor definido y propio del material, llamado resistencia al cizallamiento. A continuación se presenta una síntesis de dicha Teoría:

Considérese un medio isotrópico frágil. Se califica como frágil al material que alcanza su punto de ruptura cuando todavía está en el dominio elástico (Mattauer, 1976). Sean O_1 , O_2 , y O_3 direcciones mutuamente perpendiculares en las cuales el esfuerzo es puramente normal; es decir, la componente tangencial vale cero, y el esfuerzo normal tiene valores σ_1 , σ_2 y σ_3 , los cuales son llamados esfuerzos principales y se nombran de tal manera que $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. El sentido positivo se le asigna a la dirección de tensión.

Un esfuerzo p en el punto O a través de un plano cuya normal está en la dirección OP es:

$$\vec{P}_{op} = \lim_{\partial A \rightarrow 0} \frac{\vec{\partial F}}{\partial A} \quad (1)$$

donde F es la fuerza y A el área, y puede ser descompuesto en una parte normal a un plano y dos partes tangenciales a él.

Considérese un sistema de referencia de coordenadas cartesianas, sea un plano caracterizado por una normal tal que l , m y n son los cosenos de los ángulos que hace ésta respecto a los ejes principales O_1 , O_2 y O_3 ; estos números se llaman cosenos directores y cumplen con que $l^2 + m^2 + n^2 = 1$.

Las componentes en la dirección de los ejes principales del esfuerzo a través del plano son, figura 1:

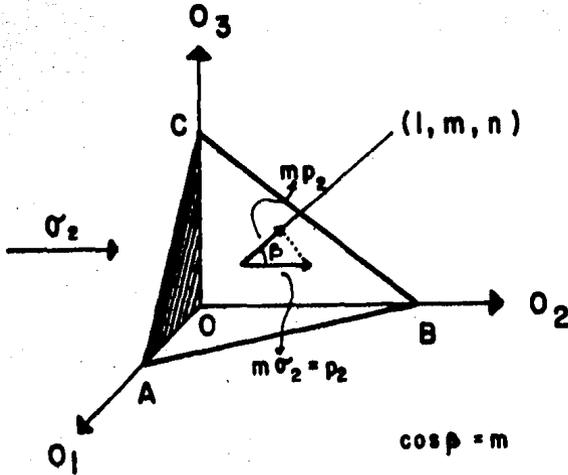


Figura 1. El tetraedro OABC se encuentra en equilibrio y el área de la cara ABC, $\Lambda(ABC)$, mide 1. Considerando únicamente la dirección O_2 se tiene: La componente de $\Lambda(ABC)$ en la dirección O_2 es $\Lambda(AOC)$, y $\Lambda(AOC) = m\Lambda(ABC) = m$. La componente del esfuerzo σ_2 a través del plano ABC, p_2 , es: $p_2 = m\sigma_2$. La componente del esfuerzo p_2 en dirección normal al plano ABC es: $mp_2 = m^2\sigma_2$.

$$p_1 = \ell\sigma_1; \quad p_2 = m\sigma_2; \quad p_3 = n\sigma_3 \quad (2)$$

el esfuerzo normal al plano, es decir, en la dirección ℓ , m , n de la normal es:

$$\sigma = \ell p_1 + m p_2 + n p_3 = \ell^2 \sigma_1 + m^2 \sigma_2 + n^2 \sigma_3 \quad (3)$$

La magnitud del esfuerzo a través del plano será:

$$R = (p_1^2 + p_2^2 + p_3^2)^{\frac{1}{2}} = (\ell^2 \sigma_1^2 + m^2 \sigma_2^2 + n^2 \sigma_3^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

El esfuerzo tangencial al plano, τ , se puede extraer de esta relación como:

$$\tau^2 = R^2 - \sigma^2 \quad (5)$$

En la dirección donde este esfuerzo tangencial sea máximo se producirá primero la ruptura del material cuando el esfuerzo al que es sometido iguala su resistencia al cizallamiento. Esta dirección ocurre para los valores de ℓ , m y n tales que:

$$\frac{\partial \tau}{\partial \ell} = \frac{\partial \tau}{\partial m} = \frac{\partial \tau}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

o sea:

$$2\tau \frac{\partial \tau}{\partial \ell} = 0 = 2\ell\sigma_1^2 - 2[\ell^2\sigma_1 + m^2\sigma_2 + n^2\sigma_3] 2\ell\sigma_1$$
$$0 = 2\ell\sigma_1 [\sigma_1 - (\ell^2\sigma_1 + m^2\sigma_2 + n^2\sigma_3)]$$

Esta relación es válida para:

$$\ell = 0 \quad (7)$$

Considerando la propiedad de los cosenos directores y la ecuación (7), se tiene que:

$$n^2 = 1 - m^2 \quad (8)$$

de donde:

$$2\tau \frac{\partial \tau}{\partial m} = 2m\sigma_2^2 - 2m\sigma_3^2 - 2(m^2\sigma_2 + (1-m^2)\sigma_3)(2m\sigma_2 - 2m\sigma_3)$$
$$= 2m(\sigma_2 - \sigma_3) \{(\sigma_2 + \sigma_3) - 2(m^2(\sigma_2 - \sigma_3) + \sigma_3)\}$$
$$(9)$$

para que se cumpla la condición de la ecuación (6) es necesario que $m = 0$ (solución trivial) o bien que el término dentro del segundo paréntesis valga cero; considerando esta alterna

tiva se tiene:

$$(\sigma_2 + \sigma_3) - 2(m^2(\sigma_2 - \sigma_3) + \sigma_3) = 0$$

de donde:

$$m^2 = \frac{1}{2} \quad (9)$$

y de (8):

$$n^2 = \frac{1}{2} \quad (10)$$

y de (5):

$$\tau_1 = \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_3) \quad (11)$$

por la simetría del problema se puede generalizar y tener que, en las otras 2 direcciones que se pueden tomar:

$$\tau_2 = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)$$

$$\tau_3 = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)$$

debido a la relación de orden entre los esfuerzos, el esfuerzo tangencial mayor, τ_2 , ocurre en el plano cuyos cosenos directores son $l = 2^{-\frac{1}{2}}$, $m = 0$, $n = 2^{-\frac{1}{2}}$, es decir, bisecta la dirección del esfuerzo mayor y menor, estando en la dirección del esfuerzo intermedio.

Si la resistencia al cizallamiento aumenta μ veces la presión normal a través del plano, donde μ es llamado coeficiente de fricción interna, entonces la fractura ocurrirá en el plano donde la magnitud del esfuerzo tangencial sea máxima y alcance el valor de la resistencia al cizallamiento (s) del material:

$$\tau = s + \mu\sigma$$

Este plano estará generado por los esfuerzos principal y menor, pues en un caso especial $\mu = 0$ y coincide con lo tratado arriba. Considerando el problema en 2 dimensiones únicamente se tiene:

$$l^2 + m^2 = 1 = \cos^2\theta + \cos^2\phi \quad \text{de donde} \quad \cos^2\phi = \sin^2\theta$$

$$\sigma = l^2\sigma_1 + m^2\sigma_2 = \cos^2\theta \sigma_1 + \sin^2\theta \sigma_2$$

$$\tau = 2lm (\sigma_2 - \sigma_1) = \sin\theta \cos\theta (\sigma_2 - \sigma_1) = \frac{1}{2} \sin 2\theta (\sigma_2 - \sigma_1)$$

El esfuerzo tangencial, considerando la convención de signos

para los esfuerzos, será:

$$\tau - \mu\sigma = \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_1) \sin 2\theta - \mu\sigma_1 \cos^2\theta - \mu\sigma_2 \sin^2\theta$$

este esfuerzo alcanza su máximo cuando

$$\frac{\partial(\tau - \mu\sigma)}{\partial\theta} = 0 = \cos 2\theta (\sigma_2 - \sigma_1) + \mu \sin 2\theta (\sigma_1 - \sigma_2)$$

el máximo de este esfuerzo ocurrirá entonces en la dirección donde

$$\tan 2\theta = \frac{1}{\mu} \quad (12a)$$

$$\text{o bien } \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{1}{\mu} \quad (12b)$$

si $\mu = 0$ entonces $\theta = 45^\circ$, y si $\mu \rightarrow \infty$ entonces $\theta \rightarrow 0$, es decir, conforme aumenta el coeficiente de fricción interna del material la normal al plano se aproxima a la dirección del esfuerzo principal, por lo que el plano se aproxima a la dirección del esfuerzo menor que, según la convención de signos empleada, es el más compresivo.

DIAGRAMAS DE ROSAS

Los diagramas de rosas son gráficas en coordenadas polares en las cuales se representa la longitud total medida de rasgos específicos respecto a su dirección. Estos diagramas, en el caso de fallas o fracturas se llaman también histogramas de fracturamiento y se elaboran como se explica a continuación:

En una hoja de papel traslúcido se traza un transportador de 180° en el cual sólo se tienen marcas cada 10° , totalizando 18 intervalos de 10° . Este transportador está alineado con el mapa de manera que hay coincidencia entre la dirección de N de éste y una marca de aquél. Cada rasgo, dentro de una región prefijada, se examina para determinar dentro de qué intervalo de 10° queda comprendido su azimut; a continuación, se hace coincidir un extremo de éste con la marca de longitud acumulada del intervalo correspondiente y en el otro extremo se hace una nueva marca de longitud acumulada, o sea, se hace una suma geométrica de longitudes.

En el caso de que la dirección de algún rasgo coincida con la de una marca de 10° entonces se acredita la mitad de su longitud a cada lado de la marca. Si el rasgo presenta una curvatura pronunciada se parte en 2 ó 3 tramos y se toman sus puntos extremos para la medición. Después de me-

dir todos los rasgos de interés se mide con una regla la longitud total acumulada en cada intervalo y se hace un equivalente en metros. Con los pares, dirección y longitud, ordenados, se construye una gráfica en coordenadas polares; este resultado es el diagrama de rosas deseado.

La gráfica puede constar hasta de 3 partes: nula, de fondo y de ramas. La parte nula consta de los intervalos en los cuales la longitud medida fué cero. La parte de fondo la forman los intervalos en los cuales la longitud medida fué menor o cercana al promedio de longitud por intervalo y no presenta estructura. La parte de ramas consta de aquellos intervalos en los cuales la longitud medida es cuando menos 1.5 veces la longitud de fondo.

Interpretación de los diagramas de rosas:
principales tipos de fracturamiento.

Debido a la presencia de planos de estratificación y/o de fluencia, burbujas, fallas y fracturas macroscópicas y microscópicas y distinta naturaleza de las rocas, la corteza terrestre no es isotrópica. Sin embargo, si se consideran grandes extensiones, estas inhomogeneidades o accidentes locales pueden encontrarse distribuidos uniformemente y en cualquier dirección; cumplida esta premisa, se puede considerar que la corteza terrestre es isotrópica y que

si bien sus propiedades no son, sí se aproximan a las propiedades promedio de las rocas que la componen.

En la naturaleza, las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo el fracturamiento (tiempo de duración, presión y temperatura) son muy distintas a las existentes en un ensayo de laboratorio, pero ambas son consistentes e indican que la corteza terrestre está compuesta de material llamado frágil, ésto es, que se deforma poco antes de fracturarse, y que sólo en algunos casos tiene un comportamiento dúctil. (Mattauer, 1976).

Si se acepta que la corteza se puede considerar isotrópica cuando se consideran grandes extensiones (p.e. mayores de 75 Km²), entonces se podrá aplicar la teoría de Coulomb-Navier (Closs, 1955; Tchalenko y Ambraseys, 1970) para el estudio de los fracturamientos que se observen. Cerca de la superficie terrestre siempre se tendrá que uno de los esfuerzos principales es casi vertical, y este esfuerzo podrá ser el mayor, el intermedio o el menor, produciéndose distintas fracturas, según el caso. A continuación se presentan los tipos principales para cada caso:

1. El esfuerzo vertical es el mayor. Según la convención de signos que se emplea, ésto quiere decir que es el menos compresivo o incluso de tensión. La falla se producirá en un plano en la dirección del esfuerzo intermedio,

que necesariamente es horizontal, entre el mayor y el menor. Según sea el coeficiente de fricción interna de la roca, el plano de falla se desplazará hacia el es fuerzo menor. Si este esfuerzo es compresivo, en la su perficie se observará una falla inversa, o de empuje, cuyo rumbo coincide con la dirección del esfuerzo intermedio. En la Figura 2 se tiene, de izquierda a derecha, el arreglo de esfuerzos, la falla producida y el diagrama de rosas que tendría.

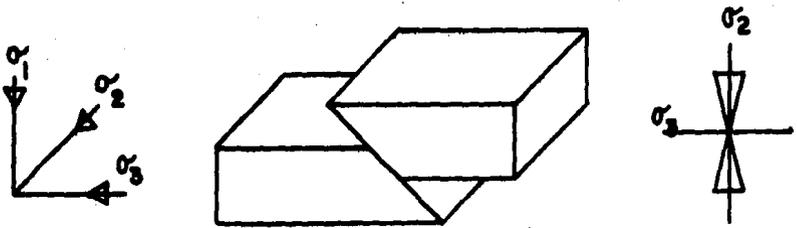


Figura 2.

Si el esfuerzo vertical es de tensión y los 2 horizontales son compresivos entonces podrá ocurrir una falla cuyo plano es horizontal, pudiéndose formar un "sill" si la falla es intruída por magma, Figura 3.



Figura 3.

2. El esfuerzo vertical es el intermedio. Se tienen dos casos.

- a) Si el esfuerzo mayor es de compresión, entonces todos serán compresivos y se generará un sistema de fallas cuyos planos son verticales y forman un ángulo menor o igual a 45° respecto a la dirección del esfuerzo menor, más compresivo, Figura 4.

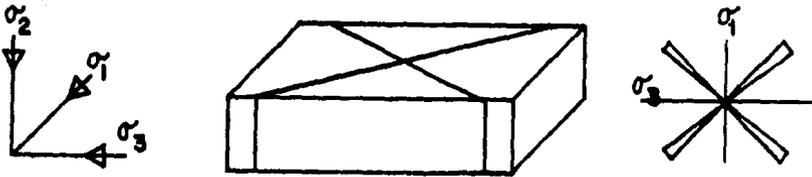


Figura 4.

- b) Si el esfuerzo mayor fuera nulo o de tensión, el esfuerzo menor será compresivo, debido a que el esfuer

zo intermedio, vertical, es de compresión. Las fallas están alineadas con el esfuerzo menor y sus planos son verticales. En este tipo de fracturamiento puede presentarse un desplazamiento en la dirección de σ_3 de uno de los bloques formados. En este caso, la falla recibe el nombre de falla de rumbo, Figura 5.

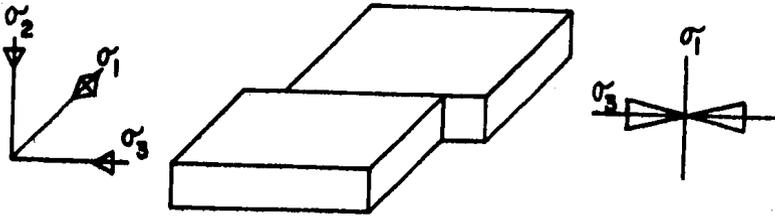


Figura 5.

Algunas veces se producen fallas de rumbo paralelas, pero no colineales, conectadas por fallas perpendiculares. Estas fallas son características de zonas donde tienen lugar un crecimiento de la corteza, Figura 6.

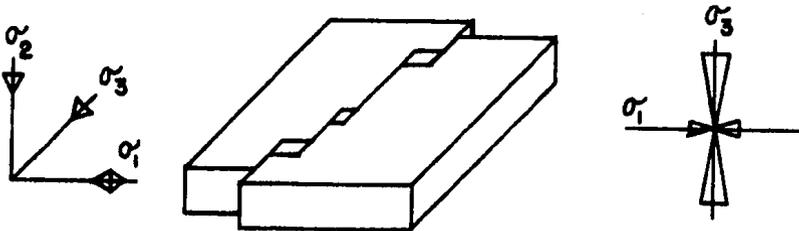


Figura 6.

3. El esfuerzo vertical es el menor. Cuando este esfuerzo es el más compresivo, se tienen también varios casos.
- a) El basamento cede a la compresión de la superficie y cae un bloque. Este tipo de falla se llama normal; el plano de ésta está en la dirección del máximo esfuerzo compresivo horizontal y hace un ángulo menor que 45° respecto a la vertical, Figura 7.

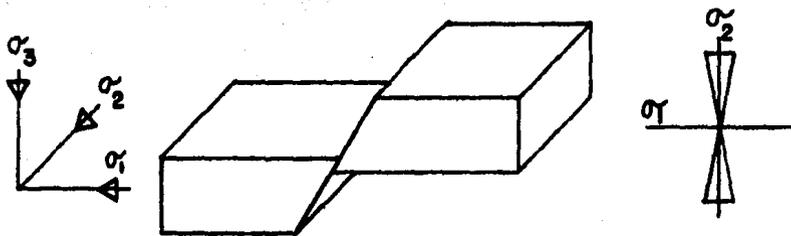


Figura 7.

- b) Si el esfuerzo σ_3 se debe a una intrusión, se tendrá el mismo histograma, pero se observará que un bloque subió.
- c) Si σ_3 es compresivo, $\sigma_1 = \sigma_2$ y son casi nulos o de tensión; entonces el problema adquiere simetría cilíndrica. Las fallas, si el origen de la compresión está arriba, serán conos cuyo vértice apunta hacia abajo y en la superficie se observarán circunferencias concéntricas. Estas fallas circulares son típi

cas de las estructuras de colapso e intrusiones de domos, Figura 8.

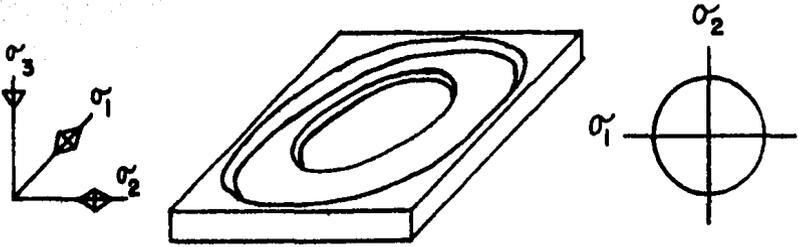


Figura 8.

d) Si σ_3 es compresivo, σ_2 es de compresión, σ_1 es casi nulo o de tensión y el origen de la compresión por σ_3 está abajo se formarán fallas cuyo plano es casi vertical y pueden evolucionar en diques en caso de ser intruídos por un magma. La dirección de las fallas será la del mayor esfuerzo de compresión: σ_2 , Figura 9.

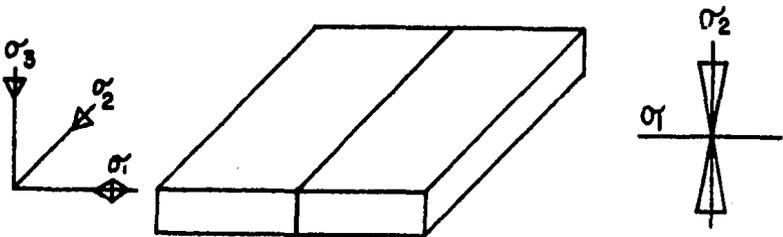


Figura 9.

e) Si $\sigma_1 = \sigma_2$, son compresivos y el origen de σ_3 está abajo, entonces se tiene un caso similar al de una chimenea volcánica, en la cual la presión radial que ejerce el magma fuerza a la roca a dilatarse en dirección perpendicular al radio, para aumentar así el diámetro del conducto. De la simetría cilíndrica del problema se deduce que σ_3 es el esfuerzo vertical, σ_2 es radial, compresivo, y σ_1 es perpendicular al radio, componente angular, y es de tensión. La fractura se producirá en la dirección del esfuerzo intermedio, radial, y próxima al esfuerzo menor, vertical. Estas fracturas, si son intruídas por un magma, formarán un sistema de diques radiales, Figura 10.

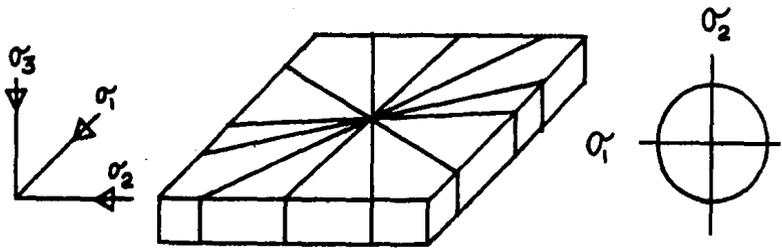


Figura 10.

Interpretación Regional con Diagramas de Rosas

Si se examinan en grupo los histogramas que se obtienen de una región se podrá hacer una interpretación sinóptica de ella. El examen de éstos se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. Se numeran los histogramas de una región.
2. Se analiza cada uno para formar una tabla en la cual figuren el número de histograma, la dirección de las ramas principales y los mecanismos deducidos que las podrían haber causado.
3. En un transportador de papel, de 180° , se anotan las direcciones de las ramas, así como el número del histograma al cual pertenecen.
4. Se examina la gráfica para determinar si hay agrupamientos y cuáles son sus límites.
5. Se obtiene la dirección media de los agrupamientos y su magnitud relativa. La magnitud se obtiene sumando la magnitud relativa de cada rama que compone al agrupamiento y el total se divide entre el número de histogramas que se agrupan.
6. Con las características de cada grupo es posible delimitar zonas en las cuales es común la presencia de fallas o fracturas en un intervalo de direcciones.

Este proceso se aplica a ramas que no se han interpre

tado como producidas por esfuerzos compresivos horizontales, caso 2 a, σ_3 horizontal. Para estos casos se hacen agrupamientos de las direcciones de estas fallas.

Con base en las zonas definidas con fracturamiento similar se interpreta la región para formular hipótesis sobre la historia tectónica regional.

METODO DE TRABAJO

Para sistematizar el análisis de las regiones de interés geotérmico se estableció una secuencia de trabajo. Que da entendido que algunos de los puntos que se enumeran a continuación pueden desarrollarse simultáneamente, y que al gunos más pueden ser intercambiados en su orden de ejecución. En primer lugar se mencionan las actividades y subsecuente-mente se hacen comentarios aclaratorios.

- 1) Localización de manifestaciones termales en la región de interés y, de ser posible, el registro de su temperatura.
- 2) Interpretación preliminar de imágenes LANDSAT (escala 1:1 000 000, bandas 5 y 7) extrayendo los rasgos lineales y edificios volcánicos más importantes.
- 3) Correlación entre manifestaciones termales e interpretaciones preliminares para definir las regiones de mayor interés y emprender su estudio detallado.

- 4) Adquisición de mapas topográficos, climáticos, geológicos, fotografías aéreas verticales e información pertinente de la región.
- 5) Proposición preliminar sobre la estructura e historia geológica de la región.
- 6) Interpretación definitiva de las imágenes Landsat con los rasgos lineales de mayor importancia (i.e., mayores que 15 Km), edificios volcánicos y cuerpos de agua.
- 7) Interpretación definitiva de las imágenes Landsat, bandas 4,5,6 y 7, en escala 1:1 000 000 con los rasgos lineales mayores que 3 Km, incluyendo los mayores que 15 Km., edificios volcánicos, principales cuerpos de agua y alteraciones de suelo y vegetación.
- 8) Diagramas de rosas de los resultados de los puntos 7) y 8) y su interpretación.
- 9) Proposición preliminar sobre la tectónica de la región.
- 10) Interpretación definitiva de una imagen Landsat, banda 7, a escala 1:500 000 con los rasgos lineales mayores que 1.5 Km, edificios volcánicos, cuerpos de agua y alteraciones de suelo y vegetación.
- 11) Segundo esquema tentativo tectónico y estructural de la región.
- 12) Interpretación de fotografías aéreas verticales, B y N, a una escala aproximada de 1:50 000 en busca de fallas, fracturas, edificios volcánicos, cuerpos de agua y alte

raciones del suelo y vegetación.

- 13) Inferencia de las fallas profundas, fosas (graben), pilares (horst), domos, calderas y megaestructuras.
- 14) Construcción de diagramas de rosas de zonas selectas de la región e interpretación de éstos.
- 15) Tercer esquema tentativo de la tectónica y estructura de la región.
- 16) Visita a la región para afinar y verificar las interpretaciones y los esquemas propuestos.
- 17) Proposición final de la tectónica de la región, su historia y potencial geotérmico.

COMENTARIOS

Los siguientes son comentarios a la Sección Método de Trabajo; los números se refieren a los puntos de dicha sección.

- 1) Las manifestaciones termales se pueden localizar con precisión en las cartas geológicas DETENAL, en donde algunas veces se indica su temperatura y tipo; también se pueden localizar, aproximadamente, en un mapa de manifestaciones termales (CFE, 1977) y las que el autor conozca en la región.
- 2) 3) La interpretación preliminar de imágenes LANDSAT permite determinar qué rasgos regionales son los que pa

recen gobernar la distribución de las manifestaciones termales. Esto se logra al compararla con un mapa de manifestaciones termales a la misma escala. Así se determina la importancia aparente de estructuras volcánicas o de sistemas de fallas.

La región a estudiar detalladamente se reduce solamente a la extensión que encierra zonas de morfología si milar a la que se tiene en las localidades donde ocurren las manifestaciones termales.

- 5) Con los resultados de 3) y 4) se hace un bosquejo de a) estructura regional y b) naturaleza de la superficie a estudiar. Este bosquejo constituye la base para determinar las épocas del año más adecuadas para examinar la región de manera que los componentes está ticos y dinámicos (i.e., vegetación, humedad, inclina ción y azimut solar, relieve, composición, etc.) de la región e imágenes ayuden a la interpretación. También se seleccionan las bandas espectrales más útiles, así como los años y las épocas en que la información es óptima.
- 6) 7) Las interpretaciones definitivas sirven para discrimi nar los alineamientos formados por rasgos lineales grandes (i.e., mayores que 15 Km) de aquéllos formados por rasgos lineales entre 3 y 15 Km. y para evaluar la importancia de cada grupo.

Un alineamiento es un conjunto de rasgos formado por lineamientos cuya dirección está dentro de un intervalo definido. La longitud de éste en la dirección media debe ser al menos 2 veces mayor que la de su sección transversal.

Un lineamiento es un conjunto de "pixels" de características semejantes, dispuestos uno tras de otro, p.e. los "pixels" que representan edificios volcánicos pueden formar un lineamiento de volcanes.

En este trabajo un rasgo lineal es la manifestación tonal, en la imagen, de un accidente topográfico lineal.

- 8) Los diagramas de rosas no permiten una comparación cuantitativa precisa de los distintos alineamientos porque la iluminación procede de una dirección privilegiada (azimut solar). Tal dirección es propia de cada imagen y da lugar a que los rasgos lineales cuyo azimut es próximo al del Sol no sean detectados por el intérprete con el mismo esfuerzo que aquéllos cuyo azimut es normal al del Sol, (Short, 1974). Esto se debe a la ayuda que brinda la sombra en el proceso de reconocimiento de accidentes topográficos de esta clase.

Este efecto depende en forma compleja de las características de cada región y se procura disminuirlo dan

do más peso a otros factores que intervienen en la interpretación y teniendo presente que la longitud medida de los rasgos lineales con azimut próximo al del Sol puede ser mayor que lo que se indica en el diagrama.

- 9) Teniendo en cuenta la topografía, litología, clima, interpretaciones preliminares de imágenes y localización de manifestaciones termales se elabora una proposición preliminar sobre la estructura e historia geológica de la región. Llegando a este punto se habrán agregado alineamientos y su organización, el vulcanismo más notable y su distribución, las estructuras más importantes y la dirección de distintos esfuerzos cuyas huellas son aún visibles en la superficie. Con esta nueva información se modifica la proposición inicial y se formula otra más completa, considerando ahora mecanismos tectónicos.

Es importante que se repita este proceso de iteración de un modelo después de cada logro de información, pues ésta será cada vez más compleja y detallada.

- 10) Los rasgos lineales que se encuentren en esta interpretación serán visibles en las fotografías aéreas a una escala 10 veces menor, por lo que además de preparar al intérprete para el trabajo posterior, el

detalle que alcanza permite la clasificación de algunos rasgos lineales como fallas de tipo y rumbo definido. También se delinear mejor los alineamientos, se registran todos los edificios volcánicos que se observan y se segmenta en componentes a las estructuras más grandes y complejas.

- 12) Con la ventaja de que el intérprete ha trabajado con imágenes a gran escala de la región, el trabajo se puede centrar en describir las manifestaciones termales reportadas, en clasificar los rasgos lineales que aparecen: fallas y su tipo, fracturas, registro y tipo de edificios volcánicos, estructuras volcánicas, en identificar los cuerpos de agua, así como en localizar las alteraciones del suelo y vegetación, tratando de registrar únicamente las debidas a actividad hidrotermal. La información cultural (i.e., carreteras, poblados, etc.) sólo se utiliza como punto de referencia para ensamblar una interpretación con otra y para relacionar a éstas con las cartas o mapas que se tienen. El resultado es un mapa formado por el ensamble de las interpretaciones de las fotografías a una escala aproximada de 1:50 000 con las deformaciones que pueden existir en las fotografías sin rectificar.

- 13) En el mapa obtenido se pueden discriminar las fallas profundas de las superficiales, señalar la presencia de fosas ("graben") y pilares ("horst"), domos, calderas, centros eruptivos, y delinear megaestructuras. Este conocimiento sirve para seleccionar los lugares de donde es más útil obtener un diagrama de rosas.
- 17) La visita física a la región sirve para refinar la interpretación y ajustar el modelo.

CAPITULO II
APLICACION Y RESULTADOS
EN LA REGION NORESTE DE MORELIA

La región estudiada está comprendida dentro del rectángulo cuyos lados son los paralelos 19°35' y 20°05' Norte y los meridianos 100°16' y 101°22' Oeste; tiene una superficie aproximada de 5600 Km², 50 (N-S) por 112 (E-W) Km. Se encuentra entre los estados de Guanajuato, México, Michoacán y Querétaro. Las poblaciones más importantes dentro de ella son Acámbaro, Cuitzeo, Cd. Hidalgo, Maravatío y Morelia.

GEOLOGIA REGIONAL

Las cartas geológicas de los Estados de Guanajuato y Michoacán (López, 1970, 1971) a escala 1:500 000 fueron ensambladas para tener una carta geológica de la región. Este ensamble se muestra en la Figura 11. Aunque fueron utilizadas cartas geológicas editadas por Detenal, no se muestran aquí.

Las rocas de la región son de origen volcánico principalmente y su edad aumenta de Norte a Sur. De Sur a Norte, es decir, de antiguo a moderno, se encuentra el anticlinal de Tzitzio-Huetamo (Demant, 1978) con rocas del Mesozoico no diferenciadas, se continúa al Norte con rocas del Cenozoico Inferior y se sigue con rocas del Cenozoico Medio Volcánico y después con las del Cenozoico Superior Volcánico; éstas se extienden a todo lo largo de la región, hasta Yuriria al Norte y hasta Uruapan y Pátzcuaro hacia el

CARTA GEOLOGICA DE LA REGION NORESTE DE MORELIA.

LEYENDA

Q	Cuaternario, rellenos de valle, suelos, depósitos de acarreo, gravas, arcillas poco consolidadas y tobas alteradas.
Csv, Tb	Cenozoico Superior Volcánico, rocas ígneas extrusivas, tobas.
Cmv, Ige, Ba, R	Cenozoico Medio Volcánico; rocas ígneas extrusivas, basalto, ignimbritas, riolitas, andesitas.
Ci	Cenozoico Inferior; rocas clásticas continentales con intercalaciones de rocas ígneas extrusivas.
M	Mesozoico no diferenciado; rocas ígneas y sedimentarias.
RM	Triásico, tobas, areniscas y conglomerados.

SIMBOLOS

—————

Contacto geológico principal

- - - - -

Límite estatal

Formada con las cartas geológicas de los estados de Guanajuato y Michoacán según E. López Ramos, 1970-1971.

Figura 11.

Suroeste. Las partes bajas, como el Sureste del Lago de Cuitzeo y Maravatío, están ocupadas por rocas del Cuaternario, principalmente aluviones.

En el área vecina a la Laguna de Cuitzeo se observan diques de riolita intruídos en matrices de tobas riolíticas, basálticas y ácidas. Las rocas de esta área tienen edades que van del Terciario Superior al Cuaternario.

La columna litológica, deducida de la carta geológica E14A13 Detenal se muestra en la tabla II.

ROCA	EDAD
Basalto	CUATERNARIO
Toba Riolítica	
Conglomerado de Basalto	
Basalto, Brecha Volcánica, Brecha	
Volcánica Basáltica, Toba Basáltica	
Arenisca	
Toba Riolítica	
Riolita	
Toba Riolítica	
Toba Basáltica	
Andesita	TERCIARIO SUPERIOR

TABLA II. Columna geológica del área de Cuitzeo obtenida a partir de la carta geológica E14A13 Detenal.

La columna geológica indica varias etapas de actividad volcánica, secuencias riolita-basalto, entre las cuales ocurrió la formación de la cuenca lacustre, areniscas subyaciendo basaltos y sobreyaciendo riolitas. La existencia de diques de riolita indica intrusiones bajo la superficie de la cuenca lacustre.

En la parte oriental de la zona en estudio, el vulcanismo es abundante y consiste de conos cineríticos cuyo agrupamiento sigue la dirección NW partiendo desde la esquina SE del área estudiada hasta Los Azufres. De Los Azufres hasta Morelia, los edificios están alineados con rasgos de azimut 70° . En los alrededores de Morelia deja de seguir estas fisuras y se extiende hacia el SW con un campo volcánico que llega hasta el volcán Tancítaro, cerca de Uruapan. En general, a gran escala se tiene la apariencia de que en la parte Sur el vulcanismo se manifiesta en el perímetro de la estructura del anticlinal de Tzitzio-Huetamo.

En el Norte los edificios son más grandes y sus alineamientos siguen la dirección azimut 70° .

RASGOS TOPOGRAFICOS

La Figura 12 es un mapa topográfico de la zona estudiada (tomado de la carta Morelia E14-1 Detenal), mostrando solamente las curvas de nivel correspondientes a 1900, 2000,

2100, 2400, 2500 y 3000 msnm. El mapa se incluye para mostrar la clara manifestación topográfica de azimuth 70° que tiene el rasgo que corre aproximadamente de Morelia a Queréndaro que, cortando la estructura circular de Los Azufres entre Acámbaro y el Cerro San Andrés, se continúa al Noroeste de Maravatío. Este rasgo lineal es de importancia clave en la interpretación tectónica de la zona.

La topografía en la parte W (i.e., zona de Cuitzeo) consiste de una fosa ocupada por la Laguna de Cuitzeo y el valle al sur de ésta. El borde Sur de esta fosa es precisamente el rasgo lineal azimuth 70° arriba mencionado. Al Este del área está la zona de Los Azufres. Entre Queréndaro, Cd. Hidalgo, Maravatío y Acámbaro se tiene un alto topográfico que corresponde a un rasgo circular; este alto contiene una depresión en su parte central, en la dirección 70° antes mencionada, y es colineal al borde Sur de la zona de Cuitzeo. Al Sur de la zona de Cuitzeo se tienen altos topográficos que la separan de un rasgo circular, zona del Anticlinal de Tzitzio-Huetamo, del cual sólo se cubre la parte N, con la curva de los 2000 m.

CLIMA

El clima de la región, según la clasificación de Köppen modificada por García (1964), es (cartas climáticas 14Q-III

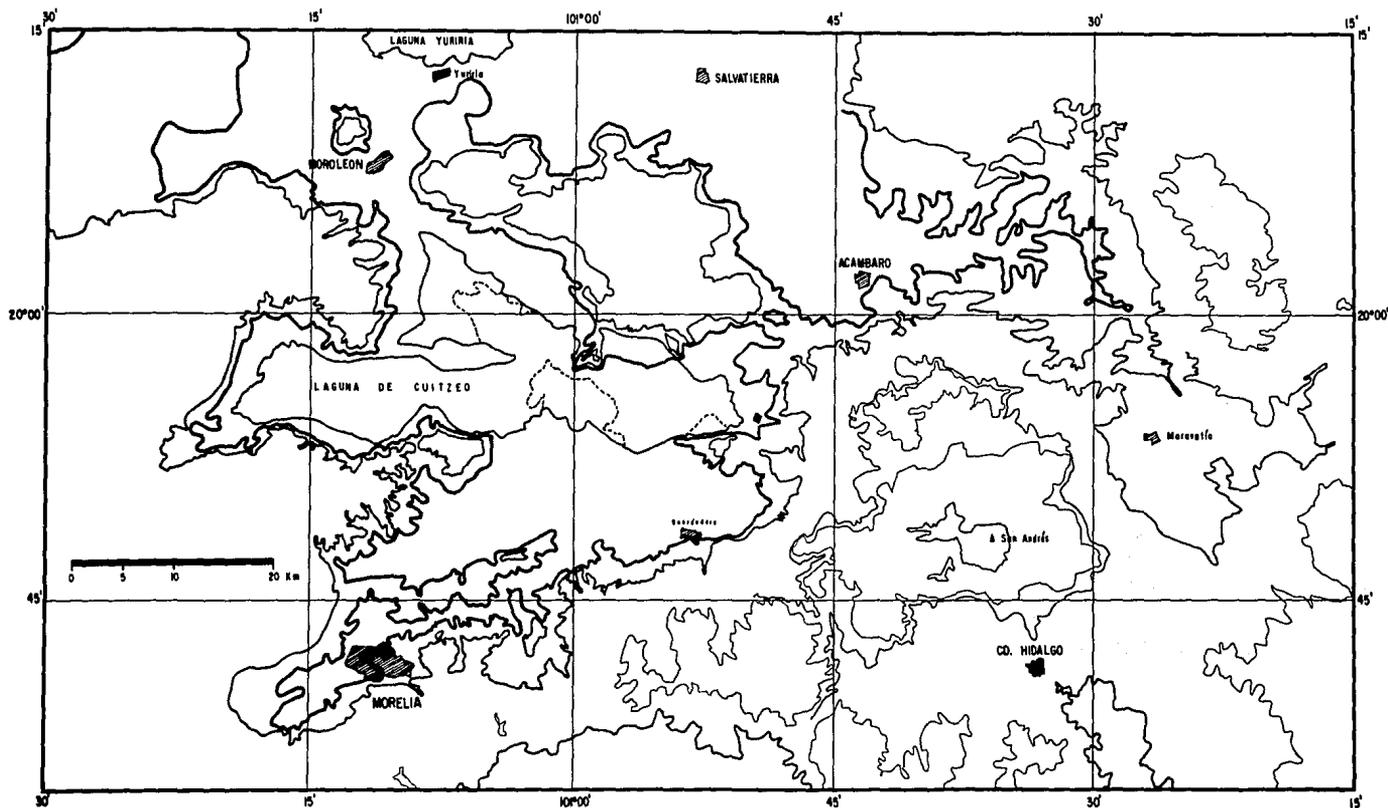


Figura 12

MAPA TOPOGRAFICO SIMPLIFICADO BASADO EN LAS CARTAS TOPOGRAFICAS DETENAL E14-1 Y F14-10

L E Y E N D A

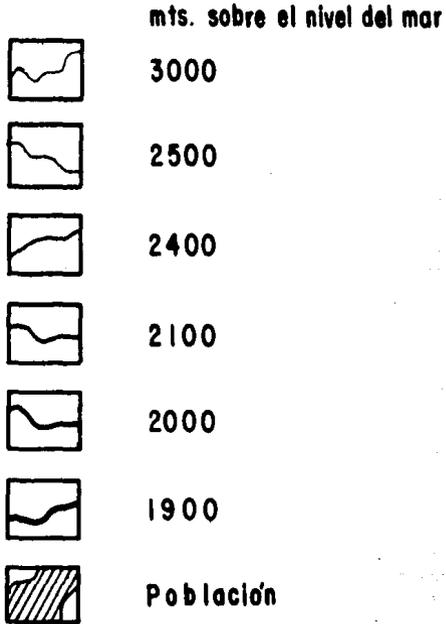


Figura 12

y 14Q-V, Detenal], de Norte a Sur:

(A) C (w₀) (w) a (e)g

(A) C (w₀) (w) b (i')g

C (w₁) (w) b (i')

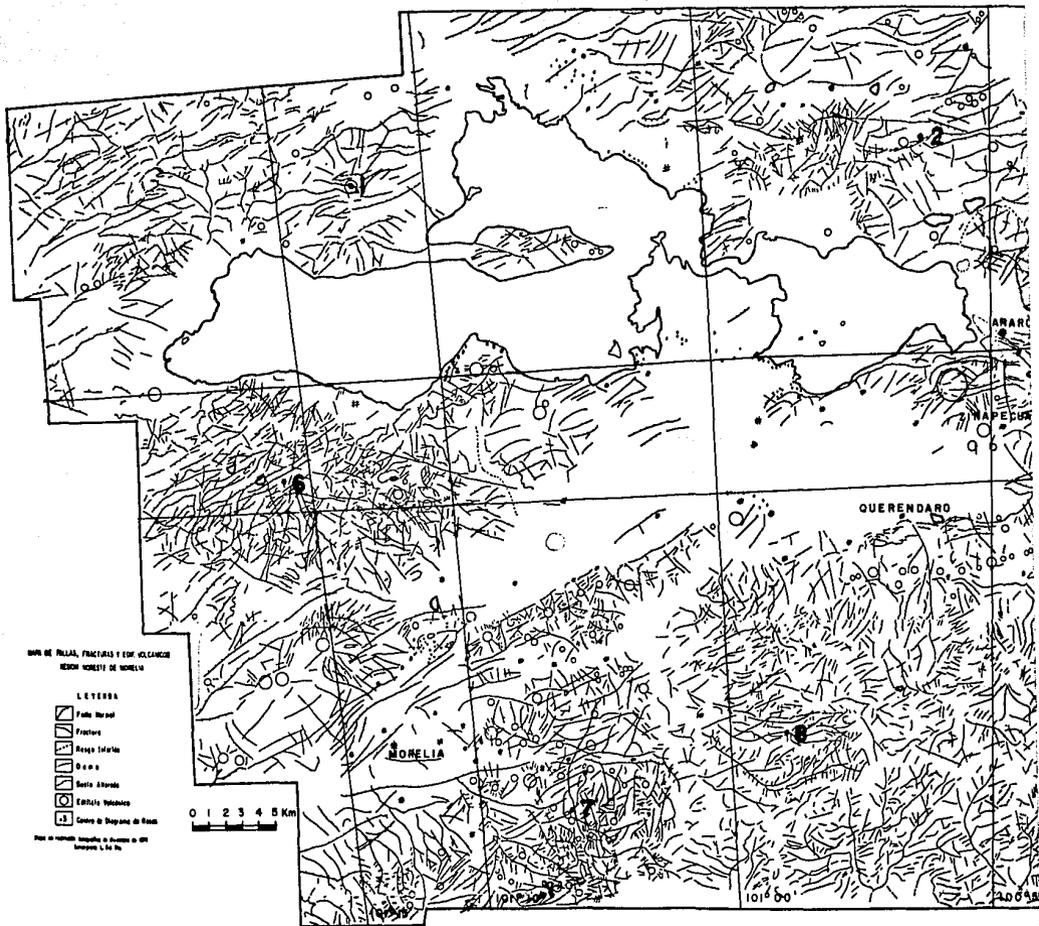
C (w₂) (w) b (i')g

o sea, el clima cambia de semicálido extremo, el más seco de los templados subhúmedos, con verano cálido en el Norte a templado húmedo con verano largo y fresco en el Sur. En toda la región se tienen lluvias en verano y marcha de temperatura tipo Ganges. En el área se tienen las estaciones climatológicas que aparecen en la Tabla III.

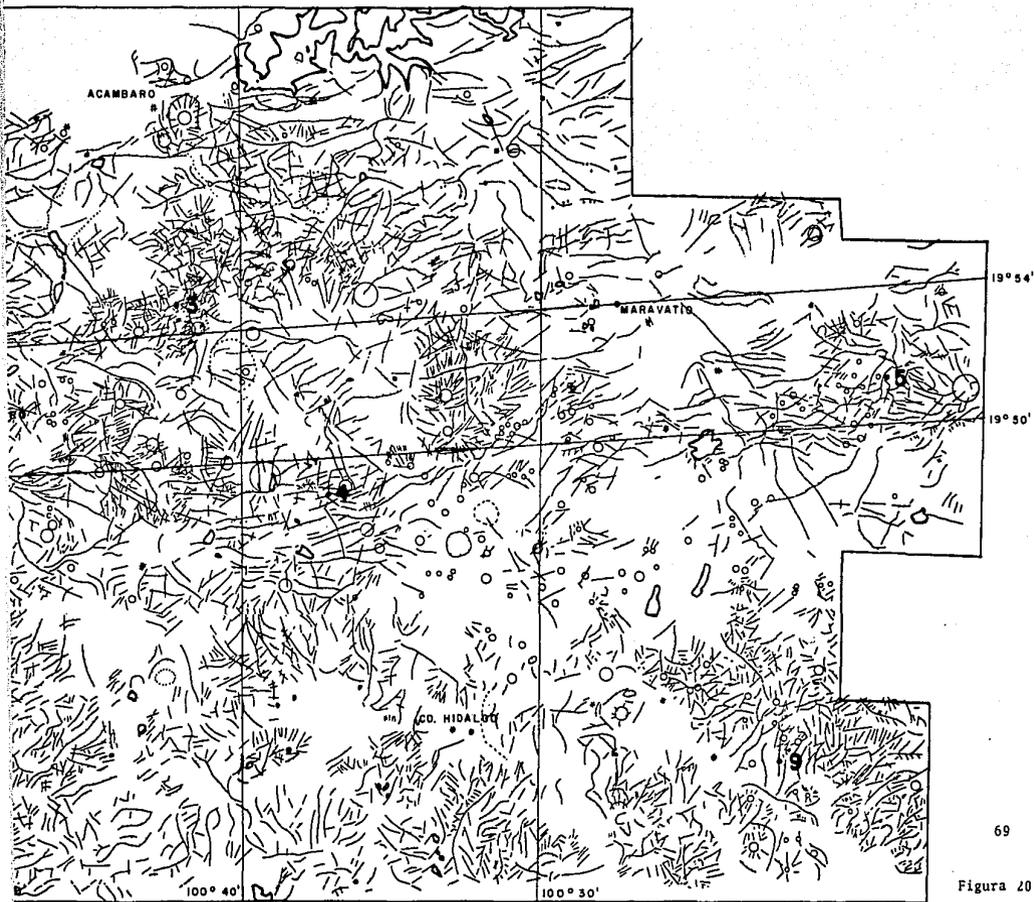
En la Figura 13 se tiene copia de la carta de climas en marcando la región estudiada y en la Figura 14 copia de las gráficas de precipitación mensual y temperatura media mensual de las estaciones climatológicas comprendidas dentro de la región estudiada.

Climáticamente la región está delimitada de manera natural en sus partes Este, Oeste y Sur, pues se tiene que el clima cambia de semicálido seco a templado húmedo.

El clima de la región es fiel reflejo de la topografía y es notable la correspondencia entre la transición de clima semicálido seco a templado húmedo con el borde Sur del área de Cuitzeo y la depresión del área de Los Azufres.



-->
Continua 1



Lugar	Número	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)
Acámbaro	11002	749.2	18
Iramuco	11021	720.9	19.3
Puroagüita	11041	689	
San Cayetano	11063	726.6	17.7
Tarandacuaro	11064	747.1	18.5
Copándaro	16024	740.8	18.9
Cuitzeo del Porvenir	16028	612.7	18
Cd. Hidalgo	16043	877	17.5
Morelos	16047	874.7	17
Araró	16048	681.6	18.1
Jesús del Monte	16052	647.9	17.1
	16054	758.4	16.9
La Estancia (Queréndaro)	16058	663.8	17.2
Maravatío	16059	934.6	17.8
Morelia	16062	760.7	17.6
	16073	1340.2	13.1
	16079	1305.6	13.9
	16085	785.6	17.3
Nicolasito	16086	797.6	16.7
Morelia	16109	730.8	16.4
Zinapécuaro	16114	770.	18

TABLA III. Estaciones climatológicas en la región, lugar, número de clasificación, precipitación anual y temperatura media anual.

Datos tomados de las cartas de climas 14Q-III y 14Q-V Detenal.

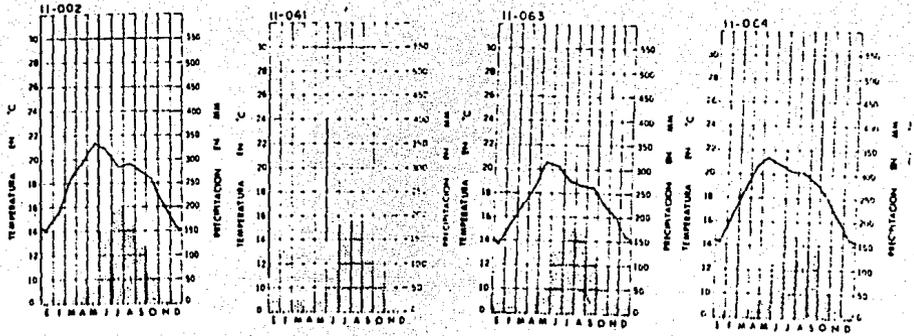


Figura 14a

Figura 14a,b. Gráficas de precipitación total (mm) y temperatura media mensual (—) de las estaciones climatológicas de la región, según numeración de la tabla II. (tomadas de las Cartas de Climas 14Q-III y 14Q-V, DETENAL)

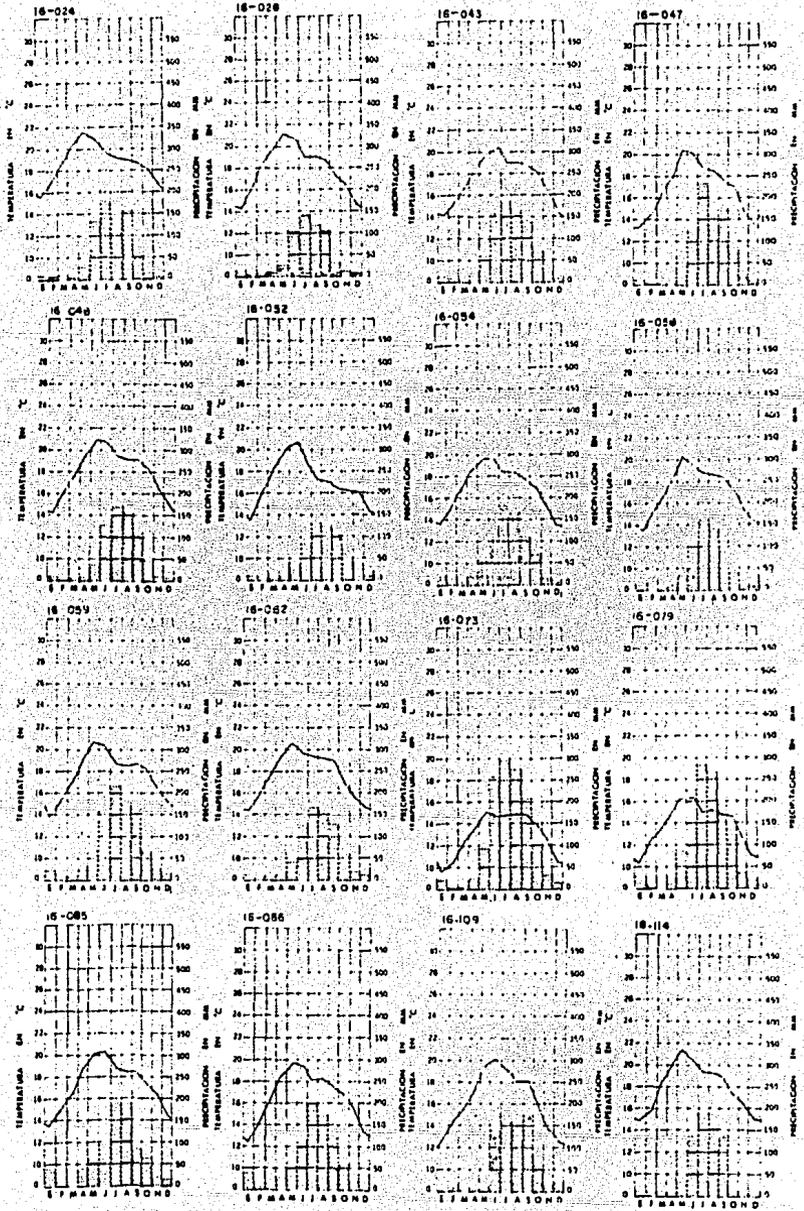


Figura 14b

ESFUERZOS REGIONALES

Para obtener un bosquejo de los esfuerzos regionales en la zona, se procedió conforme al método descrito en el Capítulo I de este trabajo.

Las imágenes Landsat que se emplearon en el análisis tienen distinta elevación y azimut solar (NASA, 1972) y fueron registradas en distinta fecha, aunque las condiciones físicas del terreno son distintas, los resultados se pueden compaginar. En la Tabla IV se tienen las características principales para cada imagen.

Fecha	Elevación Solar (Grados)	Azimut (Grados)	Estado de la superficie
4-I-73	36	142	poco húmeda
22-I-73	38	138	poco húmeda
28-III-76	50	111	seca; mes más seco.

TABLA IV. Características principales de las imágenes Landsat empleadas.

En la Figura 15 se tiene la interpretación de las imágenes Landsat a escala 1:1 000 000 mostrando los rasgos lineales mayores que 10 Km y en la Figura 16 se muestran aquéllos mayores que 3 Km. incluyendo las mayores que 15 Km. Ambas

interpretaciones se hicieron para el área encerrada por los paralelos $19^{\circ}30'$ y $20^{\circ}30'$ N y los meridianos 100° y $101^{\circ}30'$ W. Para ambas interpretaciones se hicieron diagramas de rosas que se muestran, en la Figura 17 para rasgos mayores que 15 Km. y en la Figura 18 para los mayores que 3 Km., incluyendo los mayores que 15 Km.

La interpretación de la imagen 1:500 000 se muestra en la Figura 19 y cubre la zona comprendida entre $19^{\circ}30'$ y $20^{\circ}20'$ N y $100^{\circ}15'$ y $101^{\circ}25'$ W. Esta interpretación se hizo anotando únicamente los cuerpos de agua, edificios volcánicos y rasgos lineales de más de 1.5 Km. de longitud. En algunos casos se pudo inferir que se trataba de fallas normales y el bloque caído, pero no se implica que no existan fallas en otras localidades de otros tipos y con otros rumbos.

Las fotointerpretaciones de las 178 fotografías aéreas verticales B-N a escala aproximada de 1:50 000 que cubren la región se ensamblaron formando un mapa.

En la Figura 20 se tiene una reducción del mapa a una escala aproximada de 1:300 000. Este mapa carece de precisión cartográfica pues las fotografías empleadas no están restituídas; en él se muestran los principales cuerpos de agua, edificios volcánicos y fallas y fracturas mayores que 500 m. que se pudieron apreciar.

Se tomaron nueve localidades del mapa para hacer diagra

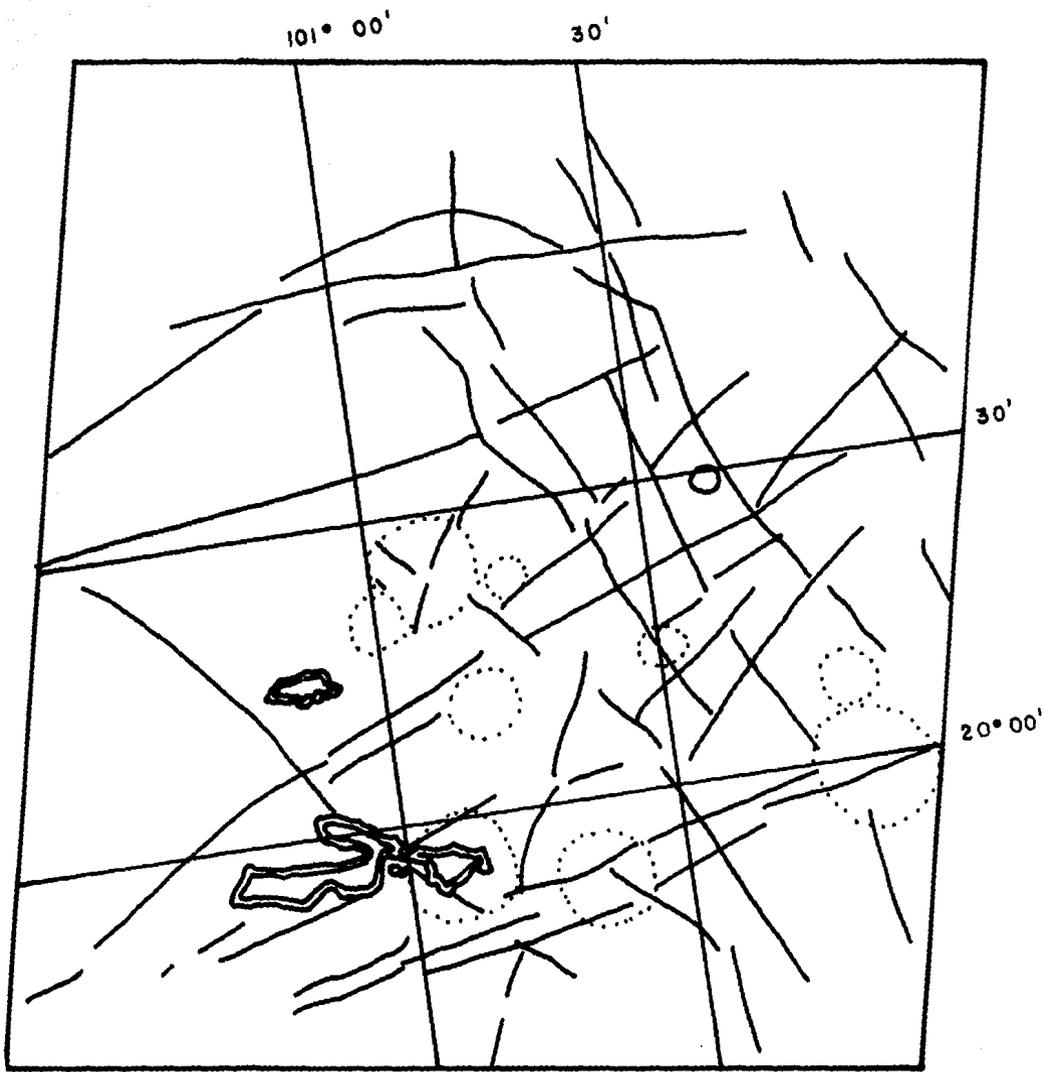


Figura 15. Interpretación de rasgos lineales mayores que 10 Km. de la imagen Landsat del 22 de enero de 1973 en escala 1:1 000 000 de la región Noreste de Morelia.
 —: rasgo lineal; ... : contorno de rasgo circular. Se muestran los lagos de Cuitzeo y de Yuriria.

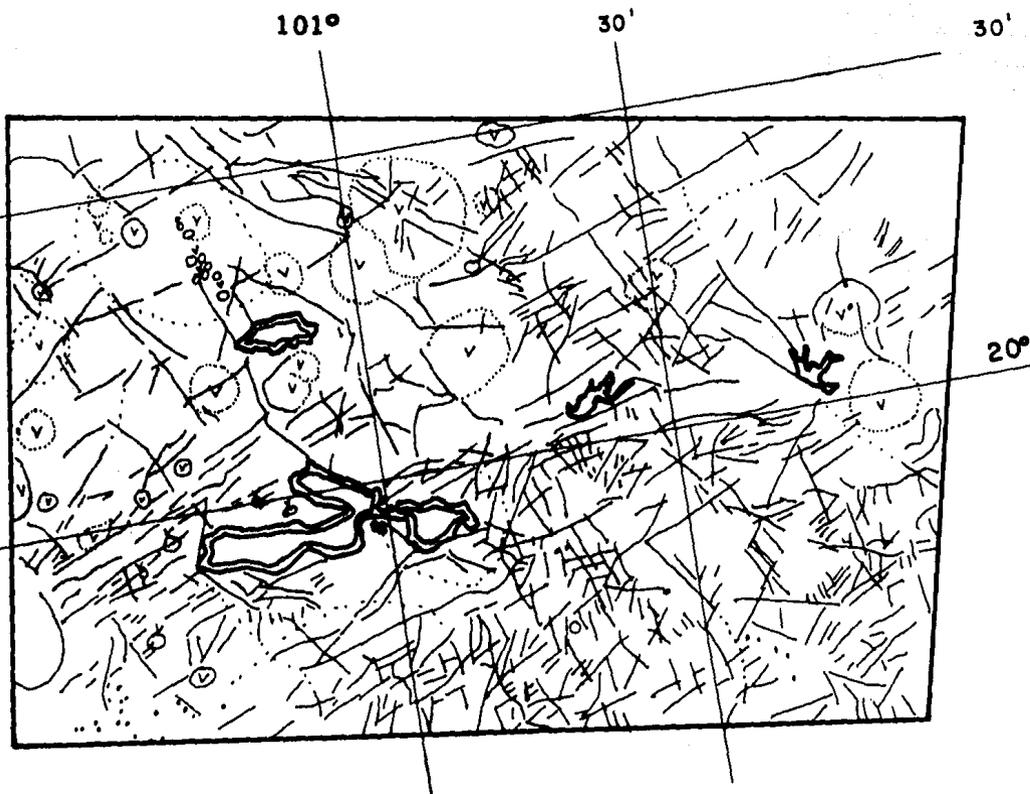


Figura 16. Interpretación de la imagen Landsat del 22 de enero de 1973; banda 7, en escala 1:1 000 000; de la región Noreste de Morelia mostrando los rasgos mayores que 3 Km. —: rasgo lineal; ···: contorno de rasgo circular; v: edificio volcánico. Se muestran las lagunas de Cuitzeo y Yuriria y las presas Solís y Tepuxtepec.

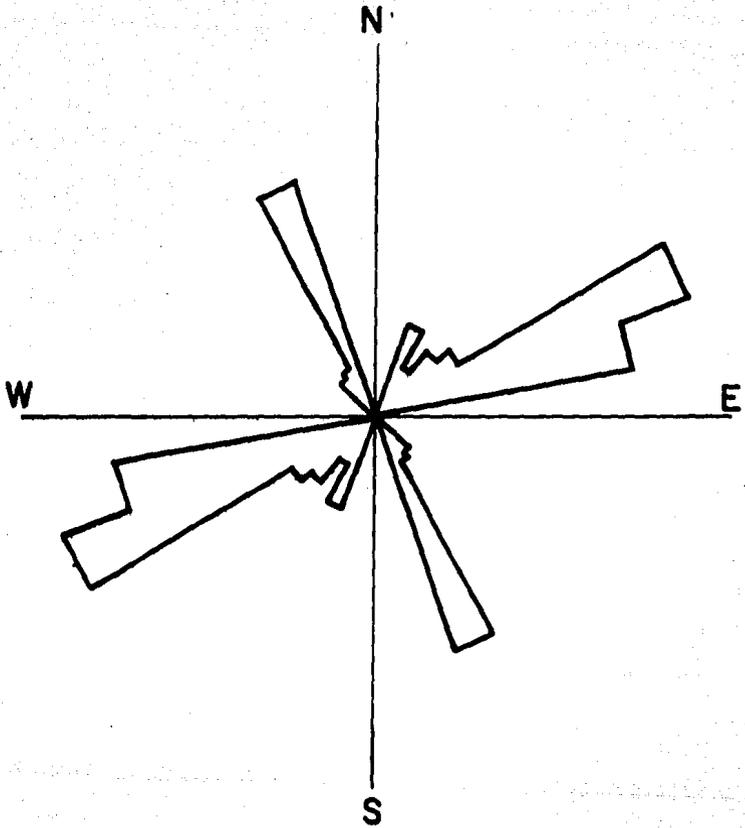


Figura 17. Diagrama de rosas de los rasgos lineales de la Figura 15, rasgos mayores que 10 Km., contenidos en un círculo de 50 Km. de radio con centro en $20^{\circ}01'N$, $100^{\circ}44'W$. La rama principal tiene un azimut medio de 70° y la secundaria de 155° .

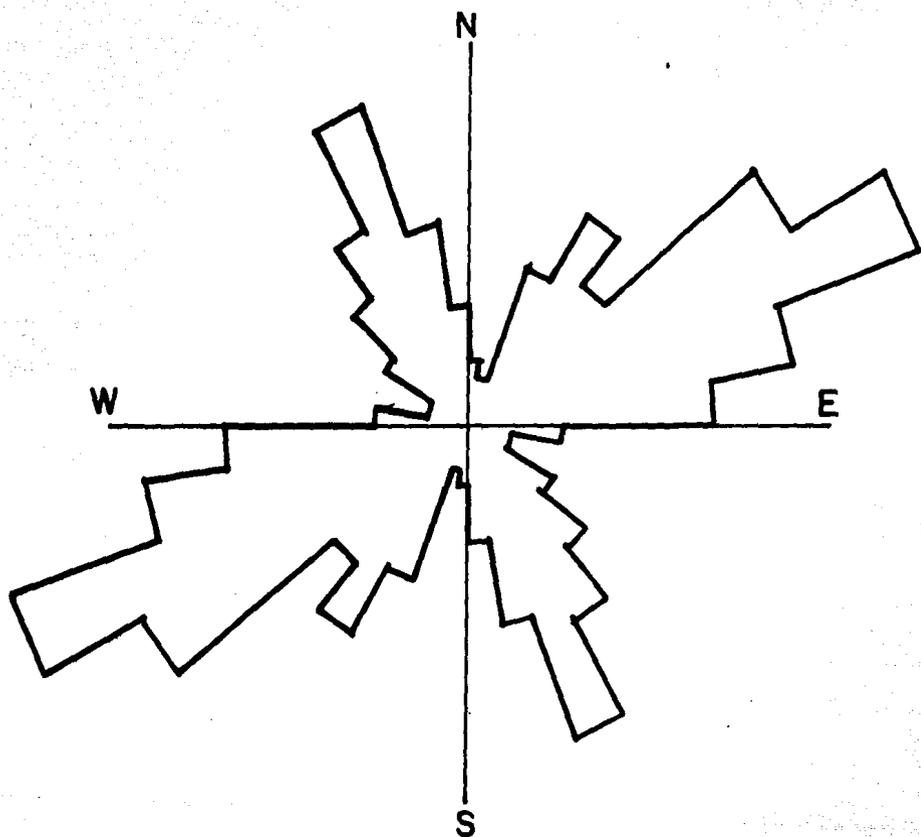


Figura 18. Diagrama de rosas de los rasgos lineales de la Figura 16, rasgos mayores que 3 Km., contenidos en un círculo de 50 Km. de radio con centro en $20^{\circ} 01'N$, $100^{\circ} 44'W$. La rama principal tiene un azimut medio de 65° y la secundaria de 155° .



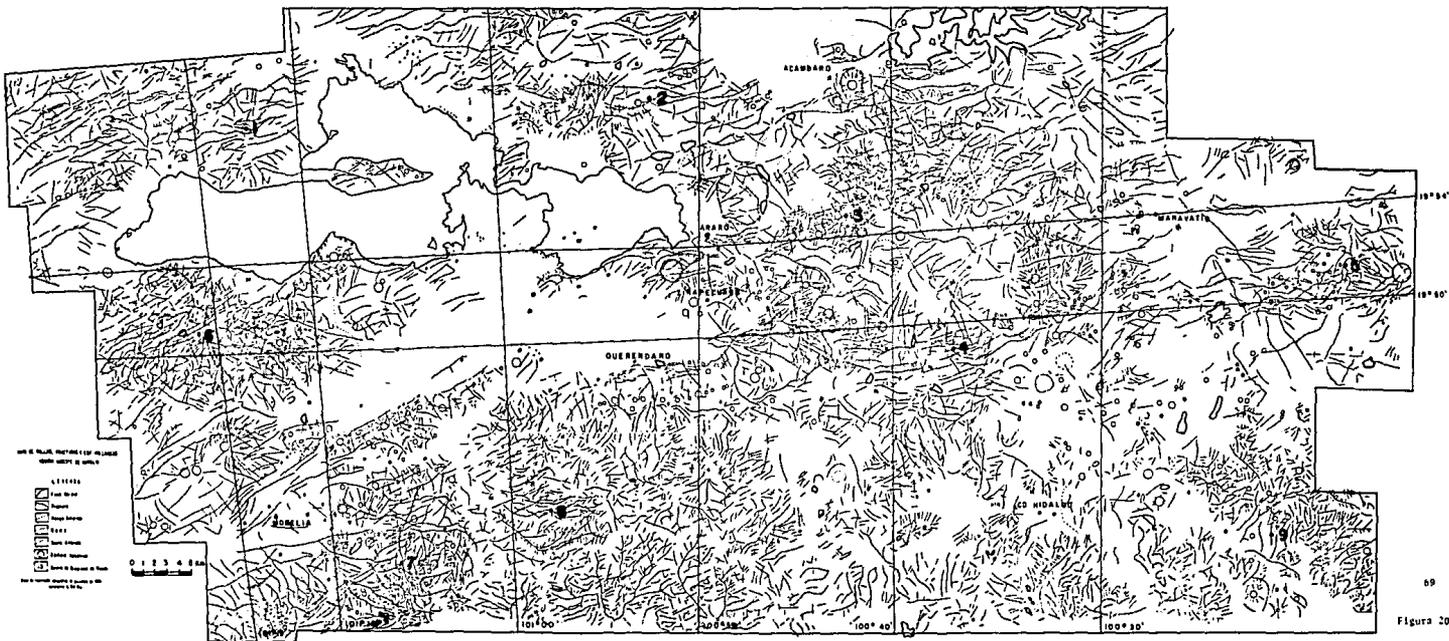
67 Figura 19

Figura 19. Interpretación de la imagen Landsat del 4 de enero de 1973; banda 7, en escala 1:500 000; de la región Noreste de Morelia.—: rasgo lineal mayor que 1.5 Km.; --- falla normal; v: edificio volcánico; ---: contorno de edificio volcánico. Se muestran las lagunas de Cuitzeo y Yuriria y las presas Solís y Tepuxtepec.

mas de rosas de fallas, de fracturas y de ambas; aquí sólo se muestran en una sola figura, los diagramas de rosas de fallas y fracturas para esas nueve localidades. La posición de cada localidad se encuentra en el mapa de la Figura 20 y los diagramas en la Figura 21 (a), (b), (c) y (d).

Los diagramas de rosas de las Figuras 17 y 18 son consistentes en cuanto a que se tiene en ambos una rama en dirección 65° en una y 70° en la otra, como dirección principal. La dirección secundaria está en dirección 155° en ambos diagramas.

La familia en dirección 70° se debe a la presencia de un conjunto de fallas normales y fracturas que generan pequeños escalones en el relieve y forman varios graben. Por otro lado, esta dirección es la misma que tiene el máximo esfuerzo compresivo horizontal, según se infiere de la teoría de Coulomb-Navier.



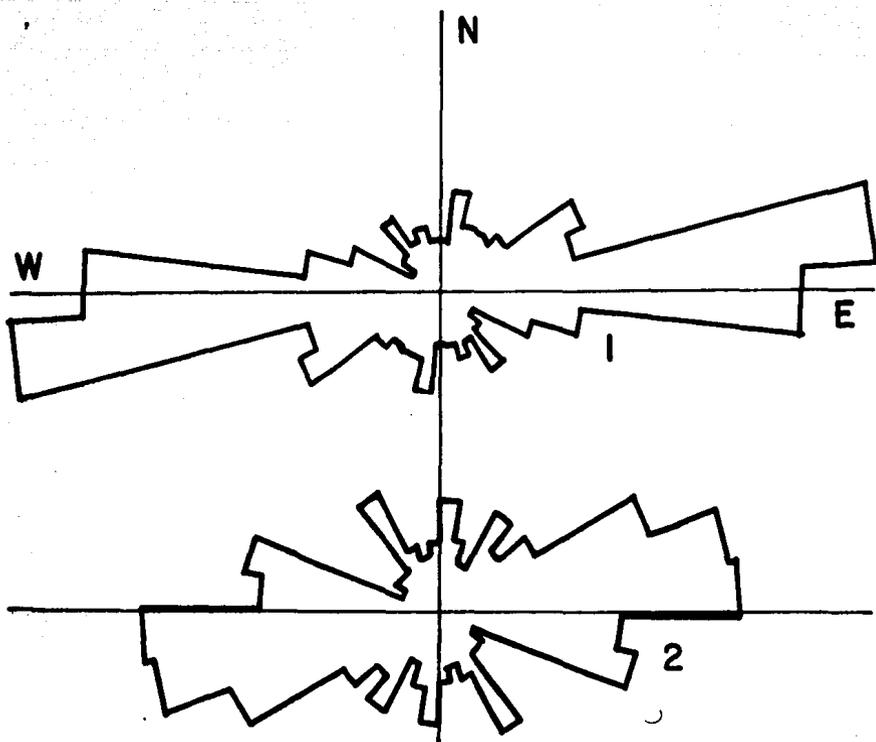


Figura 21a

Figura 21a, b, c, d. Diagramas de rosas de las fallas y fracturas contenidas en círculos de 5 Km. de radio cuyo centro se indica en la Figura 20. Las direcciones de las ramas y los mecanismos propuestos están resumidos en la Tabla III.

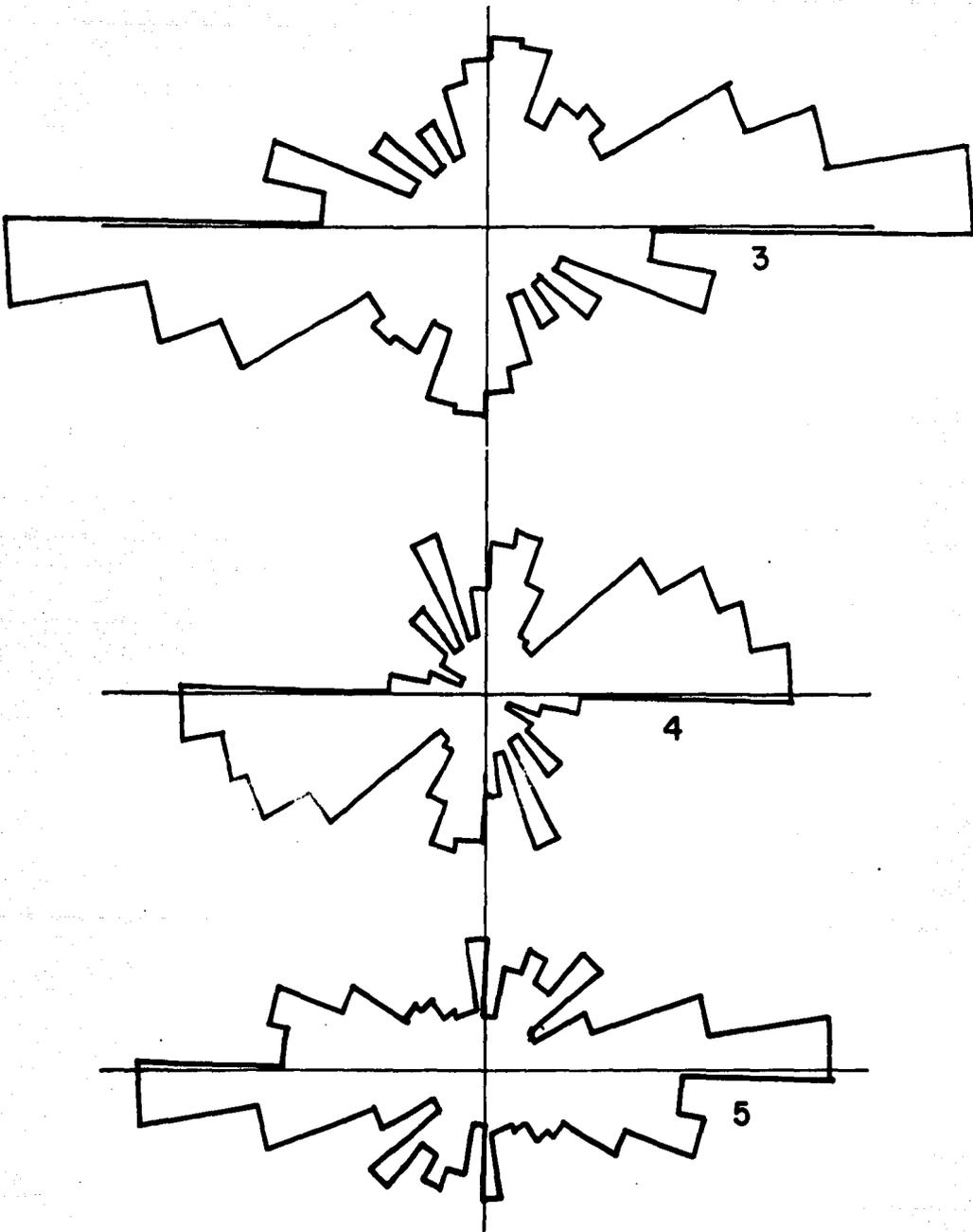


Figura 21b

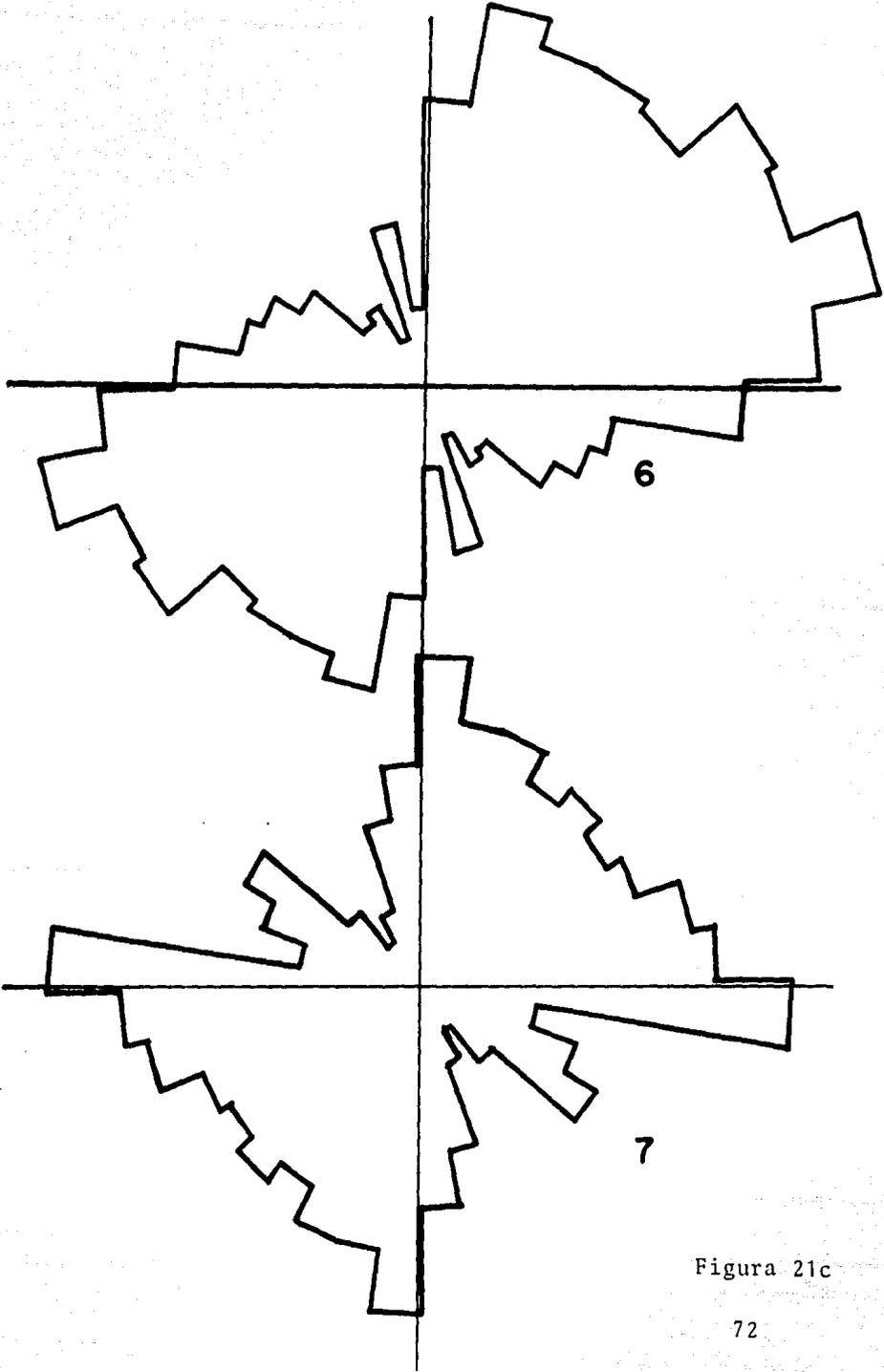


Figura 21c

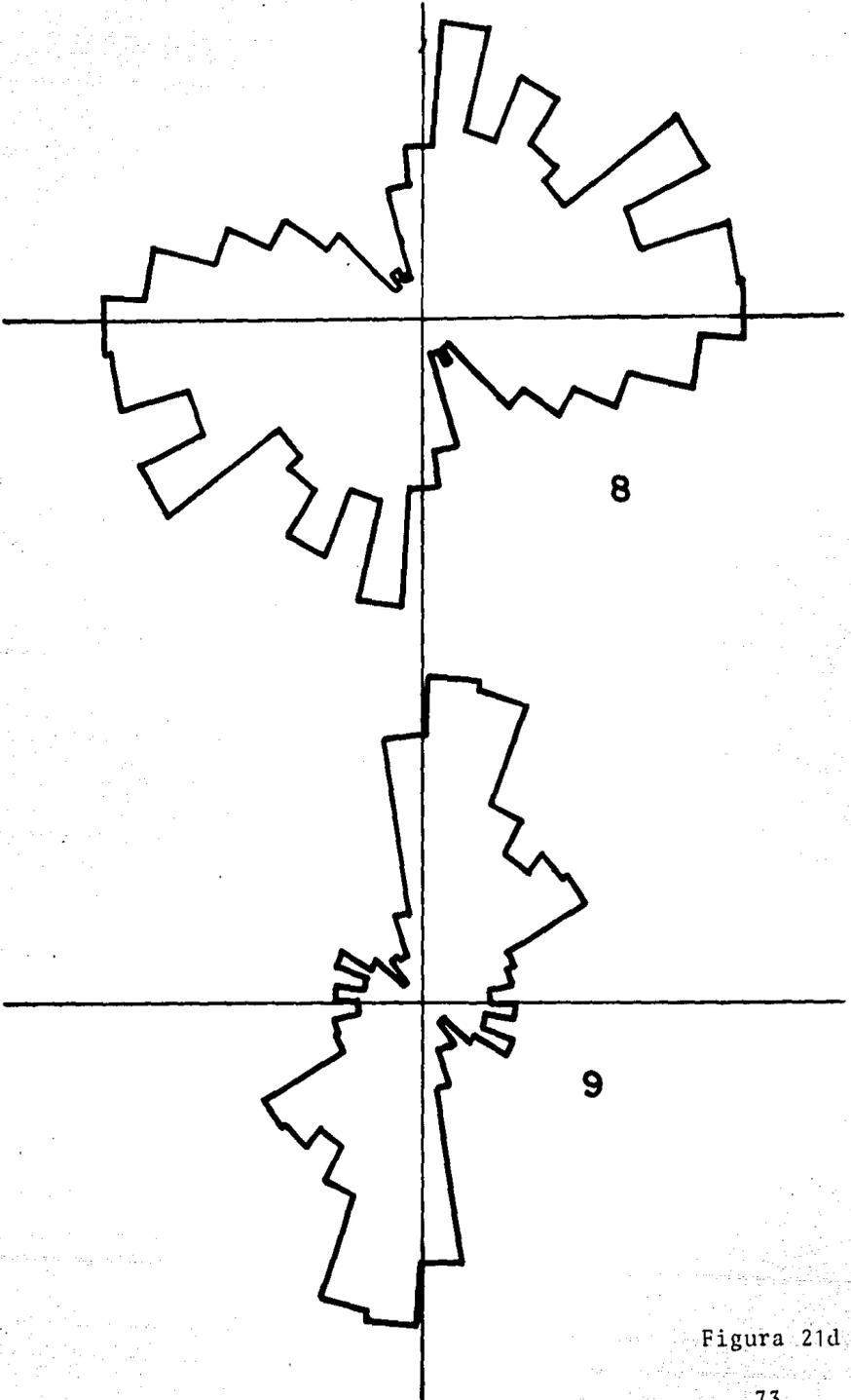


Figura 21d

El azimut del Sol en las imágenes Landsat, 140° en promedio, ocasiona que los rasgos lineales cuya dirección sea próxima a ésta, no sean fácilmente detectables, debido a la ausencia de sombra que los subraye. Este hecho puede resultar en que la familia con dirección 155° realmente sea más grande de lo que se midió. El lóbulo de esta dirección tiene una forma diferente al de la familia en dirección 70° e implica que seguramente se debe a un mecanismo distinto. La familia 155° se extiende hacia el Norte de la zona y se observan grandes rasgos paralelos hacia el Este, cerca de Querétaro, que son más abundantes en la parte de Los Azufres, casi no observándose en la de Cuitzeo.

En la interpretación de la imagen Landsat escala 1:500 000 (Figura 19) se observa que un bloque en la parte Sur del centro tiene un borde convexo hacia el Norte. Este bloque se manifiesta por la textura de rasgos lineales y corresponde a un área de 25 Km. alrededor del anticlinal de Tzitzio-Huetamo. En esta zona se observan muy pocos edificios volcánicos. Algunos de los rasgos lineales en dirección 70° se aprecian como fallas normales; esto se debe a que el azimut del Sol facilitó su clasificación y no implica que no existan otras con distinta dirección y de distinto tipo.

En la tabla V se resumen las direcciones principales de las fallas y fracturas de la región y el mecanismo que las

origina. En la parte Norte, o sea, en las zonas 1,2,3,4 y 5 de la Figura 20, la dirección principal está entre 73° y 92° y al Sur, o sea en las zonas 6,7,8 y 9, está entre 22° y 61° .

Zona	Direcciones principales	Mecanismo
1	85	falla normal
2	85	fallas normales
	146	
3	84	fallas normales
	1	
4	73	
	12	fallas normales
	156	
5	92	falla normal
6	52	fallas normales
	164	
7	-	levantamiento-colapso
	40	falla normal
	82	
8	61	fallas normales
	22	
9	22	falla normal

Tabla V. Principales direcciones de los rasgos interpretados en las fotografías aéreas y mecanismos inferidos para éstos en cada una de las zonas medidas. Ver Figura 20 para la localización de las zonas.

Si se analiza la disposición de los bordes caídos de las fallas presentes en estas zonas se puede inferir que se trata de un graben cuyo borde Norte tiene un rumbo entre 73° y 92° , su borde Sur oscila entre la dirección 40° a 61° y en la parte E el graben se cierra con fallas y fracturas en dirección 22° . Si es así, entonces se trata de un graben en forma de una cuña trunca que se ensancha hacia el Suroeste con dirección media 70° .

En la parte oriente de la región, zonas 2, 3 y 4 se tienen rasgos de importancia secundaria en direcciones 146° y 156° unos, y 1° y 12° otros. En el mapa estos rasgos lineales se identifican como fallas normales y fracturas que pueden formar un graben en dirección aproximada 150° cuyos bordes estarían al Este en el Cerro de San Andrés y al Oeste en Araró. Este graben se denominará como graben Acámbaro-Hidalgo. Una dirección similar se presenta sólo en la región 6 (164°), pero es de muy pequeña magnitud.

En la parte Sur de toda la región, el vulcanismo tiene la particularidad de ocurrir asociado con las fallas de azimut 70° y parece correr por fisuras sin manifestaciones en la superficie. Este hecho implica que aquí las estructuras en dirección 70° se deben a fenómenos corticales y no sólo superficiales. El alineamiento más largo se extiende desde 16 Km al E en Maravatío hasta el Cerro Quinceo, al Sur del Lago de

Cuitzeo, cerca de Morelia, a 92 Km de distancia, y está rodeado de edificios volcánicos en todo su trayecto.

En el graben Acámbaro-Hidalgo el vulcanismo se presenta en forma aparentemente desordenada, pero está controlado por rasgos en dirección 70° y se prolonga hacia el SE fuera de la región estudiada. En los alrededores de Morelia, es decir, en la parte Suroeste, el vulcanismo parece seguir un patrón de líneas aproximadamente paralelas a la dirección principal (70°) y deja de manifestarse en la zona del anticlinal de Tzitzio-Huetamo.

La alteración del suelo debida a procesos hidrotermales está localizada en el borde Sur del Lago de Cuitzeo, en la línea Morelia-Queréndaro, y en forma de caolín en los alrededores del Cerro Chalchihuite; al Sur de Cd. Hidalgo, y en la zona de Los Azufres. Estos tres lugares están dentro de lo que es el graben Acámbaro-Hidalgo.

TECTONISMO

Por convenir a la interpretación de los esfuerzos regionales; para desarrollar un modelo tectónico; se presenta una breve descripción de los efectos tectónicos de un intrusivo de grandes dimensiones en una zona dada (Sanford, 1959).

El cuerpo ígneo se intruye preferentemente en una zona de debilidad cortical, dando lugar a una secuencia como la

que se describe a continuación: la presión del intrusivo produce un levantamiento de la superficie Figura 22 (b); la superficie arqueada tiene mayor área que la original por lo que la roca que la compone soporta esfuerzos de tensión. Cuando estos esfuerzos alcanzan el valor de la resistencia a la tensión de la roca, el material falla. El rumbo de esta falla coincide con la dirección que tiene el mayor esfuerzo compresivo horizontal. Si las fracturas son profundas puede fluir magma, emplazar diques, llegar a la superficie y formar edificios volcánicos.

Si el empuje desde abajo continúa, produce fallas y se crea un colapso central. El magma puede ahora fluir por estas nuevas fallas y tenerse vulcanismo en la parte central Figura 22 (c). Si el intrusivo sigue empujando hacia arriba, en la superficie del colapso se producirán o activarán más fallas; las efusiones volcánicas serán más abundantes y se producirá un esfuerzo compresivo horizontal debido a la presión que el magma ejerce en las paredes de los conductos por los cuales pasa. Si este esfuerzo compresivo alcanza la magnitud de la resistencia a la compresión del material, entonces se formarán fallas en el sentido de esta compresión, es decir, perpendiculares a las primeras (i.e. radiales) (Odé, 1957). Estas fallas eventualmente pueden ser intruídas por magma y formarse diques. La actividad disminuye y la estructura puede colapsarse por reducción en la presión del intru-

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

sivo, pudiéndose activar las fallas periféricas Figura 22 (d). A través de éstas podrán presentarse rescoldos del vulcanismo o ser los conductos por los cuales se manifestarán los primeros episodios futuros.

Habiendo descrito un modelo general de intrusión de un cuerpo de grandes dimensiones, regresemos al caso que nos ocupa, para hacer las consideraciones que a él se apliquen. Según se observa en una imagen Landsat escala 1:000 000 de la región. Figura 23, la zona en estudio es la transición entre dos grandes provincias. Al Sur se encuentra el anticlinal de Tzitzio-Huetamo, que corta en dirección Norte-Sur a un rasgo circular de 40 Km de radio con poca actividad tectónica aparente, pues en él afloran las rocas más antiguas de la región y se ha preservado el plegamiento descrito anteriormente. Al Norte se tiene un semicírculo de grandes edificios volcánicos; su radio aproximado es de 100 Km y su centro está 10 Km al Este de Chinapa, Michoacán; el semicírculo abarca

Figura 22. Proceso de intrusión de un cuerpo igneo de grandes dimensiones. En una zona de debilidad (a) puede emplazarse un cuerpo igneo que deforme la superficie y genere fallas, producidas por tensiones. A través de estas se puede manifestar el vulcanismo (b). La región se colapsa, las nuevas fallas son los conductos por los cuales fluye el magma (c); por reducción en la presión del intrusivo se colapsa la parte central y se forman nuevas fallas periféricas por las cuales se manifiesta la actividad volcánica. ---: magma; ■ roca.

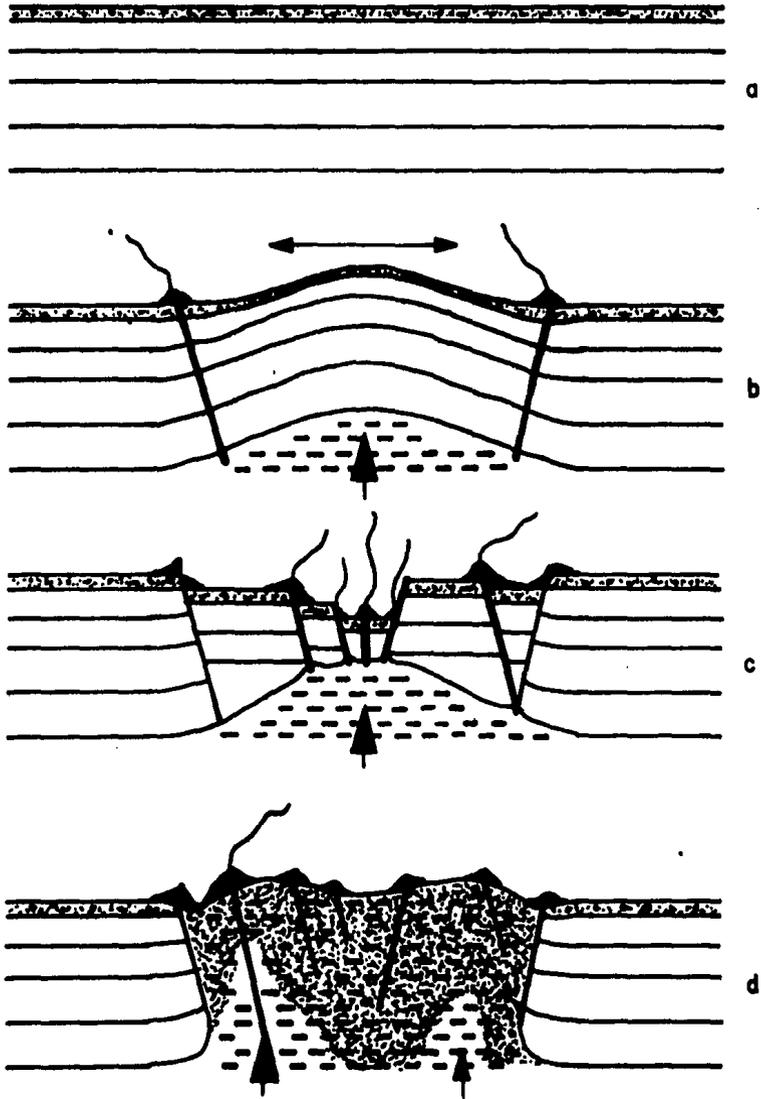


Figura 22



Figura 23. Fragmento de la imagen Landsat del 4 de enero de 1973; banda 7, en escala 1:600 000; de la región Noreste de Morelia. En el sobrepuesto se señala el rasgo circular de Los Azufres, de Cuitzeo y del anticlinal de Tzitzio-Huetamo; las fallas principales del alineamiento Tecomán-Tamiahua en su paso por la región y del graben Acámbaro-Hidalgo.

desde el Cerro Culiacán en Guanajuato, hasta cerca de Zacapu, Michoacán. Los edificios volcánicos considerados tienen diámetro mayor que 5 Km.

Entre ambas regiones se presentan grandes lineamientos con rumbo 70° , algunos de los cuales se identifican como fallas normales. Estos alineamientos forman parte de lo que en una interpretación de imágenes Landsat (Galván, 1980), Figura 24, corresponde al alineamiento Tecomán, Col.-Tamiahua, Ver., éste cruza el país de costa a costa en una dirección promedio de 65° .

El grupo de alineamientos Tecomán-Tamiahua es una zona de debilidad cortical en la que la dirección del máximo esfuerzo compresivo horizontal coincide con su rumbo y a lo largo del mismo se presentan intrusiones ígneas. (Del Río et al, 1980).

En la zona de Cuitzeo el intrusivo está alargado en la dirección mencionada, lo cual sugiere que durante el Terciario Superior las primeras fracturas producidas fueron los conductos por los cuales penetró el magma, se formaron los primeros edificios volcánicos y se intruyeron los diques de riolita. A continuación tuvo lugar el colapso central y se formó la Laguna de Cuitzeo. Encima de las areniscas lacustres se depositó el basalto producto de la actividad volcánica central.

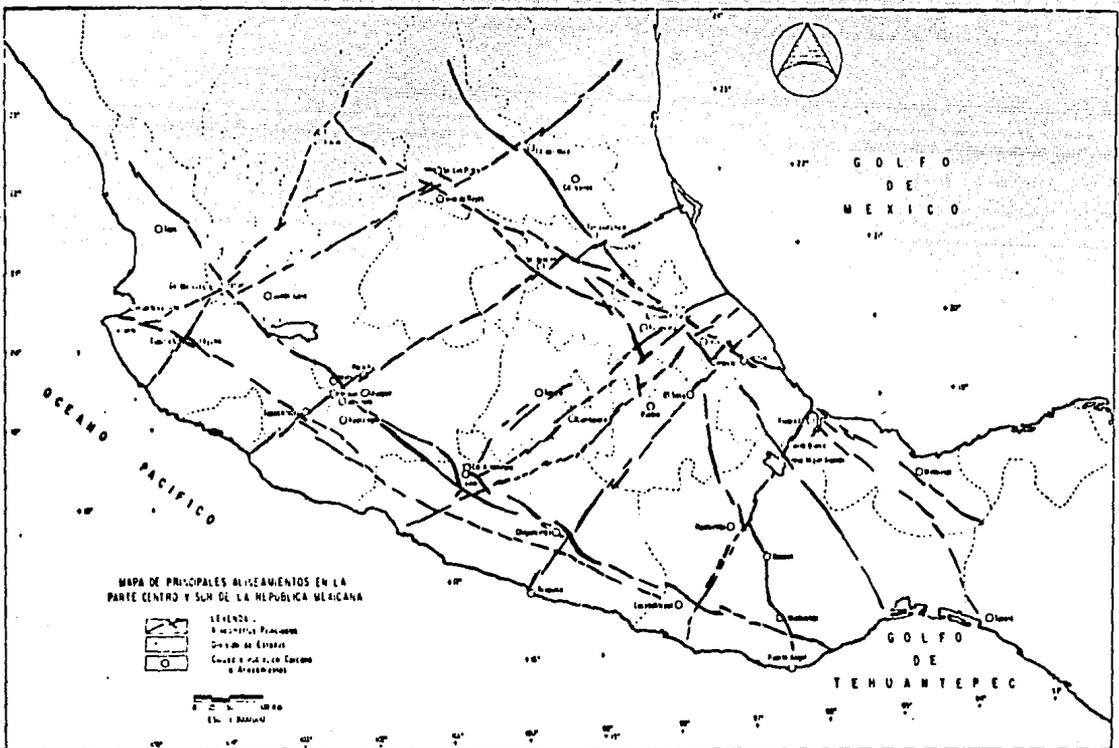


Figura 24. Principales alineamientos de la parte Centro y Sur de la República Mexicana. Tomado de Galván (1980).

En la parte E la actividad fué mayor, debida a un apéndice de sección horizontal circular, y se formó el rasgo circular de Araró, en la parte E de la Laguna de Cuitzeo. El empuje del intrusivo produjo después el levantamiento de la parte S del lago, dando lugar al valle aluvial que actualmente se observa y a las estructuras de la ribera S de la laguna actual. La última efusión fué de basalto y ocurrió en el Cuaternario. En la actualidad se tienen manifestaciones termales en la línea Morelia-Queréndaro, es decir, a lo largo de la falla principal, y en las riberas Sur y Este de la Laguna de Cuitzeo.

En el área E, zona de Los Azufres, la forma del rasgo indica que el cuerpo intrusivo tiene una sección horizontal circular. Las fallas concéntricas debieron haber ocurrido cuando la roca falló ante la tensión a que estaba sujeta por el arqueamiento de la superficie, Figura 22. A lo largo de estas fallas se manifiesta el primer vulcanismo periférico. Después se formó el colapso central acompañado de intensa actividad volcánica. El ascenso del magma produce tan altas presiones radiales al conducto por el que pasa, que la roca no resiste y se fractura en la dirección del mayor esfuerzo compresivo horizontal, es decir, en dirección radial. El patrón de fallas radiales se sobrepone entonces al patrón de fallas concéntricas. Una vez obturado el conducto central las alternativas que tiene el vulcanismo para

manifestarse son, primero, las fallas radiales (e.g., Laguna Verde y Agua Caliente), después, las intersecciones de las radiales con las concéntricas (e.g., Los Azufres), y al último, las concéntricas activadas nuevamente (e.g., Marítaro, Cerro del Gallo y el Nopalito).

La actividad volcánica periférica final se concentra en la parte Sur que es la más alta. El graben Cerro San Andrés-Laguna Larga se puede deber a la intrusión de un cuerpo que sigue un proceso similar al que se ha descrito para uno de grandes dimensiones, pero en menor escala. Esto explicaría la presencia del graben y lo activo de sus fallas.

No obstante el esquema descrito, la tectónica de la región continúa evolucionando, pues se tiene el alineamiento Acámbaro-Hidalgo que forma un graben. Si estas fallas son profundas puede ocurrir una reactivación de esta zona de debilidad y emplazarse las primeras intrusiones, diques, que sean la primera parte de un nuevo proceso de intrusión, siendo en este caso un cuerpo alargado en dirección N-S aproximadamente.

RESULTADOS

Mediante el análisis de rasgos lineales en imágenes de satélites y fotografías aéreas se estableció la existencia de dos grandes fosas en la región denominada Cuitzeo-Los Azufres.

La mayor y más antigua tiene una dirección azimutal de 70° y su principal manifestación es el Lago de Cuitzeo. La menor y más joven, contenida dentro de la primera, es una fosa que se denominó Acámbaro-Hidalgo, con dirección azimutal aproximada de 0° ; dentro de ella se encuentran las manifestaciones termales de Los Azufres y Agua Caliente, cerca de Acámbaro, además de todos los depósitos de caolín reportados en la región. El modelo tectónico más adecuado corresponde al de un intrusivo de grandes dimensiones emplazado durante el terciario o cuaternario y probablemente reactivado por intrusiones cuaternarias de menores dimensiones y en direcciones diferentes a la original. En virtud de la identificación del graben más joven y de la distribución de manantiales y alteraciones hidrotermales en el área, se concluye (McNitt, 1970) que las zonas de mayor potencial geotérmico son las del graben conocida propiamente como Los Azufres, las riberas Sur y Este de la Laguna de Cuitzeo y la región a lo largo de la falla Morelia-Queréndaro.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Los resultados de la aplicación de la metodología expuesta en el Capítulo I consisten de proposiciones sobre

- a) La situación tectónica presente.
- b) El desarrollo tectónico de la región.
- c) La ubicación de zonas de alto potencial geotérmico.

La verificación del estado tectónico presente se puede llevar a cabo con la más alta confiabilidad mediante un programa de barrenamiento de la región en el cual se midan las características del material atravesado. Sin embargo esto no es posible debido al muy alto costo que representa. La alternativa consiste en apoyarse en métodos geofísicos; como métodos eléctricos, gravimetría, magnetometría y sismología; que si bien no producen resultados libres de ambigüedad, en su conjunto ofrecen una alternativa más plausible de ser cierta que la que se tendría considerando el empleo de uno solo.

Los procesos tectónicos sufridos por la región han dejado sus huellas en las rocas de ésta. La proposición sobre el desarrollo tectónico regional se podrá contrastar con los datos provenientes de estudios paleontológicos,

geocronológicos, geomagnéticos, geológicos, gravimétricos, sismológicos y geoquímicos, entre otros. De esta manera se podrá formular un desarrollo más preciso de la génesis de la región.

Las zonas de alto potencial geotérmico propuestas lo serán efectivamente solo cuando se midan, por medio de pozos geotérmicos, las características del subsuelo y éstas indiquen que se tiene un reservorio grande, de alta temperatura, alta presión y susceptible de ser explotado económicamente durante un largo tiempo.

La información geofísica regional que está disponible es muy limitada. Se reduce a gravimetría y sismicidad.

La gravimetría, de Monges y Mena (1973), consiste de 28 estaciones localizadas a lo largo de las carreteras Zitácuaro-Morelia y Morelia-Yuriria. La anomalía de Bouguer calculada para todas las estaciones queda dentro del intervalo de -185 ± 5 miligales y no tiene valores significativamente diferentes de los de la región circundante.

Los sismos sentidos en la región, IGF (1980), se muestran en la tabla VI.

No.	Año	Mes	día	Sentido en / Epicentro
1	1845	4	7	Morelia, Maravatío, Acámbaro.
2	1872	11	9	Acámbaro, Zinapécuaro, Ucareo.
3	1873	1	2	Ucareo, Maravatío, Tepetongo, Jariepo.
4	1873	1	3	Morelia, Maravatío, Acámbaro
5	1874	10	30	Zinapécuaro, Acámbaro.
6	1874	11	19	Zinapécuaro, Acámbaro.
7	1887	11	26	Morelia, Maravatío.
8	1957	6	8	Epicentro en: 19°41', 101°7'; al W de Morelia.
9	1979	2	22,24 26,	Epicentro en: 19.95°, 100.1°; al E de Maravatío.

Tabla VI. Movimientos sísmicos sentidos dentro del Triángulo formado por las ciudades de Morelia, Maravatío y Acámbaro. Extraído de IGF (1980).

No es posible afirmar que los sismos a los que no se les ha determinado su epicentro lo tuvieron en la región; a excepción, tal vez, de 2, 5 y 6. Sin embargo también existe una incertidumbre en la localización del epicentro: de 50 Km, aproximadamente (Ponce, comunicación personal).

Con esta información geofísica el autor considera: que se puede afirmar que la región es activa sísmicamente; en promedio se siente un movimiento cada 15 años; y que no se puede confirmar ni refutar ninguna de las proposiciones so-

bre la tectónica regional expuestas en el capítulo II.

La aplicación de la metodología propuesta en el Capítulo I sobre una región donde es cierta la existencia de manifestaciones termales resultó en la localización de zonas de alto potencial geotérmico.

Entre estas zonas se encuentra "Los Azufres", Michoacán. Aunque esta localidad no fué descubierta originalmente por este método, puesto que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) actualmente lleva a cabo la perforación de pozos geotérmicos que se estima producirán 300 W, aplicando esta metodología, resultó ser de las zonas más prometedoras. Es significativo el hecho de que siguiendo dicha técnica se pueda llegar a la selección de localidades que por otras técnicas han probado ser de alto potencial geotérmico. La localidad de Araró, Michoacán también es considerada por CFE de interés geotérmico y pronto se perforarán pozos exploratorios. En la falla Morelia-Queréndaro si bien se encuentran numerosas alteraciones del suelo debidas a procesos hidrotermales, además de manantiales de agua termal, el autor desconoce, a la fecha, si está sujeta a estudios detallados para la evaluación de su potencial geotérmico.

Aplicaciones similares de la metodología se han llevado a cabo en otras regiones de interés para la Geotermia: Sierra La Primavera-Laguna San Marcos, al SW de Guadalajara,

Jalisco, Mexicali-Isla Gore, Baja California Norte y Sonora y Sierra del Pinacate en Sonora (IGF, 1979, 1980; Del Río, 1979 b,c). En todos los casos se han obtenido resultados que se consideran satisfactorios no obstante el estado preliminar en que se encuentra la metodología.

En el estado aquí presentado del método, cuando se consideran regiones del orden de 5000 Km², se requiere de un tiempo de trabajo técnico de 4 min/Km² aproximadamente. De este tiempo se dedican .43 min/Km² aproximadamente para el reconocimiento físico del campo. Este hecho tiene gran importancia económica pues el costo de un trabajo de campo para reconocer toda la región con el objetivo de indicar cuales localidades serían de mayor interés geotérmico empleando técnicas convencionales tendría un costo mayor tanto de tiempo, como de recursos humanos, físicos y financieros.

Los resultados que se obtienen dependen de la riqueza de la información básica de la que se disponga. Así, por ejemplo, para este método es mejor la fotografía a color que la B y N y son factores sobresalientes la existencia de imágenes Landsat de alta calidad y de mapas geológicos y topográficos. El método sería más efectivo si se sometieran al análisis imágenes de radar, termogramas registrados de día y de noche (como los que produce el satélite HCMM, Heat Capacity Mapping Mission), e imágenes orbitales de alta resolución y cobertura estereoscópica (como las que

producirá el satélite SPOT, programado para 1984).

Si bien aquí se presenta un análisis manual de la información, en la actualidad se trabaja en la implementación de rutinas de computación que realicen partes del procesado de datos y del análisis (IGF, 1980). Esta labor redundará en una mayor efectividad del método y un abatimiento en el costo de una aplicación.

Este procedimiento de trabajo se desarrolló en un principio para su aplicación a la exploración geotérmica, pero es fácilmente adaptable a otros objetivos. Algunos de estos objetivos pueden ser la prospección de algunos minerales, como fierro y cobre o al estudio tectónico de grandes regiones (Del Río et al, 1980).

BIBLIOGRAFIA

1. Adams, John B. 1968. Lunar and Martian Surfaces: Petrologic Significance of Absorption Bands in the Near-Infrared. Science, 159: 1453-1455.
2. Adams, John B., T.B. McCord 1971. Optical Properties of Mineral Separates, Glasses, and Anorthositic Fragments from Apollo mare samples. Proceedings of the Second Lunar Science Conference. Vol. 3, 2183-2195.
3. Adams, John B., T.B. McCord 1972. Electronic Spectra of Piroxenes and Interpretation of Telescopic Spectral Reflectivity Curves of the Moon. Proceedings of the Third Lunar Science Conference. Vol. 3, 3021-3034.
4. Alexander, L. et al. 1974. "Remote Sensing Environmental and Geotechnical Applications: The State of the Art." Dames and Moore Engineering Bulletin, Los Angeles.
5. Allison, I.S. 1949. "Fault Patterns of South-Central Oregon". Geological Society of America Bulletin 60: 1935 (Abstract.).
6. American Society of Photogrammetry, 1960. Manual of Photographic Interpretation. Washington, D.C.
7. Anderson, D.N. and L.H. Axtell (eds.) 1972. Compendium of First Day Papers Presented at the First Conference of the Geothermal Resource Council, El Centro, California.
8. Anderson, E.M., 1951. The Dynamics of Faulting and Dike Formation with Applications to Britain. Oliver and Boyd, Edimburg, Great Britain, 206. pp.
9. Antipova-Karataeva, I.I., Ju. I. Stacheev, L.S. Tarasov, 1972. Reflectance and Absorption Spectra of Apollo 11 and Apollo 12 Samples. Proceedings of the Third Lunar Science Conference. Vol. 3, 3097-3101.
10. Avery, E.T., 1968. Interpretation of Aerial Photographs. Segunda edición. Burgess Publishing Company, Minneapolis, 324 pp.
11. Babcock, E.A., 1971. "Detection of Active Faulting Using Oblique Infrared Aerial Photography in the Imperial Valley, California", Geological Society of America Bulletin, 82, pp. 3189-3196.
12. Baker, R.N., 1975. "Landsat Data: A New Perspective for Geology". Photogrammetric Engineering 41 (10): 1233-1239.

13. Banwell, C.J., 1972. "Geophysical Techniques in Geothermal Exploration". Geothermics. Special Issue 2 (1): 52-57.
14. Barbier, E. and M. Fanelli 1975. "Attempt of Correlating Italian Long Lineaments from Landsat-1 Satellite Images with some Geological Phenomena. Possible Use in Geothermal Energy Research". Proc. NASA Earth Resources Survey Symposium. Houston, Tec., pp. 1079-1086.
15. Barr, D.J. and R.D. Miles, 1970. "SLAR Imagery and Site Selection". Photogrammetric Engineering 36: 1155-1170.
16. Bastuscheck, C.P. 1970. "Ground Temperature and Thermal Infrared". Photogrammetric Engineering 36: 1064-1072.
17. Birdseye, H.S., 1969. "Geothermal Power Resources in the South-west". Bureau of Mines and Mineral Resources, New Mexico. Circular 101: 86-96.
18. Blackwell, D.D. and Czang-go Baag, 1973. "Heat Flow in a 'Blind' Geothermal Area near Marysville, Montana". Geophysics 38 (5): 941-956.
19. Blackwell, D.D. and Czang-go Baag, 1970. "Evaluation of Geothermal Prospects and the Objectives of Geothermal Exploration". Geoexploration 8 (1): 7-17'.
20. Blackwell, D.D. and Czang-go Baag, 1972. "Geothermal Activity in 1971". Ore Bin. 34 (1): 12-14.
21. Brennan, P.A., P.E. Chapman and E.R. Chipp. 1971. Remote Sensing Evaluation of the Klondike Mining District, Nevada Reno: NASA Report 73-14371.
22. Burns, Roger B. 1970. Mineralogical Applications of Crystal Field Theory. Cambridge University Press, Great Britain, 224 pp.
23. California Department of Water Resources. 1974. Water and Power from Geothermal Resources in California: An Overview. The Resources Agency. Bulletin No. 190.
24. Cameron, H.L. 1964. "Radar as a Surveying Instrument in Hydrology and Geology". International Symposium on Remote Sensing of Environment. Third Proceedings: 441-452.
25. Cantrell, J.L. 1964. "IR Geology". Photogrammetric Engineering 30: 916-922, 941.

26. Cassinis, R. 1972. "Remote Sensing" - An Evaluation of its Impact on Earth Science. Geophysical Prospecting, Vol. 20, No. 1, 142-154.
27. Cassinis, R. 1977. Use of Remote Sensing from Space Platforms for Regional Geologic Evaluation and for Planning Ground Exploration. Geophysical Prospecting, Vol. 25, No. 4, pp. 636-657.
28. Cassinis, R., C.M. Marino and A.M. Tonelli. 1970. "Ground and Airborne Thermal Imagery on Italian Volcanic Areas". U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Proceedings, 413-419.
29. CETENAL, 1970. Carta de Climas Querétaro, 14 QIV.
30. CETENAL, 1970. Carta de Climas México, 14 QV.
31. C.F.E. 1977. Manifestaciones termales de la República Mexicana. Departamento de Geotermia, reporte interno.
32. Closs, E. 1955. Experimental Analysis of Fracture Patterns. Bull of the Geol. Soc. of America, 66: 241-256.
33. Colwell, R.N. 1968. "Remote Sensing of Natural Resources." Scientific American 218 (1): 54-69.
34. Crosby, J.W. 1971. "Geothermal Exploration." First NW Conference on Geothermal Power. Olympia, Washington.
35. Dawson, G.B. 1964. The Nature and Assessment of Heat Flow from Hydrothermal Areas. New Zealand Jour. of Geology and Geophysics, 7, 155-171'
36. Del Grande, N.K. 1977. Method for Identifying Anomalous Terrestrial Heat Flows. United States Patent 4 005 289.
37. Del Grande, N.K. 1978. Radiometric and Surface Temperature Mapping. Enviado a publicación, Jour. Geophys. Res., 54 pp. (Lawrence Livermore Lab. Preprint URCL-B2001).
38. Del Río L., León. 1974. Relación entre Bandas Espectrales empleadas en Percepción Remota y la Porción NW del Eje Volcánico. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 84 pp.
39. Del Río L. León. 1979a. Algunas características de Manantiales termales en el W del Eje Volcánico y el N. de Baja California. Instituto de Geofísica, reporte interno inédito.

40. Del Río L., León. 1979b. Percepción Remota aplicada a Geotermia: Oeste del Lago de Chapala. II Seminario Internacional sobre el Uso de los Sensores Remotos, memorias, México, 130-148.
41. Del Río L., León. 1979c. Tectónica de Baja California Norte: Implicaciones Geotérmicas. Resumen. II Seminario Internacional sobre el Uso de los Sensores Remotos, Memorias, México, 149.
42. Del Río L., León, N. Galván, R. Alvarez, 1980. Interpretación tectónica de los Principales Alineamientos en el Centro de México. En preparación.
43. Delwig, L.F., H.C. Mac Donald and J. Norman Kirk, 1968. "The Potential of Radar in Geological Exploration." International Symposium on Remote Sensing of Environment, Fifth Proceedings: 747-763.
44. Demont, Alain. 1978. Características del Eje Volcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. Instituto de Geología, UNAM, Revista Vol. 2, No. 2, 172-187.
45. Denton, J.C. (ed.). 1972. Geothermal Energy, Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
46. DETENAL. 1978. Carta Geológica Cuitzeo E14A13.
47. DETENAL. 1977. Carta Topográfica 1:250 000, Morelia E14-1.
48. DETENAL. 1977. Carta Topográfica 1:250 000, Querétaro F14-10.
49. Duffield, W.A. and R.O. Fournier. 1974. Reconnaissance Study of the Geothermal Resources of Modoc County, California, Menlo Park: U.S.G.S. Open File Report.
50. Ellyett, C.D. and A.W. Fleming. 1974. Thermal Infrared Imagery of the Burning Mountain Coal Fire. Remote Sensing of Environment 3, pp. 79-86.
51. El Shazly, E.M., M.A. Abdel-Hady, and M.A. Morsy. 1974. Geologic Interpretation of Infrared Thermal Images in Cast Quatrani Area, Western Desert, Egypt. Proc. 9th Int'l. Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol. 3. 1877-1889, Ann Arbor, Mich.
52. Estes, J.E. 1966. "Some Geographic Applications of Aerial Infrared Imagery." International Symposium on Remote Sensing of Environment, Fourth Proceedings: 173-181.

53. Estes, J.E. and L.W. Senger. 1974. Remote Sensing: Techniques for Environmental Analysis. Santa Barbara: Hamilton Publishing Co.
54. Facca, G. 1971. "The Status of World Geothermal Development." Geothermics. Special Issue 2:8-23.
55. Fischer, W.A., W.R. Hemphill and A. Kover. 1976. Progress in Remote Sensing (1972-1976). Photogrammetria, 32, 33-72.
56. Fischer, W.A., R.M. Moxham, F. Polcyn and G.H. Landis. 1964. Infrared Surveys of Hawaiian Volcanoes. Science, 146, 733-742.
57. Freden, S.C. and E.P. Mercanti, 1973. Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1. Vol. I. Washington, D.C.: N.A.S.A.
58. Friedman, J.D., R.S. Williams, G. Palmason and C.D. Miller. 1969. Infrared Surveys in Iceland - Preliminary Report. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 650-C, 89-105.
59. Friedman, J.D., D.G. Frank, D. Preble, and E.J. Painter. 1973. "Thermal Surveillance of Cascade Range Volcanoes Using ERTS-1 Multispectral Scanner, Aircraft Imaging Systems, and Ground-Based Data Communication Platforms." Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Technology Satellite-1, Vol.1:1549-1560.
60. Friedman, J.D. and R.S. Williams. 1968. "Infrared Sensing of Active Geologic Processes." International Symposium on Remote Sensing of Environment, Fifth Proceedings: 787-815.
61. Fu, K.S. 1974. Syntactic Methods in Pattern Recognition. Academic Press, New York, 295 pp.
62. Fu, K.S. (editor) 1976. Digital Pattern Recognition. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 203 pp.
63. Fu, K.S. (editor) 1977. Syntactic Pattern Recognition Application. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 270 pp.
- 64 Galván L., Norma. 1980. Principales Alineamientos en el Centro de México. Tesis Profesional en preparación, Facultad de Ciencias, UNAM, México.

65. García, E. 1964. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koppen para adaptarlo a las Condiciones Particulares de la República Mexicana. Offset Larios, México.
66. Goetz, A.F.H. et al. 1973. "Preliminary Geologic Investigations in the Colorado Plateau Using Enhanced ERTS-1 Images." Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Technology Satellite-1. Vol. 1:403-411.
67. Gogel, Jean. 1976. Geothermics. McGraw-Hill International Series in the Earth and Planetary Sciences. McGraw-Hill Book Company, New York, 200 pp.
68. Gómez-Valle, R., J.D. Friedman, S.J. Gawarecki and C.J. Banwell, 1970. Photogeologic and Thermal Infrared Reconnaissance Surveys of the Los Negritos-Ixtlán de Los Hervores Geothermal Area, Michoacán, México. Geothermics, Special Issue, pp. 381-398.
69. Grossling, B.F. 1969. Color Mimicry in Geology and Geophysics. Geophysics 34, 2, pp. 249-254.
70. Guerra P., Felipe. 1959. Las Doce Reglas de la Interpretación Fotogeológica y las Bases de que se derivan. Consejo de Recursos Naturales no Renovables. México.
71. Hafner, W. 1951. Stress Distributions and Faulting. Bull of the Geol. Soc. of America. 62:373-398.
72. Harris, E.E., C.O. Woodbridge and L. Casper. 1964. "Terraine Mapping by Use of IR Radiation." Photogrammetric Engineering 30:134-139.
73. Harthill, N. 1971. "Geophysical Prospecting for Geothermal Energy." Mines Magazine 60 (6): 13-18.
74. Hase, H. 1971. "Surface Heat-Flow Studies for Remote Sensing of Geothermal Resources." Japanese Society for Photogrammetry Journal 10(3):9-17.
75. Hase, H., K. Matsuno, and K. Nishimura. 1975. Geothermal Survey Using Thermal Infrared Remote Sensing in Japan. Proc. 10th Int. Symp. Rem. Sens. Env., 995-1000.
76. Healy, J. 1970. "Pre-Investigation Geological Appraisal of Geothermal Fields." U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources. Proceedings: 571-577.

77. Heiken, G. 1976. Depressions Surrounding Volcanic Fields: A Reflection of Underlying Batholiths? Geology, 4, 568-572.
78. Hochstein, M.P. and D.J. Dickinson. 1970. Infra-Red Remote Sensing of Thermal Ground in the Taupo Region, New Zealand. Geothermics, Special Issue 2, pp. 420-423.
79. Hodder, D.T. 1970. "Application of Remote Sensing to Geothermal Prospecting." U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Proceedings: 368-380.
80. Hodder, D.T., R.C. Martin, A. Calamai, and R. Cataldi. 1973. Remote Sensing of Italian Geothermal Steam Fields by Infrared Scanning. First Pan-American Symp. on Remote Sensing.
81. Hodler, T.W. 1977. Remote Sensing Applications in Hydro-Geothermal Exploration of the Northern Basin and Range Province. Ph. D. Thesis, Oregon State University, 220 pp.
82. Hoppin, R.A. 1973. "Structural Interpretations on ERTS-1 Imagery, Bighorn Region, Wyoming-Montana." Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Technology Satellite-1: 531-538.
83. Hubbert, M.K. 1951. Mechanical Basis for Certain Familiar Geologic Structures. Bull of the Geol. Soc. of America 62: 355-372.
84. Hunt, G.R. 1977. Spectral Signatures of Particulate Minerals in the Visible and near IR. Geophysics, 42, 501-513.
85. Hunt, G.R. and J.W. Salisbury. 1978. Assessment of Landsat Filters for Rock Type Discrimination, Based on Intrinsic Information in Laboratory Spectra. Geophysics, 43, pp. 738-747.
86. IGF. 1980. Movimientos Sentidos en el Estado de Michoacán, México. Reporte Interno Inédito.
87. IGF. 1979, 1980. Percepción Remota en Exploración Geotérmica. Reporte presentado al Instituto de Investigaciones Eléctricas. 1109 pp + figuras.
88. Jaeger, J.C. 1969. Elasticity, Fracture and Flow, with engineering and geological applications. Methuen & Co. LTD. Great Britain, 268 pp.

89. Kahle, A.B. 1977. A simple Thermal Model of the Earth's Surface for Geologic Mapping by Remote Sensing. Jour. Geophys. Res., Vol. 82, No. 11, pp. 1673-1680.
90. Kappelmeyer, O. and R. Haenel. 1974. "Geothermics with Special References to Application" in Geoexploration Monographs, Series 1(4). Berlin: Gebruder Borntraeger. 238 pp.
91. Knepper, Jr., D.H. and R.W. Marrs. 1972. Remote Sensing Aids in Geologic Mapping. Proc. of the VIIIth Int'l. Symp. on Remote Sensing of Environment, Vol. II, pp. 1127-1136, ERIM, Ann Arbor, Michigan.
92. Koenig, J. 1970. "Geothermal Exploration in the Western U.S." Geothermics, Special Issue 2, Vol. 2 (1):1-13.
93. Kruger, P. and C. Otte (eds.). 1973. Geothermal Energy Resources, Production, Stimulation. Stanford; Stanford University Press.
94. Lattman, L.H. 1958. "Techniques of Mapping Geologic Fracture Traces and Lineaments on Aerial Photographs." Photogrammetric Engineering 24:568-576.
95. Lee, K. 1978. Analysis of Thermal Infrared Imagery of The Black Rock Desert Geothermal Area. Colorado School of Mines, Quarterly, 73 (3), 31-43.
96. López R., Ernesto. 1970. Carta Geológica del Estado de Guanajuato. Instituto de Geología, UNAM, México.
97. López R., Ernesto. 1971. Carta Geológica del Estado de Michoacán. Instituto de Geología, UNAM, México.
98. Lyon, R.J.P. and K. Lee. 1970. Remote Sensing in Exploration for Mineral Deposits. Economic Geology, 65, pp. 785-800.
99. Marsh, S.E., R.J.P. Lyon, and F. Honey. 1975. Evaluation of NOAA Satellite Data for Geothermal Reconnaissance Studies Proc. 2nd UN Symp. on Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, Calif. Ed. Lawrence Berkeley Laboratory, pp. 1135-1141.
100. Matsuno, K., H. Hase and K. Nishimura. 1969. "On IR Imagery and Its Applications to Mapping Geothermal Distributions." Phtogrammetria 25 (2/3): 61-74.

101. Mattauer, Maurice. 1976. Las Deformaciones de los Materiales de la Corteza Terrestre. Colección Métodos. Ediciones Omega, Barcelona, 524 pp.
102. McCord, T.B., J.B. Adams, T.V. Johnson. 1970. Asteroid Vesta: Spectral Reflectivity and Compositional Implications. Science 168: 1445-1447.
103. McCord, T.B. T.V. Johnson. 1970. Lunar Spectral Reflectivity (0.030 to 2.50 Microns) and Implications for Remote Mineralogical Analysis. Science 169: 855-857.
104. McLerran J.H. and J.D. Morgan. 1964. "Thermal Mapping of Yellowstone National Park." International Symposium on Remote Sensing of Environment, Third Proceedings:517-531.
105. McNitt, J.R. 1970. "The Geologic Environment of Geothermal Fields as a Guide to Exploration." Geothermics, Special Issue 2:24-31.
106. Missallati, A., A.E. Prelat, and R.J.P. Lyon. 1978. Simultaneous Use of Geologic, Geophysical, and Landsat Digital Data in Uranium Exploration. Remote Sensing of Environment, in press. Elsevier - North Holland, 1978.
107. Monges C., Julio y M. Mena J. 1973. Trabajos Gravimétricos en el Eje Volcánico. Anales del Instituto de Geofísica. Vol. 18-19, 195-208. Instituto de Geofísica, México 1975.
108. Moore, D.G. and V.I. Myers. 1973. "Location of Flowing Artesian Wells and Natural Springs Using Thermal Infrared Imagery." American Society of Photogrammetry Symposium Proceedings: 159-165.
109. Moxham, R.H. 1969. Aerial Infrared Surveys at the Geysers Geothermal Steam Field. U.S.G.S. Professional Paper 650-C.
110. Moxham, R.H. 1970. "Thermal Features at Volcanoes in the Cascade Range, as Observed by Aerial Infrared Surveys." Bulletin Volcanologique 34:77-106.
111. Nalepka, R.F. and J.P. Morgenstern. 1972. Signature Extension Techniques Applied to Multispectral Scanner Data. Proc. of the VIII Int'l. Symposium on Remote Sensing Vol. II, pp. 881-893, ERIM, Ann Arbor, Mich.

112. Nasa, 1972. ERTS DATA USERS HANDBOOK. Goddard Space Flight Center, Greenbelt Maryland.
113. Norman, J.W. 1970. "Linear Geological Features as an Aid to Photogeological Research." Photogrammetrics 25(5/6): 177-187.
114. Odé, Helmer. 1957. Mechanical Analysis of the Dike Pattern of the Spanish Peaks Area, Colorado. Bull of the Geol. Soc. of America 68: 567-576.
115. Offield, T.W., E.A. Abbott, A.R. Gillespie, and S.O. Loguercio. 1977. Structure Mapping on Enhanced Landsat Images of Southern Brazil: Tectonic Control of Mineralization and Speculations on Metallogeny. Geophysics, Vol. 42, pp. 482-500.
116. O'Leary, D.W., and S.L. Simpson. 1977. Remote Sensing Applications to Tectonism and Seismicity in the Northern Part of the Mississippi Embayment. Geophysics 42, 542-548.
117. Olson, Ch. E. Jr. 1973. What is Photographic Interpretation? En: Holz, R.K. (editor). 1973. The Surveillant Science. Houghton-Mifflin, Co.
118. Palmason, G., J.D. Friedman, R.S. Williams, Jr., J. Jonsson and K. Saemundsson. 1970. Aerial Infrared Surveys of Reykjanes and Torfajökull Thermal Areas, Iceland, with a Section on Cost of Exploration Surveys. Geothermics, Special Issue 2, pp. 399-412.
119. Paul, S., J.P. Gilbert, L. Pontier, C. Dechambenroy, and L. Menenger. 1976. A Surface Thermal Anomaly in the Region of Chaudes-Aigues (France) Detected on Aerial Thermographs. Remote Sensing of Environment 5, pp. 177-190.
120. Pratt, D.A., and C.D. Ellyet. 1979. The Thermal Inertia Approach to Mapping of Soil Moisture and Geology. Rem. Sens. Env. 8. 151-168.
121. Pratt, D.A., C.D. Ellyet, E.C. McLaughlan and P. McNabe. 1978. Recent Advances in the Application of Thermal Infrared Scanning to Geological and Hidrological Studies. Remote Sensing of Environment, Vol. 7, pp. 177-184.
122. Preston, G. 1974. Automatic Data Processing for Non-Mathematicians. Proc. 9th. Int'l. Symposium on Remote Sensing of Environment, p. 837, ERIM, Ann Arbor, Mich.

123. Raina, B.N. 1972. The Use of Satellite Photography in Interpretation of Regional Geology. Proc. VIII Int'l. Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol. II, pp. 1213-1237.
124. Reeves, R.G. (ed.). 1975. Manual of Remote Sensing. Falls Church; American Society of Photogrammetry.
125. Robinove, C.J., and H.E. Skibitzke. 1967. An Airborne Multispectral Television System. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 575D, D143-D146.
126. Rosenfeld, Ch. L., and Th. W. Hodler. 1976. "Hydrogeothermal Reconnaissance Utilizing Remote Sensing Techniques." Pacific Northwest Meetings of American Geophysical Union. Proceedings. (Abstract.).
127. Rowan, L.C. 1973. "Near-Infrared Iron Absorption Bands: Applications to Geological Mapping and Mineral Exploration." Fourth Annual Earth Resources Program Review. N.A.S.A. 3:60-1 to 60-12.
128. Rowan, L.C. and P.H. Wetlaufer. 1973. "Structural Geologic Analysis of Nevada Using ERTS-I Images: A Preliminary Report." Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite-I. Vol.1: 412-423.
129. Rowan, L.C., B.H. Wetlaufer, A.F.H. Goetz, F.C. Billingsley, and J.A. Stewart. 1974. Discrimination of Rock Types and Detection of Hydrothermally Altered Areas in South-Central Nevada by the Use of Computer-Enhanced ERTS Images." U.S. Geological Survey Prof. Paper 883, 35 pp., U.S. Government Printing Office, Washington.
130. Rowan, L.C., A.F.H. Goetz, and R.P. Ashley. 1977. Discrimination of Hydrothermally Altered and Unaltered Rocks in Visible and Near Infrared Multispectral Images. Geophysics 42, 522-535.
131. Sabins, F.F. 1967. "Infrared Imagery and Geology Aspects." Photogrammetric Engineering 33:743-750.
132. Sabins, F.F. 1969. "Thermal Infrared Mapping and its Application to Structural Mapping in Southern California." Geologic Society of America Bulletin 80(3):397-404.
133. Salisbury, John W. 1972. Spectroscopic Remote Sensing of Lunar Surface Composition. The Moon 5:332-347.

134. Salisbury, J.W. and G.R. Hunt. 1974. Remote Sensing of Rock Type in the Visible and Near-Infrared. Proc. 9th Int'l. Symposium on Remote Sensing of Environment. Vol. 3, 1953-1958, ERIM, Ann Arbor, Mich.
135. Sandford, A.R. 1959. Analytical and Experimental Study of Simple Geologic Structures. Bull. of the Geol. Soc. of America 70:19-52.
136. Shilin, B.V., N.A. Gusev, E.I. Vavilov and E.J. Karizhenski. 1972. Thermal Activity on the Uson Caldera Based on Infrared and Photographic Aerial Survey. Proc. VIII Int'l. Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol. II, p. 1147.
137. Shlien, S. and A. Smith. 1975. A Rapid Method to Generate Spectral Theme Classification of LANDSAT Imagery. Remote Sensing of Environment, Vol. 4, pp. 67-77.
138. Short, N.M. 1974. Exploration for Fossil and Nuclear Fuels from Orbital Altitudes. En: Veziroglu, T.N. 1975. Remote Sensing, Energy Related Studies. Halsted Press, New York, 491 pp.
139. Strangway, D.W. and R.C. Holmer. 1964. "Infrared Geology". International Symposium on Remote Sensing of Environment, Third Proceedings: 293-319.
140. Summers, W.K. and S.H. Ross. 1971. "Geothermics in North America: Present and future." Earth Science Bulletin 4(1): 7-22.
141. Tapponnier, Paul, P. Molnar. 1979. Active Faulting and Cenozoic Tectonics of the Tien Shan, Mongolia and Baikal Region. Journal of Geophysical Research 84-87:3425-3459.
142. Tchalenko, J.S., N.N. Ambraseys. 1970. Structural Analysis of the Dasht-e Bayaz (Iran) Earthquake Fractures. Geol. Soc. of America Bull., 81:41-60.
143. Thomas, J., J.P. Pedeux and C. Arnaud. 1975. Thermal Infrared Technique Applied to Modern Investigation. Geophysical Prospecting 23, pp. 513-525.
144. United Nations Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources. Proceedings. 1970. Piza, Italy.
145. Vickers, R.S. and R.J.P. Lyon. 1968. Infrared Sensing from Spacecraft: A Geological Interpretation. Thermophysics of Spacecraft and Planetary Bodies, Academic Press, pp.585-607.

146. Vincent, R.K. 1972. Rock Type Discrimination from Ratio Images of Pisgah Crater, California. Technical Report NASA CR-WRL 31650-77-T, Willow Run Laboratory (ERIM).
147. Vincent, R.K. 1973. Geological Remote Sensing in the Thermal Infrared Wavelength Region. Incoherent Optical Technology Summer Course Willow Run Laboratories (ERIM), Ann Arbor, Michigan, pp. 1-20.
148. Vincent, R.K. 1975. The Potential Role of Thermal Infrared Multispectral Scanners in Geological Remote Sensing. Proceedings of the IEEE, 63(1) pp. 137-147.
149. Vincent R.K. and W.W. Pillars. 1974. Skylab S-192 Ratio Codes of Soil Mineral and Rock Spectra for Ratio Image Selection. Proc. 9th. Int'l. Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol. II, p. 875; ERIM, Ann Arbor, Michigan.
150. Vincent, R.K. and F. Thomson. 1972. Spectral Compositional Imaging of Silicate Rocks. Jour. Geophys. Res., 77, 2465-2472.
151. Vincent, R.K., F. Thomson and K. Watson. 1972. Recognition of Exposed Quartz Sand and Sandstone by Two-Channel Infrared Imagery. Jour. Geophys. Res., 77, 2473-2477.
152. Vinogradov, B.V., A.A. Grigoryev, V.B. Lipatov, A.P. Chernenko. 1972. Thermal Structure of the Sand Desert from the Data of IR Photography. Proc. of the VIII Int'l. Symposium on Remote Sensing Vol. 1, pp. 729-737. Ann Arbor, Michigan.
153. Vinogradov, B.V., A.A. Grigoryev, V.B. Lipatov, A.P. Chernenko. 1967. Geologic Evaluation of Infrared Imagery of Highly Faulted Volcanic Terrain in Southeast Oregon. N.A.S.A. Technical Letter-77. Earth Resources Survey Program. Interagency Report.
154. Wallace, R.E. and R.M. Moxham. 1967. Use of Infrared Imagery in Study of the San Andreas Fault System, California. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 575 D, pp. 147-156.
155. Wallace, R.E. and R.M. Moxham. 1965. Thermal Springs of the United States and Other Countries of the World. - A Summary. U.S.G.S. Professional Paper 492.
156. Watson, K. 1974. "Geothermal Reconnaissance from Quantitative Analysis of Thermal Infrared Images". International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ninth Proceedings: 1919-1932.

157. Watson, K. 1975. "Geologic Applications of Thermal Infrared Images", IEEE, Proceedings 63(1): 128-137.
158. Williams, D.L. 1976. Submarine Geothermal Resources. J. of Volcanology & Geothermal Res. 1, pp. 85-100.
159. Williams, Jr., R.S. and D. Fernandopulle. 1972 Geological Analysis of Aerial Photography of the Canary Islands, Spain. Proc. of the VIIIth Int'l Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol.II, ERIM, Ann Arbor, Michigan, pp. 1159-1194.