

***BUSQUEDA DE ZONAS CON TECTONISMO EXTREMO,
TEORIA Y UNA APLICACION A LA GEOTERMIA:
CALDERA LOS HUMEROS***

L. DEL RIO L.*

(Recibido: 17 de nov., 1981)

(Aceptado: 25 de junio, 1982)

RESUMEN

Se presenta un método que analiza estadísticamente algunos de los elementos que componen la tectónica de una región, se formula una definición cuantitativa de alineamiento de objetos y se hace una aplicación a la geotermia. El objetivo de este método es señalar los principales sistemas de fracturamiento, las características del vulcanismo en una región, y poder indicar las partes de la misma en las cuales los procesos tectónicos han tenido una intensidad significativamente mayor, o menor, que la común en la misma. Todo ello tratado de manera cuantitativa.

La región estudiada en la aplicación está limitada por los meridianos 96° y 99°0 y los paralelos 18° y 21° N. Está localizada en la parte este de la Faja Volcánica Transmexicana y la corta la Sierra Madre Oriental.

En dos aplicaciones sucesivas del método, se encontró que las zonas de 78 km², con tectonismo intenso son, la correspondiente a los domos Las Derrumbadas y, con tectonismo singularmente intenso, las zonas aledañas al poblado Los Humeros y al Cerro Xalapazco, ambas en la parte centro-sur de la Caldera.

* *Instituto de Geofísica, UNAM, Mexico, 04510, D. F.*

ABSTRACT

A method which statistically analyzes some of the regional tectonic elements is presented. A quantitative definition of object alignment is given in an application to geothermics.

The objective is to indicate the principal fracture systems, the vulcanism characteristics of the region and to delimitate those parts of a region in which the tectonic processes have been the most, or least, intense. The entire selection procedure is treated in a quantitative way.

The example region is limited by the meridians 96° and 99°W and by the parallels 18 and 21°N . It is localized on the East part of the Mexican Volcanic Belt and is cut by the Sierra Madre Oriental.

Two successive applications of the method resulted in zones, 78 km^2 , with singularly intense tectonism, in the Center-South of Los Humeros Caldera and with high tectonism on Las Derrumbadas domes.

INTRODUCCION

En diversos campos de la exploración geofísica es necesario determinar las partes de una región que tienen el tectonismo más o menos intenso y la relación de la tectónica local respecto de la regional.

Sin embargo, para realizar este proceso, se requiere de un procedimiento para evaluar la información y realizar la selección, de tal manera que su dependencia respecto del sujeto que la realiza, sea pequeña o nula.

Este trabajo tiene como objetivo establecer un método para describir cuantitativamente la distribución del vulcanismo y fracturamiento de una región, e indicar aquellas zonas que presenten un tectonismo extremo, ya sea intenso o débil, además de presentar una aplicación a la geotermia.

El método descrito y aplicado aquí, es fruto de estudios realizados sobre zonas mexicanas de alto potencial geotérmico, algunas de ellas ahora en producción, y en regiones extensas para determinar el emplazamiento geológico óptimo de reactores nucleares. Actualmente la metodología se encuentra parcialmente implementada en forma de programas de computación.

METODO

El problema consiste en dos partes principales : la selección y cuantificación de los parámetros a considerar, y la evaluación de dicha información; por tanto el método consta de dos partes:

- 1) Análisis de imágenes Landsat, cartas topográficas, geológicas y climáticas de la región, inicialmente a una escala pequeña, como 1:1 000 000.
- 2) Interpretación, cuantificación y selección.

De las imágenes se anotan los rasgos lineales que corresponden a fallas, ejes de pliegues y tipo de los mismos, centros eruptivos, principales cuerpos de agua y ríos. Se elaboran histogramas o diagramas de rosas de fracturamiento y de alineamientos volcánicos. Los mapas se examinan para extraer alineamientos y límites de posibles bloques.

La región se divide en zonas y de cada una de ellas se obtiene:

- 1) geología superficial
- 2) intensidad de fracturamiento
- 3) intensidad del fracturamiento regional
- 4) diversidad de fracturamiento
- 5) cantidad de centros eruptivos
- 6) cantidad de calderas y domos

La geología superficial es un elemento difícilmente representable por medio de números, por lo que se considera como un parámetro de calidad en cuanto a la intensidad del tectonismo.

La intensidad del fracturamiento se puede estimar indirectamente por medio de los kilómetros lineales de fracturamiento medidos en la zona. Los datos de fracturamiento de todas las zonas se pueden combinar entre sí, para formar un histograma de fracturamiento de toda la región, de esta manera se puede determinar la dirección de cada uno de los principales sistemas de fracturamiento regional. La intensidad de los fracturamientos regionales en una zona se hace presente por medio de la magnitud de éstos en el histograma de la zona. La diversidad se hace patente a través de la cantidad de máximos relativos, o picos, presentes en el histograma.

Una medida de la diferencia en el patrón de fracturamiento entre dos áreas puede ser lo que aquí se llama diferencia media de fracturamiento. Esta diferencia se ob-

tiene de considerar el conjunto de datos de fracturamiento de un área como un vector de 18 componentes; pues aquí sólo se consideran 18 intervalos de direcciones de fracturamiento, normalizado a 100 respecto de la dirección con mayor longitud medida en el área. A este vector se le resta el correspondiente a la otra área, se toma el valor absoluto de las componentes de este vector diferencia y se calcula el promedio de éstas. Este resultado es un número entre 0 y 100, que indica la diferencia media por intervalo de dirección, en el patrón de fracturamiento de dos áreas. Este número puede emplearse para definir las subregiones con fracturamiento similar o diferente.

El mecanismo para asignar un número al conjunto de características de un área requiere de: buscar el valor máximo para cada parámetro en el conjunto de los datos de las áreas, normalizar respecto de él los valores de la colección, considerando en el proceso de normalización la extensión de cada área. Con la serie de datos normalizados se procede a calcular el promedio para cada área considerando con igual peso cada concepto.

La calificación final se encuentra al calcular el valor medio y la desviación estándar que tiene la colectanea de promedios de las áreas.

Si un valor está comprendido en el intervalo de una desviación estándar alrededor de la media, entonces se dirá que el valor es típico. Si está comprendido en el intervalo de una a dos desviaciones estándar alrededor de la media, entonces se dirá que es un valor significativamente mayor o menor (según sea el caso) que la media. Si el valor está fuera del intervalo de dos desviaciones estándar alrededor de la media entonces se dirá que el valor es singularmente mayor o menor (según sea el caso) que la media.

La aplicación repetida de esta metodología sobre áreas atípicas en una primera aproximación, dará por resultado la determinación de zonas relativamente pequeñas con tectonismo extremo, intenso o débil, en toda la región, o bien, aplicada sobre cualquier zona, la caracterizará en términos de lo observado en la región.

ALINEAMIENTO DE ESTRUCTURAS VOLCANICAS

Algunas veces, durante el estudio de campos volcánicos se observan agrupamientos de centros eruptivos que parecen seguir una dirección definida. Esta disposición se suele calificar como un *alineamiento*.

Sin embargo, este adjetivo, si depende del observador que lo realiza, entonces es cualitativo. Para eliminar esta ambigüedad, se propone seguir un criterio cuantita-

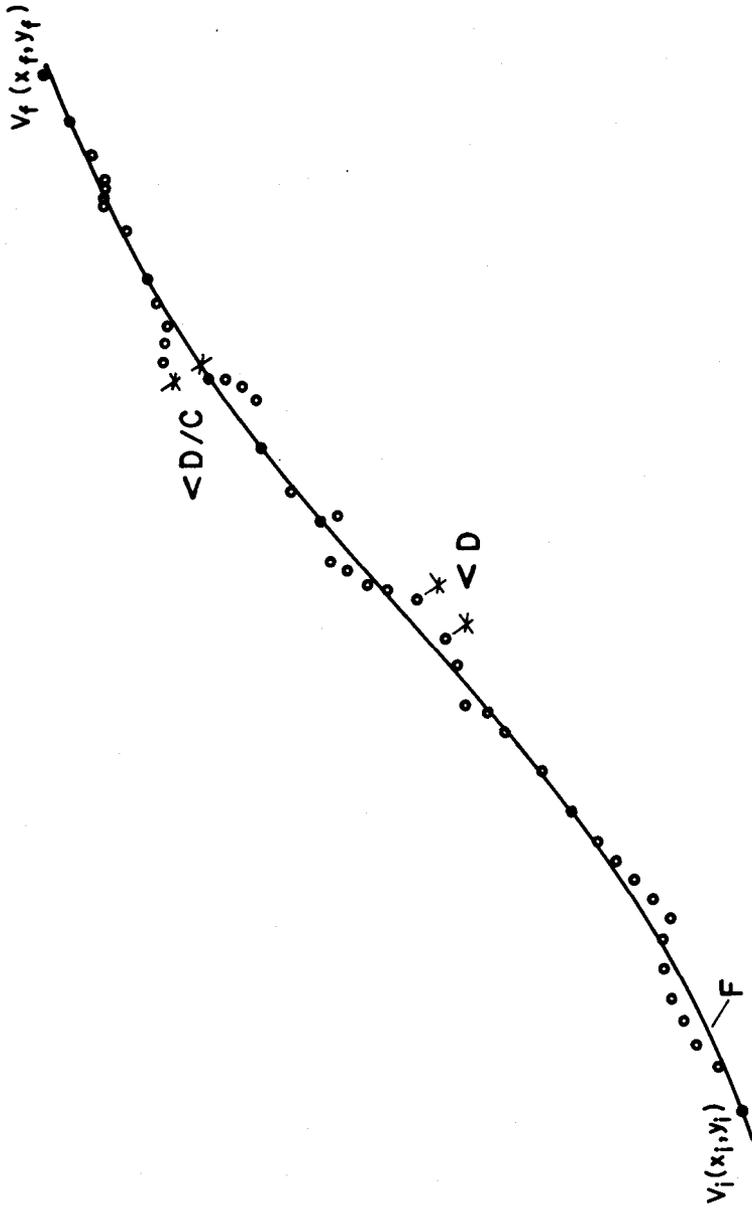


Fig. 1. Definición de alineamiento de edificios volcánicos.

tivo para fijar los parámetros empleados y así calificar un agrupamiento como alineamiento. Para definir con toda precisión un alineamiento es necesario indicar su longitud, ancho, trayectoria y posición.

Los factores que intervienen para definirlo son: en longitud, la separación máxima entre elementos vecinos, pertenecientes al alineamiento; en ancho y trayectoria, la distancia máxima de elementos del alineamiento al trazo del mismo y, en posición, la posición geográfica de los elementos que determinan el trazo del alineamiento.

La consideración de estos factores da lugar a la siguiente definición:

Un conjunto A es un alineamiento de objetos V, descrito por la función F si, y sólo si: para todo objeto V_i que pertenezca a A, existe al menos otro objeto V_j también en A, tal que la distancia entre ambos es menor que D y la distancia de V_i al trazo del alineamiento descrito por la función F, es menor que D/C , donde C es un número positivo (figura 1).

Así por ejemplo, edificios volcánicos $V_i(x_i, y_i)$, separados menos de 200 m del trazo de un alineamiento en línea recta y con una distancia entre vecinos menor que 1 500 m, resultaría en:

$$D = 1\,500 \text{ m}$$

$$C = 7.5 (= 1500/200)$$

$$F(x) = a_0 + a_1 x, \text{ donde}$$

$$a_0 = \frac{\sum (x_i - x) (y_i - y)}{(x_i - x)^2}$$

$$a_1 = y - a_0 x$$

$$x \in (x_i, x_f)$$

COMENTARIOS

Aplicaciones inmediatas de esta metodología se pueden dar, entre otros campos, en la selección de zonas de alto potencial geotérmico; donde se busca vulcanismo reciente, de tipo ácido, preferentemente, tectonismo intenso y alteraciones en suelo y vegetación, o en la determinación del emplazamiento de reactores nucleares; se busca, en este caso, vulcanismo y tectonismo bajos o antiguos, además de la búsqueda de minerales.

La consideración de una mayor cantidad de factores en la descripción cuantitativa de una región dará por resultado selecciones más fundamentadas, en cuanto a agentes considerados y evaluados, por tanto, de mayor confiabilidad.

La dependencia de los resultados respecto de los sujetos que intervienen en su obtención será relativamente baja si el examen de las fotografías, imágenes, mapas, etcétera, lo realiza en cada caso una sola persona. El cumplimiento de esta condición deviene en productos con un nivel homogéneo de reconocimiento.

La sistematización del proceso de análisis de zonas para un objetivo determinado y su implementación en un procedimiento de selección cuantitativo resulta en menores requerimientos de tiempo y de personal altamente especializado.

APLICACION A LA GEOTERMIA: CALDERA LOS HUMEROS, PUEBLA

La mayor parte de los campos geotérmicos que se explotan económicamente están próximos a manifestaciones termales (Kappelmeyer y Haenel, 1974) y ocurren en áreas de vulcanismo cuaternario en zonas intensamente fracturadas (McNitt, 1970). Un examen detallado de su entorno resulta en que, por lo común, la zona productora se encuentra a menos de 5 km de un centro eruptivo.

Sin embargo, los campos geotérmicos no son comparables entre sí, en cuanto a la intensidad de las manifestaciones termales observadas en la superficie; tipo y extensión; actividad del vulcanismo cuaternario y densidad del fracturamiento. Por lo tanto, de la comparación entre ellas no ha surgido alguna regla general que permita seleccionar zonas de alto potencial geotérmico, sin antes realizar exploraciones geológicas y geofísicas regionales y en detalle. Según el autor, el camino alternativo consiste en examinar extensas regiones para evaluar zonas bajo normas cuyo valor se establece para la región, de manera que se seleccione la mejor zona, dadas las características de la región considerada.

Aquí se usarán términos como región, área, zona y localidad, éstos se emplearán de tal manera que la extensión abarcada cada vez es menor y está contenida en la del término precedente. Las direcciones se darán en azimut.

La metodología expuesta en este trabajo se aplicará dos veces sobre las áreas y zonas con tectonismo y vulcanismo más intenso. En la primera aplicación se trabajará sobre fuentes de información en pequeña escala, con actividades consistentes en la interpretación de imágenes de satélite, anotando únicamente los rasgos lineales de expresión topográfica con una longitud mínima de 5 km, centros eruptivos (CE) y los principales cuerpos de agua y ríos, además del examen de mapas topográficos, geológicos y climáticos de la región, todo esto a escalas de 1:1 000 000 o de 1:500 000.

En la segunda aplicación las principales actividades serán el análisis de fotografías aéreas verticales, en una escala aproximada de 1:50 000, anotando únicamente los rasgos lineales susceptibles de interpretarse como fallas o fracturas, con una longitud mínima de 300 m, alteraciones del suelo, posiblemente relacionadas con actividad hidrotermal, cuerpos de agua, vías de comunicación y poblados, además de los mapas topográficos, geológicos y climáticos en gran escala de que se disponga.

La región está limitada por los paralelos 18° y 21°N y los meridianos 96° y 99°O. Dentro de ella están como las ciudades más importantes: Jalapa, Pachuca, Puebla, Tlaxcala y Veracruz. La extensión es de 90 000 km² aproximadamente, ocupa el extremo E de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) y es atravesada por la Sierra Madre Oriental (SMO).

RESULTADOS

Primera Aplicación

En la Figura 2 se muestra la interpretación reducida de las imágenes Landsat en escala 1:1 000 000 que cubren la región. En esta figura sólo aparecen los rasgos lineales, CE, ríos principales y las áreas en que se dividió la región.

En la Tabla 1 se tienen los datos de los rasgos lineales que aparecen en la figura 2, con los cuales se construyó el diagrama de rosas de la figura 3.

Del examen de la figura 3 o de la Tabla 1 se desprende que las direcciones en las cuales la magnitud del fracturamiento es superior a la longitud media por intervalo, o sea, las direcciones de los principales sistemas de fracturamiento, son: $65 \pm 15^\circ$ con una longitud normalizada de 82.46, $35 \pm 5^\circ$ con 57.54, $165 \pm 5^\circ$ con 52.51 y $135 \pm 15^\circ$ con 47.97.

En la Tabla 2 se presentan las direcciones en las cuales se tienen picos en los diagramas de rosas de las 13 áreas en que se dividió la región. Del total de las áreas en sólo tres direcciones se tiene una frecuencia de picos significativamente mayor que la media, y de éstas, dos son vecinas; resulta entonces que hay dos direcciones de mayor frecuencia de picos: $70 \pm 10^\circ$ y $175 \pm 5^\circ$.

Este resultado indica que el sistema en dirección $70 \pm 10^\circ$, además de contar con la mayor longitud medida, y significativamente mayor que la media, se presenta en mayor extensión que cualquier otro, o sea, en las 13 áreas. El segundo lugar lo ocupa la dirección $175 \pm 5^\circ$ que se presenta sólo en 7 áreas. La dirección $35 \pm 5^\circ$ sólo se presenta en 5 áreas al igual que la $125 \pm 5^\circ$, pero esa ocurrencia ya está dentro de la típica.

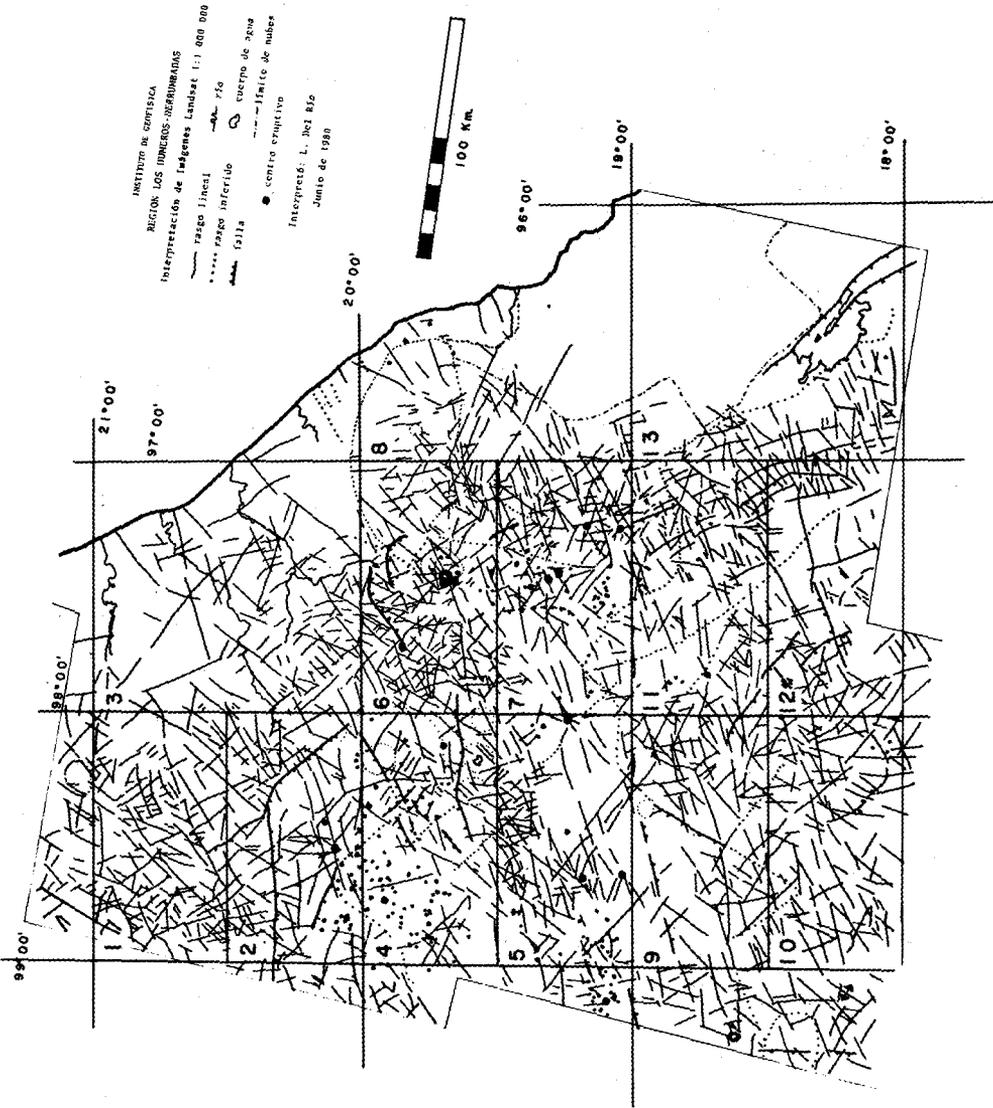


Fig. 2. Interpretación de las imágenes Landsat que cubren la región y las áreas en que se dividió para su estudio.

Tabla 1. Dirección media de los intervalos, longitud medida y valor normalizado de los rasgos lineales registrados en la Fig. 2.

Azimut ($^{\circ}$)	km medidos	Longitud normalizada	Azimut	Medidos	Normalizado
5	365	20.39	95	276	15.42
15	323	18.04	105	504	28.16
25	766	42.79	115	542	30.28
35	1030	57.54	125	915	51.12
45	876	48.94	135	810	45.25
55	1078	60.22	145	824	46.03
65	1790	100.00	155	586	32.74
75	1564	87.37	165	940	52.51
85	787	43.97	175	704	39.33

Longitud total medida: 14 680 km

Promedio por intervalo: 815.6 km

Promedio por intervalo normalizado: 45.56

Desviación estándar normalizada: 21.98

Tabla 2. Direcciones en que se observan picos en los diagramas de rosas de las áreas de la región.

Zona	Azimut de los picos																Total		
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155		165	175
1	***				***		***				***				***				5
2	***			***			***								***		***		5
3				***			***			***					***		***		5
4				***			***						***					***	4
5							***							***				***	3
6				***			***			***				***				***	5
7				***			***						***					***	4
8			***			***	***					***						***	5
9				***		***	***				***		***					***	5
10			***			***	***				***			***				***	5
11		***			***	***	***		***		***		***			***		***	7
12	***					***	***						***				***	***	4
13		***					***						***		***		***	***	5
Total	3	2	2	5	3	1	6	7	1	1	4	2	5	4	4	1	4	7	

Frecuencia media:

3.44 picos/dirección

Desviación estándar:

2.01 picos/dirección

Frecuencia mínima significativamente mayor que la media:

6 picos/dirección

Si bien el sistema de fracturamiento en dirección $165 \pm 5^\circ$ es aproximadamente 9% menor que el sistema en dirección $35 \pm 5^\circ$, ésta hace un ángulo respecto del Sol (Azimut 113°) de 78° , mientras que el primero es de 52° . Esto significa que en igualdad de condiciones de iluminación, esto es, igualando el efecto de la sombra en el análisis, el sistema en dirección $165 \pm 5^\circ$ podría ser un poco mayor que el sistema en dirección $35 \pm 5^\circ$.

Bajo las consideraciones anteriores los sistemas de fracturamientos más importantes en cuanto a longitud medida y extensión abarcada son, en primer lugar, en dirección $70 \pm 10^\circ$ y en segundo, en $170 \pm 10^\circ$.

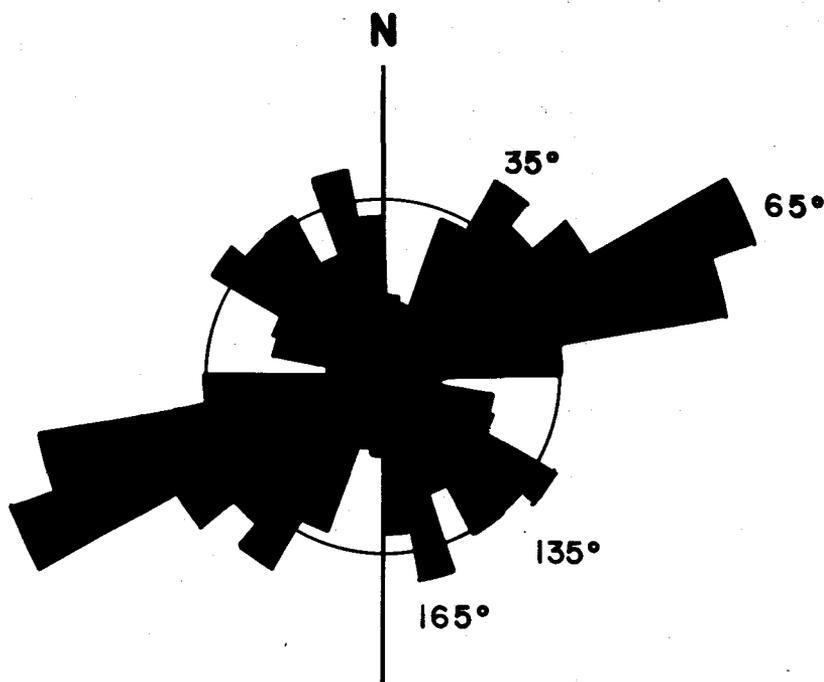


Fig. 3. Diagrama de rosas de los rasgos lineales contenidos en la Fig. 2. El círculo indica la longitud promedio por intervalo: la longitud de la dirección 65° es de 1790 km.

La diferencia promedio entre áreas tiene un valor medio, para los datos de la Tabla 3, de 29.63. Con base en este dato se contó la cantidad de áreas con una diferencia promedio significativamente menor que la media, es decir, menor que 23.30 para cada área. Este número se empleará como parámetro para cuantificar la representatividad respecto del fracturamiento regional al presente en cada área.

Tabla 3. Diferencia promedio de las áreas entre sí.

Zona												
1	1											
2	23.39	2										
3	23.04	25.14	3									
4	29.31	27.98	28.11	4								
5	34.09	21.24	28.26	26.83	5							
6	26.17	22.86	29.65	28.34	21.05	6						
7	41.63	31.07	40.68	31.11	19.79	27.42	7					
8	45.96	37.69	41.51	33.83	27.36	34.11	24.15	8				
9	37.80	26.82	34.06	29.70	15.75	25.44	22.62	25.58	9			
10	34.38	23.32	36.97	31.73	20.00	17.85	22.53	31.31	22.87	10		
11	30.51	27.78	36.86	31.46	25.52	24.60	21.77	32.74	25.88	25.83	11	
12	39.67	25.44	39.70	34.74	26.59	33.11	27.22	37.24	32.26	30.92	27.30	12
13	43.42	30.73	42.51	36.10	29.18	31.17	28.63	33.36	25.80	25.11	30.23	27.10

Diferencia promedio general: 29.63

Desviación estándar: 6.33

En la Tabla 4 se tiene la cantidad contada para cada área.

Tabla 4. Cantidad de áreas cuya diferencia promedio es significativamente menor que la media, es decir, menor que 23.3, respecto a cada área y su valor normalizado.

Area	Cantidad	Valor normalizado	Area	Cantidad	Valor normalizado
1	1	20	8	0	0
2	2	40	9	3	60
3	1	20	10	4	80
4	0	0	11	1	20
5	5	100	12	0	0
6	3	60	13	0	0
7	4	80			

Cantidad promedio 1.85

En las áreas 4 y 6 se observaron estructuras circulares que semejan calderas. En el caso del área 6 se trata de la caldera Los Humeros pero en el área 4 no fue posible verificar si se trata de calderas o no. En el área 7 únicamente se observaron domos: Las Derrumbadas y Cerro Pinto; a esta área se le calificó con 50% del "valor" asignado a las áreas 4 y 6.

En la Tabla 5 se resumen las calificaciones asignadas a cada área en cada concepto y se obtiene la calificación promedio de cada área pesada sobre la extensión que abarca.

Tabla 5. Resumen de las calificaciones de cada área; los factores de normalización (FN) empleados; el promedio de las calificaciones de cada área y la calificación mínima significativamente mayor que la promedio.

Area	km en dirección 70 ± 10°	km en dirección 170 ± 10°	km de fracturamiento	Picos	Areas con dif < 23.3	Edificios volcánicos	Calderas y domos	Promedio sin calderas y domos	Promedio con calderas y domos
1	45.85	48.09	77.35	71.43	20	0	0	52.54	37.14
2	57.04	67.18	73.92	71.43	40	35	0	50.26	43.28
3	51.26	55.73	71.89	71.43	20	0	0	44.55	38.22
4	25.63	54.20	48.45	57.14	0	100	100	46.05	53.98
5	58.84	33.54	60.71	42.86	100	35	0	49.38	42.33
6	100.00	60.31	100.00	71.43	60	16.25	100	67.57	72.27
7	81.23	93.13	79.31	57.14	80	47.50	50	73.29	69.93
8	31.05	65.65	41.09	71.43	0	3.75	0	34.59	29.78
9	64.26	40.46	55.37	71.43	60	6	0	48.17	41.34
10	81.23	58.78	68.41	71.43	80	7.50	0	61.77	52.87
11	76.90	46.56	75.83	100.00	20	16.50	0	54.51	46.93
12	38.99	87.02	47.67	57.14	0	0	0	38.47	32.97
13	37.91	100.00	36.26	71.43	0	2.50	0	41.35	35.44
FN	277	131	1779	7	5	80	Ver texto		

Calificación promedio de las Areas	50.96	45.88
Desviación estándar	11.18	13.23
Mínimo de calificación significativamente mayor que el promedio	62.14	59.11

Los dos criterios de evaluación global, considerando sí y no la presencia de calderas y domos, coinciden en indicar únicamente a las áreas 6 y 7 como áreas cuya calificación es significativamente mayor que la calificación promedio para las áreas de la región considerada.

Las selecciones primarias: áreas 6 y 7 están sobre rocas ígneas cuaternarias. En la primera la estructura más importante es la caldera Los Humeros y la población de Teziutlán, en la segunda son Las Derrumbadas y Ciudad Serdán, respectivamente. En lo sucesivo el área de estudio se llamará de Los Humeros-Las Derrumbadas.

Es importante señalar que el área de la primera selección es alargada de Norte a Sur en coincidencia con la dirección del sistema de fracturamientos de segunda importancia.

Segunda Aplicación

En la figura 4 se muestra una síntesis de parte de la carta Topográfica Veracruz, 14 QVI. En ella sólo se anotaron las líneas para las alturas de 1 000, 2 000, 2 200, 2 400, 2 600 y 3 000 m snm y las poblaciones de mayor importancia.

En esta figura se puede observar que parte de la topografía consiste en 4 alineamientos en direcciones 0° , 45° , 115° y 135° .

El alineamiento N-S o 0° se manifiesta con la línea de los 1 000 m entre Jalapa y Córdoba y en la de los 3 000 m que rodea al Pico de Orizaba o Citlaltépetl.

En dirección 45° se orienta la línea que une los poblados de El Seco al SO y Perote al NE. Estas dos ciudades se relacionan con la línea de los 2 400 m que a su vez limita una depresión que forma una cuenca endorreica ocupada por las lagunas del Carmen al SO y la de Tepeyahualco al NE; fuera del espacio entre ambas ciudades al NE se manifiesta con la línea de los 2 000 m, formando un "espinazo" y hacia el SO con la línea de los 2 200 m.

La cuenca endorreica citada arriba presenta una flexión cerca de su parte media en dirección 115° , se observa su continuación hacia el NO de la cuenca. Este alineamiento se observa también con la línea de los 2 000 pasando por Teziutlán y la de los 1 000 al N de esta ciudad.

El cuarto alineamiento topográfico, 135° , se observa con mayor facilidad si se piensa que cruza por Tehuacán y consta de varias partes paralelas, ya sean altas o bajas.

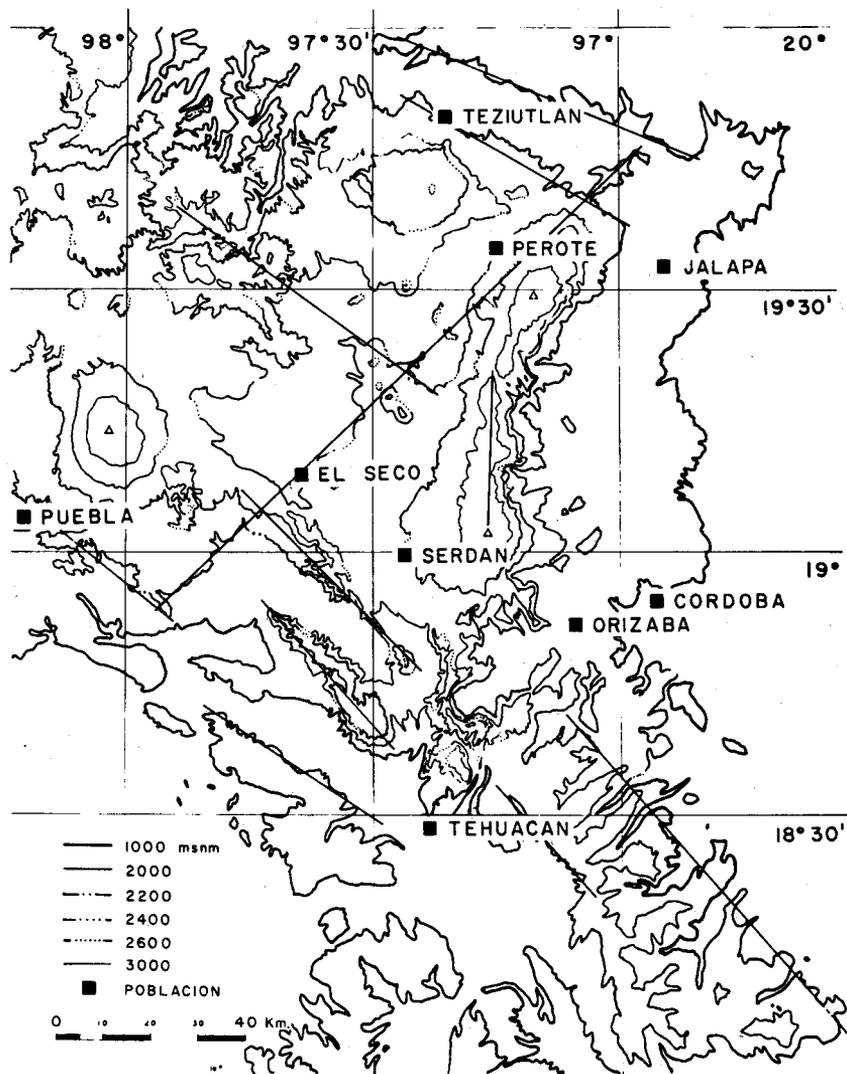


Fig. 4. Topografía sintetizada del área Los Humeros - Las Derrumbadas. Basada en la carta topográfica Veracruz 14 Q-VI y los principales alineamientos.

Estos alineamientos se pueden correlacionar con el mapa geológico de Yáñez García (1980) y resulta que las rocas que constituyen la Sierra de Soltepec, al sur de El Seco, datan del Cretácico Inferior-Medio, con una edad estimada en 100 M.a., siendo calizas de la Formación Orizaba. El alineamiento topográfico en dirección 145° se presenta sobre esta sierra y en la parte NO del área sobre rocas cretácicas y jurásicas.

Las rocas de la Formación Teziutlán son principalmente andesitas y basaltos con una edad estimada en 5 M.a., o sea del Plioceno. Estas rocas siguen la dirección 0° en aproximadamente 30 km, en lo que corresponde al alineamiento en el mismo rumbo en el flanco oeste de la sierra que abarca del Pico de Orizaba al Cofre de Perote, Sierra Negra. Sobre esta formación y otras más recientes se presenta el alineamiento 115° .

El alineamiento 45° se presenta principalmente sobre rocas del cuaternario, consistentes en tobas y material lacustre y sobre materiales de origen ígneo extruidos durante el Pleistoceno con una edad estimada en 1 M.a.

La interpretación de las fotografías aéreas se muestra reducida en la figura 5. En ella aparecen los centros de 23 zonas en las que se dividió el área para realizar diagramas de rosas. Las zonas en las que se obtuvieron éstos, son círculos de 5 km de radio, a excepción de las zonas 11, 13 y 14 en que son de 2 km de radio.

En el área de esta interpretación se contaron 206 edificios volcánicos; en algunos casos se observó que estaban lo suficientemente cercanos como para sospechar una relación entre el vulcanismo y fracturas o fallas no manifiestas en la superficie.

Con base en la definición de alineamiento volcánico que en este trabajo se propone, se consideraron alineamientos volcánicos con $D = 1.5$ km y $C = 7.5$, es decir, CE separados menos de 1.5 km y a menos de 200 m al trazo del alineamiento; en ambos casos las distancias se refieren al cráter.

El resultado de la aplicación se tiene en la Tabla 6 y en la figura 6.

Esta tabla se formó con los datos de 55 alineamientos cuyas direcciones se midieron con una precisión de 1° . La cantidad de CE alineados, bajo el criterio mencionado, es de 143, es decir el 69.42% del total. En el intervalo $73 \pm 10^{\circ}$ se encuentran 59 CE alineados; esto equivale al 41.26% de los edificios alineados, o sea al 28.64% del total de CE y ésta es la dirección principal en que se alinea el vulcanismo. Las direcciones secundarias son: $45 \pm 5^{\circ}$ con 10.43%, $105 \pm 5^{\circ}$ con 9.79% y $165 \pm 5^{\circ}$ con 7.69%.

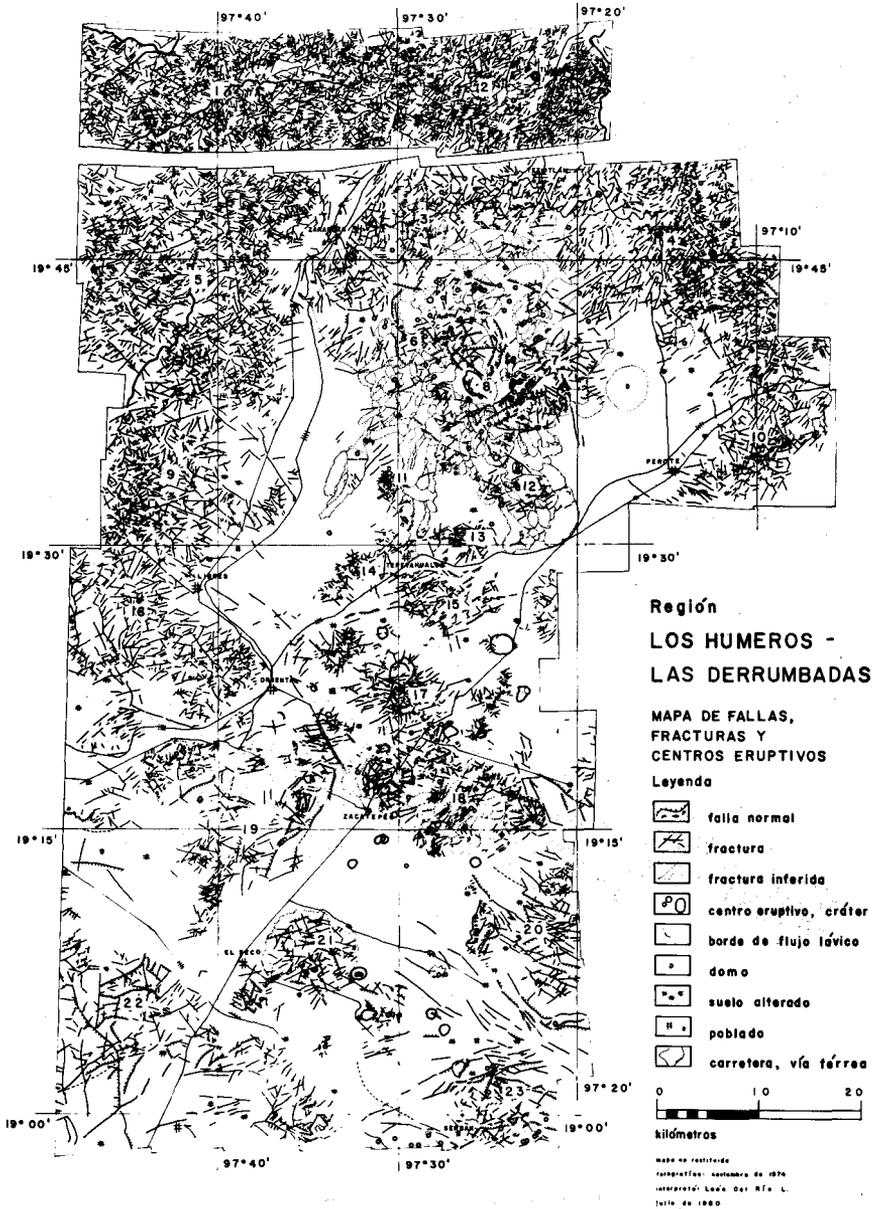
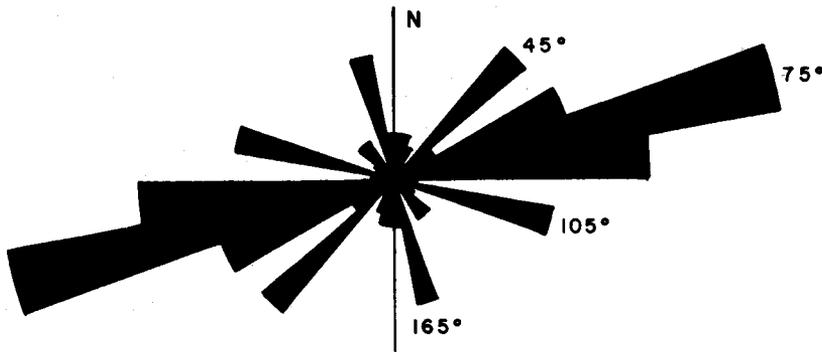


FIGURA 5

Fig. 5. (Mapa Adjunto).

Tabla 6. Dirección de los alineamientos volcánicos observados y la cantidad de CE que los forman para D=1.5 km y C=7.5.

Azimut de los alineamientos volcánicos	No. de EV alineados	No. de grupos	Azimut de los alineamientos volcánicos	No. de EV alineados	No. de grupos
$\pm 5^{\circ}$					
5	4	2	95	2	1
15	4	2	105	14	4
25	3	1	115	0	0
35	0	0	125	2	1
45	15	6	135	4	2
55	4	2	145	4	2
65	16	6	155	0	0
75	34	13	165	11	5
85	22	6	175	4	2



ALINEAMIENTOS VOLCANICOS
DE LA REGION
LOS HUMEROS - LAS DERRUMBADAS
(D=1.5 Km., C=7.5)

Fig. 6. Diagrama de rosas de alineamientos de edificios volcánicos presentes en la figura 5, con D=1.5 km, C=7.5.

Los principales CE del área son la caldera de Los Humeros y los cerros Pizarro, Pinto y Las Derrumbadas.

La caldera de Los Humeros es una estructura redonda, cuyas dimensiones medias son:

radio de base:	12 ± 2 km
radio del cráter:	6 km
altura:	400 m
elevación de la cima:	2 850 m snm
volumen:	110 ± 22 km ³
área:	500 km ²

Al sur de la caldera se levanta el Cerro Pizarro. Este cerro se compone de dos partes, una es un antiguo cráter de explosión y otra un domo de forma cónica que se emplazó a través del conducto central del volcán preexistente.

radio de base:	2 km
altura:	650 m
volumen:	5.45 km ³
área:	12.57 km ²

El Cerro Pinto debe su nombre a los distintos colores de las rocas que lo forman. Consiste en varios cráteres de explosión intruidos por domos, a semejanza del Cerro Pizarro, pero en este caso el ángulo entre las pendientes del edificio base y del domo principal son muy diferentes, formándose un cono montado sobre un cono truncado.

radio de la base del cono truncado:	3.75 km
radio de la cima del cono truncado:	2.38 km
altura del cono truncado:	100 m
altura del cono cónico:	600 m
volumen del cono truncado:	3 km ³
volumen del cono cónico:	8.47 km ³
volumen total:	11.47 km ³
área:	44.18 km ²

Las Derrumbadas son dos domos esencialmente cónicos, cuyas bases están en contacto y sus cimas están alineadas NO-SE en dirección 151°.

Derrumbada NO

radio de la base:	2.35 km
altura:	870 m
volumen:	11.82 km ³
área:	17.35 km ²

Derrumbada SE

radio de la base:	2.35 km
altura:	930 m
volumen:	12.64 km ³
área:	17.35 km ²

estas cifras se refieren a dimensiones conservadoras tal como se observan, sin corregir por el efecto de la erosión sobre las estructuras. La litología del área está descrita detalladamente en el trabajo de Yáñez (1980), por lo que aquí no se reseñará.

Dentro de un perímetro de 3 km hacia el exterior de lo que se cree es el borde de la caldera de Los Humeros se presentan alineamientos de CE que parecen dirigirse radialmente a ella. El centro geométrico C desde donde parecen radiar, se localizó empleando mínimos cuadrados, en 19°25.2'N, 97°39.5'O ± 500 m, este punto se ubica en la figura 5 al NE del centro de la zona 8.

Para los 86 CE situados dentro del mismo perímetro se fijó un sistema de referencia cartesiano para asignar a cada uno un par de coordenadas; con el conjunto de pares ordenados se calculó, también empleando mínimos cuadrados, la cónica que mejor se ajusta al conjunto. El resultado es una elipse cuyo centro se encuentra aproximadamente a 650 m al NO del centro anterior, tiene su eje mayor en dirección 96.4°, una excentricidad $e = 0.67$, semieje mayor = 7.50 km y semieje menor = 5.57 km (figura 7).

En la caldera de Los Humeros se presenta el 41.75% de los CE del área y se puede afirmar que existió actividad volcánica a través de fracturamientos radiales y semicirculares, cuyo centro se encuentra próximo a la pequeña caldera de hundimiento denominada Xalapazco.

En la Tabla 7 se tienen los picos que se observan en los histogramas del área, y en la Tabla 8 la matriz de diferencia promedio entre las zonas del área.

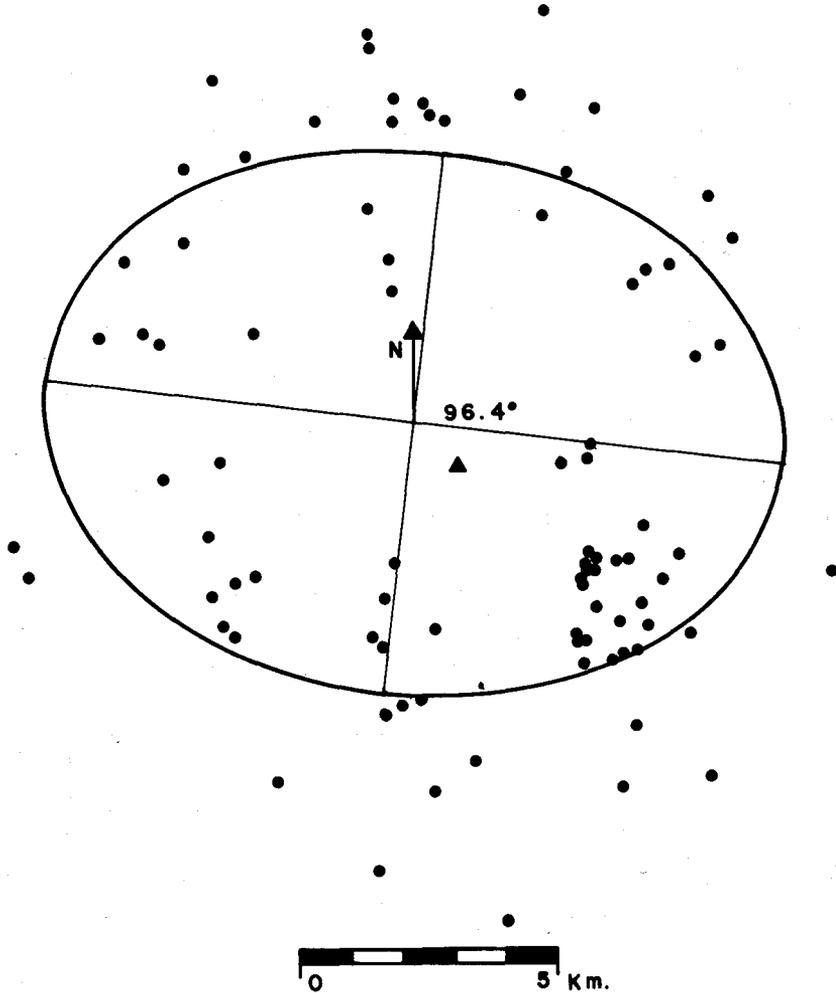


Fig. 7. Localización del centro C, de convergencia de alineamientos de centros eruptivos y elipse, ajustada a la distribución de CE en la caldera Los Humeros.

Del examen de la Tabla 7 se encuentra que las direcciones con abundancia de picos en los histogramas, significativamente mayores que el promedio, son las: 25° , 65° , 105° y 165° .

Las principales direcciones de fracturamiento en el área son las mismas en que se presenta la mayor cantidad de picos en los histogramas, éstos son: 25° , 65° , 105° y 165° .

Tabla 7. Direcciones en que se observan picos en los diagramas de rosas de las zonas del área.

Zona	Azimut de los picos																	Total	
	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165		175
1	***			***				***			***				***		***		6
2		***				***					***						***		4
3			***		***							***		***				***	5
4			***		***		***					***					***		5
5	***				***		***				***						***		5
6			***				***			***		***			***		***		6
7		***			***			***					***				***		5
8			***			***					***			***			***		5
9			***			***			***			***			***			***	6
10	***			***			***		***		***		***		***				7
11			***				***			***				***				***	5
12		***		***			***						***			***			5
13	***			***				***		***		***		***					6
14			***				***				***					***		***	5
15			***				***				***				***				4
16			***		***		***				***						***		5
17		***						***			***				***			***	5
18	***			***		***		***			***			***		***		***	7
19	***		***				***			***			***			***			6
20				***			***						***						3
21			***		***		***				***					***			5
22	***				***		***				***			***			***		6
23		***		***		***		***				***							5
Total	7	5	11	7	7	5	12	7	2	3	13	6	5	6	6	4	10	5	

Frecuencia media:

6.72 picos/dirección

Desviación estándar:

3.01 picos/dirección

Frecuencia mínima significativamente mayor que la media: 10 picos/dirección

La diferencia promedio de las zonas entre sí, tiene un valor medio de 30.45. Este valor es ligeramente mayor que el obtenido para las áreas entre sí : 29.55. Esto puede implicar un menor grado de homogeneidad en el fracturamiento del área respecto al de la región. Este resultado es de esperar si se considera que a esta escala, en zonas de 5 km de radio, son de importancia las diferentes características litológicas y estructurales de las rocas que contiene cada una. Sin embargo, esta información es útil para determinar los conjuntos de zonas con procesos de fracturamiento similares.

En la Tabla 9 se resume la información necesaria para la segunda selección. En ella entran las magnitudes de los 4 sistemas de fracturamiento principales como da-

Tabla 9. Resumen de las características de cada zona necesarias para la segunda selección, su calificación promedio, el valor medio general, su desviación estándar, el valor mínimo significativamente superior al promedio y el valor mínimo singularmente mayor que el promedio.

Zona	Fración del fract. en las dir. principales	Picos	CE	Manifestaciones termales	Calificación promedio
1	70.54	85.71	0	0	39.06
2	71.47	57.14	2.63	0	32.81
3	71.28	71.43	5.26	0	37.02
4	80.11	71.43	0	100.00	62.88
5	65.61	71.43	0	0	34.26
6	88.66	85.71	36.84	100.00	77.80
7	70.91	71.43	73.68	0	54.00
8	85.97	71.43	100.00	100.00	89.35
9	63.57	85.71	0	0	37.32
10	71.19	100.00	0	0	42.80
11	81.97	71.43	2.63	0	39.01
12	100.00	71.43	18.42	0	47.46
13	88.10	85.71	10.53	0	46.08
14	99.26	71.43	0	0	42.67.
15	83.83	57.14	0	0	35.24
16	78.07	71.43	0	0	37.38
17	67.19	71.43	7.89	0	36.63
18	71.00	100.00	36.84	100.00	76.96
19	81.41	85.71	0	0	41.78
20	74.63	42.86	2.63	0	30.03
21	91.57	71.43	26.32	0	47.33
22	77.23	85.71	0	0	40.74
23	73.79	71.43	15.79	0	40.25
F.N.:	41.84	7	38	Si	

Calificación promedio de las zonas: 46.47

Desviación estándar: 15.66

Mínimo de calificación significativamente mayor al promedio: 62.13

Mínimo de calificación singularmente mayor que el promedio: 77.79

tos para calcular el factor kilómetros de fracturamiento a lo largo de las direcciones principales.

El resultado de la selección son las zonas 8, 6 y 18, en ese orden de importancia. En la zona 4 no se observan CE y se toma como zona de importancia secundaria.

Estas zonas seleccionadas constituyen las partes sur y oeste de la caldera de Los Humeros y los domos Las Derrumbadas. Dado que las primeras 8 y 6 son aledañas, la zona de mayor potencial geotérmico aparente cae sobre la línea que une al poblado de Los Humeros con la caldera Xalapazco.

Otra información

Ponce y Rodríguez (1977) localizan la mayor actividad sísmica en la parte oeste de la caldera de Los Humeros, en las cercanías del poblado de Los Humeros. Este lugar: 19°40'N, 97°26'O, está al sur de la intersección 19°41.4'N, 97°26.6'O, de los dos principales sistemas de fallas que cortan la estructura en su parte central: Monte Nuevo (65°) y Zaragoza (145°).

Flores *et al.* (1977) por medio de una aeromagnetometría ubican un prisma magnetizado a una profundidad de 2 km y grosor de 5 km con dimensiones N-S de 5 km y E-O de 2 km en 19°41.5'N, 97°25.6'O próximo a la intersección de los sistemas mencionados. El modelo empleado es poco sensible a cambios en las dimensiones E-O del cuerpo por lo que éstas son sólo indicativas.

Mena y González (1977) encuentran en la gravimetría de la caldera un cuerpo de densidad 2.52 g/cm³ en 19°42'N, 97°26'O. Este cuerpo descansa sobre roca con densidad 2.67 g/cm³ y está sepultado por materiales con densidad 2.35 g/cm³. Localizan además un bajo gravimétrico, el más importante en el área, en el flanco oeste del Xalapazco.

Alvarez (1980) en un sondeo telúrico en frecuencia de 8 Hz encuentra dos bajos resistivos relativos. Uno próximo a la intersección de las fallas Monte Nuevo y Zaragoza y otro en el flanco oeste de la Caldera Xalapazco.

Los fracturamientos regionales que presentan Mooser y Soto (1979), no se pudieron asociar con los que se encontraron en la interpretación de imágenes Landsat de la región (figura 2) en la interpretación de fotografías aéreas del área (figura 5), ni en la verificación de campo.

Con la información geofísica de que se dispone y los resultados de aplicar el método, se puede pensar que el cuerpo que reportaron Flores *et al.* (1977); Mena y

González (1977), en el centro de la caldera, es uno cuyo magma ascendió a través de la intersección de una antigua falla, Zaragoza, con el sistema de fallas de Monte Nuevo y que se emplazó en la vecindad de la intersección de los sistemas.

El bajo gravimétrico que reportan estos últimos autores está próximo a la zona de enjambre sísmico localizada por Ponce y Rodríguez (1977), el bajo en resistividad, estaciones 36-39, encontrado por Alvarez (1980), está en la zona de mayor densidad de CE y tiene manifestaciones termales. Aquí se propone que en esta zona existe un cuerpo caliente que se manifiesta en la gravimetría y en el telúrico.

Desafortunadamente al sur del área, la información es menor y no es posible efectuar una interpretación sinérgica de ella.

TECTONICA

De los trabajos realizados (Demant, 1978; Moore y Del Castillo, 1974; Mossman y Viniegra, 1976; Tardy, 1980), se deduce que en la tectónica regional intervienen principalmente los procesos que dieron lugar a la Sierra Madre Oriental (SMO) y a la Faja Volcánica Transmexicana (FVT).

La SMO está formada en buena parte por plegamientos de rocas calcáreas de edad Cretácica.

Un plegamiento ocurre (Biot, 1961) cuando una capa plana de alta viscosidad situada entre capas de menor viscosidad se somete a una compresión esencialmente paralela a su plano. La amplitud del plegamiento es función del grosor de las capas, del tiempo, de la profundidad de éstas, el contraste de viscosidad entre ellas, y en menor medida, de la magnitud del esfuerzo compresivo. El rumbo de los ejes de los pliegues formados es perpendicular a él y si el esfuerzo tiene una magnitud similar a la necesaria para fracturar las rocas, además de plegarlas las fracturará.

Correlacionando las figuras 2, 4 y los mapas geológicos se puede observar que en la región el plegamiento que forma la SMO tiene un rumbo medio de 130° , una gran amplitud y presenta fracturamientos, principalmente en la parte SE, en dirección 35° , aproximadamente. Estos hechos pueden implicar que existió un esfuerzo compresivo horizontal en dirección 35° , que al actuar durante un largo tiempo y siendo el esfuerzo principal, produjo el plegamiento de sedimentos Jurásico-Cretácico (180 a 70 M.a. de edad) y fallas inversas. Después, actuando junto con un esfuerzo vertical como principal, fracturó los pliegues dando lugar a fallas en su mismo rumbo.

El sistema N-S o $170 \pm 10^\circ$, bien representado por la sierra que corre del Pico de Orizaba al Cofre de Perote, está formado por derrames ígneos y fracturas. La edad estimada de estos derrames, Formación Teziutlán, es de 3.5 a 5 M.a. (Yáñez (1980)). La Sierra Nevada es un sistema similar, también N-S, con rocas de aproximadamente 5.1 M.a. en la caldera de Ixtaccíhuatl (Steele, 1971). Los fracturamientos en esta dirección ocupan el segundo lugar en cuanto a extensión en que se presentan. Estas observaciones pueden ser explicadas por un mecanismo regional de compresión en dirección 0° ; y/o distensión en dirección 90° , que dio lugar a fisuras, rumbo 0° , debido a un empuje hacia arriba, posiblemente causado por cámaras magmáticas, mismas que sirvieron de conductos para el ascenso de magma.

Al NO de la caldera de Los Humeros predomina el plegamiento en dirección 120° , que implica una compresión en dirección 30° , mientras que al SE del Pico de Orizaba el plegamiento ocurre en dirección 140° , compresión rumbo 50° . Entre ambas estructuras se interrumpe la SMO y se presenta la FVT, se tiene la mayor intensidad del sistema en dirección $70 \pm 10^\circ$, constituido por fallas, fracturas y por alineamientos volcánicos. Este régimen de fracturamiento se presenta hasta en rocas con una edad estimada en .2 M.a. (Yáñez, 1980) flujos El Limón y Cerro Malpaís entre otros, y es probablemente el sistema regional de más reciente aparición.

Esta dirección de fracturamiento se observa entre las principales desde Durango al NO, hasta Juchitán al SE, incluyendo la línea costera de Puerto Angel a Salina Cruz. Dentro de estos límites es común observar la presencia de alineamientos de centros eruptivos, grandes y pequeños, con rumbo $70 \pm 10^\circ$ y grandes estructuras volcánicas en la intersección de este sistema de fracturamiento con otros, como la caldera de La Primavera, el graben de Cuitzeo, la caldera de Los Azufres, la caldera de Amealco y la caldera de Los Humeros (IGF, 1980; Del Río, 1980).

Analizado detalladamente, parece que el Vulcanismo Cuaternario en el área Los Humeros-Las Derrumbadas está controlado principalmente por el sistema $70 \pm 10^\circ$ y que se manifiesta a través de fracturas en esta dirección y donde éstas cortan antiguas fracturas, o zonas de debilidad, rumbo 135° de la SMO.

En el mapa de López Ramos (1976) la línea Atoyac, Gro. - Nautla, Ver., rumbo $45 \pm 10^\circ$, marca una discordancia entre las rocas situadas a ambos lados de ella. En el mismo mapa se observa que dicha línea es aproximadamente colineal a la línea de los 3 000 m, bnm, rumbo 55° , que se observa en la batimetría del Golfo de México, en la Fosa de Sigsbee, al NO de Yucatán. De estas observaciones se puede implicar que es posible que se trate de una dislocación cortical de extensión continental paralela *grasso modo* a la fosa del Caimán, en el Mar Caribe.

Algunos autores (Carr, 1974; Larson y Chase, 1970; Molnar y Sykes, 1969) pro-

ponen como dirección actual de subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica de $40 \pm 10^\circ$.

Es posible que el origen del sistema $70 \pm 10^\circ$ se deba al efecto combinado de un esfuerzo vertical, actuando como esfuerzo principal, en una región continental sometida a un esfuerzo compresivo horizontal, en dirección $70 \pm 10^\circ$, como esfuerzo intermedio.

Esta hipótesis necesita que la dirección del esfuerzo compresivo en la Placa de Norteamérica debido a la colisión de la Placa de Cocos, rote 30° hacia el E al adentrarse en el continente, de tal manera que la compresión horizontal tenga un rumbo $70 \pm 10^\circ$. Esta posibilidad está abierta y se puede encontrar en el evento 137 de Molnar y Sykes (1969) que corresponde a una compresión en dirección 63° .

De la caldera Los Humeros se puede inferir, con base en el patrón de fracturamiento y en la disposición de los centros eruptivos, principalmente que:

- 1) Durante el desarrollo de la misma, los esfuerzos producidos por el magma en su curso por la chimenea originaron fracturamientos radiales al conducto.
- 2) El colapso de la caldera ocurrió durante un período en el que el mayor esfuerzo compresivo horizontal tenía la dirección 96°
- 3) El centro del colapso coincide con el de la chimenea, centro también del fracturamiento radial.
- 4) Está emplazada en una área de intenso tectonismo que evoluciona en el tiempo, rápidamente, de tal manera que se observan: un proceso de compresión, rumbo 35° , causante de la SMO, hasta hace 50 M.a. (?). Una distensión rumbo 90° que dio lugar a la Sierra Negra, y tal vez también a la Sierra Nevada, hace 3 a 5 M.a. Un esfuerzo compresivo en dirección 96° que moduló la distribución del volcanismo caldérico con una edad de 2 a .5 M.a. y un esfuerzo compresivo rumbo $70 \pm 10^\circ$, que produce el fracturamiento de los flujos más recientes, cuya edad es de 200 000 años, aproximadamente.

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

La metodología presentada y aplicada aquí, constituye una vía alternativa a un enfoque "clásico", en el que se estudian áreas de acuerdo con una selección empírica, basada en la experiencia personal. Si bien es cierto que con esta metodología se

examinan estas áreas y todas las que les rodean, la solución tiene la ventaja de estar estadísticamente fundamentada, estar basada sobre información concreta y verificable, además de ser más rápida y económica. El valor de este tratamiento sólo podrá ser evaluado cuando se aplique numerosas veces.

Las áreas aquí consideradas, al momento de entregar este manuscrito, ya han sido exploradas detalladamente por la Comisión Federal de Electricidad. Ha empleado técnicas geológicas, geofísicas y geoquímicas convencionales, con los mismos resultados: las zonas de mayor potencial geotérmico son, la franja Los Humeros-Xalapa y los domos Las Derrumbadas. En la actualidad el primer pozo perforado, a 1 750 m de profundidad, en las cercanías de Los Humeros, produce vapor seco a una temperatura de 250°C.

AGRADECIMIENTOS

A J. Bouton, T. Del Cid, F. Graffe y N. Figueroa por su limpio y singular esfuerzo realizado para la edición de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ B., R., 1980. Outlining Tectonism and Faulting with Tellurics in Los Humeros-Derrumbadas Geothermal Area. Geothermal Research Council, Transactions V. 14.
- BIOT, M. A., 1961. Theory of Folding of Stratified Viscoelastic media and its implications in Tectonics and Orogenesis. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 72, 1595-1620.
- CARTA TOPOGRAFICA VERACRUZ, 14 Q-VI, 1958. Comisión Intersecretarial del levantamiento de la Carta Geográfica de la República Mexicana.
- CARR, M. J., 1974. Tectonics of the Pacific margin of Northern Central America, Ph. D. dissertation; Darmouth College, Hanover, N. H. 159 p.
- DEL RIO L., L., 1980. Percepción Remota Aplicada a Geotermia: Región NE de Morelia. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM, 107 pp.
- DEMANT, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de Interpretación. I. de Geología, UNAM, Revista 2(2).
- FLORES L., C., R. ALVAREZ, S. K. SINGH y J. URRUTIA, 1977. Aeromagnetic Survey of Los Humeros Caldera, Mexico, *Geofís. Intern.* 17 (4), 415-488.
- INSTITUTO DE GEOFISICA, 1980. Percepción Remota en Exploración Geotérmica, partes II B, C. Reporte Interno.
- KAPPELMEYER, O. y R. HAENEL, 1974. Geothermics with Special References to application. Geosurvey Monographs, Series 1 (4). Berlin, Gebruder Borntraeger, 238 pp.

- LARSON, R. L. y C. G. CHASE, 1970. Relative velocities of the Pacific, North American and Cocos plates in the middle America region. *Earth Planet. Sci. Lett.* 7, 425-428.
- LOPEZ R., E., 1967. Carta Geológica del estado de Veracruz. Instituto de Geología, UNAM.
- LOPEZ R., E., 1976. Carta Geológica de la República Mexicana. Instituto de Geología, UNAM.
- LOPEZ R., E., 1979. Carta Geológica de los estados de Puebla y Tlaxcala. Instituto de Geología, UNAM.
- McNITT, J. R., 1970. The Geologic Environment of Geothermal Fields as a Guide to Exploration. *Geothermics*, Special Issue 2.
- MENA, M. y T. GONZALEZ M., 1977. Regional Gravity of Los Humeros Volcanic Area. *Geof. Intern.* 17(4) 429-443.
- MOLNAR, P. y L. SYKES, 1969. Tectonics of the Caribbean and Middle America Regions from Focal Mechanisms and Seismicity. *Geol. Soc. Am. Bull.* 80, 1639-1684.
- MOORE, G. W. y L. DEL CASTILLO, 1974. Tectonic Evolution of the Southern Gulf of Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.* 85, 607-618.
- MOOSER, F. y S. SOTO, 1979. Mapa Geológico 1:200 000, Informe Geológico, planta núcleo-eléctrica de Laguna Verde, Comisión Federal de Electricidad, México. También en Mena y González (1977).
- MOSSMAN, R. W. y F. VINIEGRA, 1976. Complex Fault Structures in Veracruz Province of Mexico. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 60(3).
- PONCE, L. y C. RODRIGUEZ, 1977. Microearthquake Activity Associated to Los Humeros Caldera, México: Preliminary Survey. *Geofis. Intern.* 17(4), 461-478.
- TARDY, M., 1980. Contribution à l'Etude Géologique de la Sierra Orientale du Mexique. Tesis de Doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 459 pp.
- STEELE, W. K., 1971. Paleomagnetic Directions from the Iztaccihuatl Volcano, Mexico, *Earth and Planet. Sci. Lett.* 11, 211-218.
- YAÑEZ G., C., 1980. Proyecto Geotérmico Los Humeros-Derrumbadas, Informe Geológico. Comisión Federal de Electricidad, 59 pp.