

1000018

SECCION SISMOLOGIA  
VULCANOLOGIA Y  
EXPLORACION GEOFISICA

DIRECCION DE INGENIERIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

# BOLETIN DEL



AÑO 4 , N°7, JUNIO DE 1991 — SAN JOSE , COSTA RICA

ISSN 1015-4396

SECCION SISMOLOGIA  
VULCANOLOGIA Y  
EXPLORACION GEOFISICA

DIRECCION DE INGENIERIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

# BOLETIN DEL



AÑO 4 , N°7, JUNIO DE 1991 — SAN JOSE , COSTA RICA

ISSN 1015-4396

**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD**

**DIRECCION DE INGENIERIA CIVIL**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**BOLETIN DEL OBSERVATORIO VULCANOLOGICO  
DEL ARENAL**

**Editores: Gerardo J. Soto  
Rafael Barquero  
Guillermo E. Alvarado**

**AÑO 4, N° 7, Junio de 1991**

**San José, Costa Rica**

OBSERVATORIO VULCANOLOGICO DEL ARENAL (O.V.A.) \*

Oficina de Sismología y Vulcanología  
Departamento de Geología  
Instituto Costarricense de Electricidad  
Apdo. 10032-1000, San José, Costa Rica

Teléfonos: (00506) 20-7741  
(00506) 20-7686

Telex: (376) 2140  
Fax: (00506) 31-4744

El *Observatorio Vulcanológico del Arenal* (OVA) es parte de la Oficina de Sismología y Vulcanología del Departamento de Geología del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), la cual conjuntamente con la Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica de la Escuela Centroamericana de Geología (Universidad de Costa Rica), constituyen la RED SISMOLOGICA NACIONAL (RSN: ICE-UCR).

Personal profesional del OVA:

Geól. Guillermo Alvarado, Vulcanología  
Ing. José Miguel Barrantes, Electrónica  
Geól. Rafael Barquero, Sismología  
Geól. Ileana Boschini, Sismología  
Ing. Carlos Cordero, Topografía  
Quím. José F. Fernández, Química  
Geól. Carlos Leandro, Geofísica  
Geól. Gerardo Soto, Vulcanología

Personal técnico y de apoyo:

Francisco Arias  
Guido Calvo  
Manuel Gutiérrez  
Rigoberto Torres  
María Ester Torres

\* Miembro de la *World Organization of Volcano Observatories* (WOVO)

OBSERVATORIO VULCANOLOGICO DEL ARENAL (O.V.A.) \*

Oficina de Sismología y Vulcanología

Departamento de Geología

Instituto Costarricense de Electricidad

Apado. 10032-1000, San José, Costa Rica.

Telephones: (00506) 20-7741

(00506) 20-7686

Telex: (376) 2140

Fax: (00506) 31-4744

The *Observatorio Vulcanológico del Arenal* (OVA) is part of the Seismology and Volcanology Office of the Department of Geology of the Costa Rican Institute of Electricity (ICE), which together with the Sección de Sismología, Vulcanología y Exploración Geofísica of the Central American School of Geology of the University of Costa Rica (UCR) constitute the NATIONAL SEISMOLOGICAL NETWORK (RSN: ICE-UCR).

OVA's Professional staff:

Geol. Guillermo Alvarado, Volcanology

Eng. José Miguel Barrantes, Electronics

Geol. Rafael Barquero, Seismology

Geol. Ileana Boschini, Seismology

Eng. Carlos Cordero, Topography

Chem. José F. Fernández, Chemistry

Geoph. Carlos Leandro, Geophysics

Geol. Gerardo Soto, Volcanology

Technical and auxiliary staff:

Francisco Arias

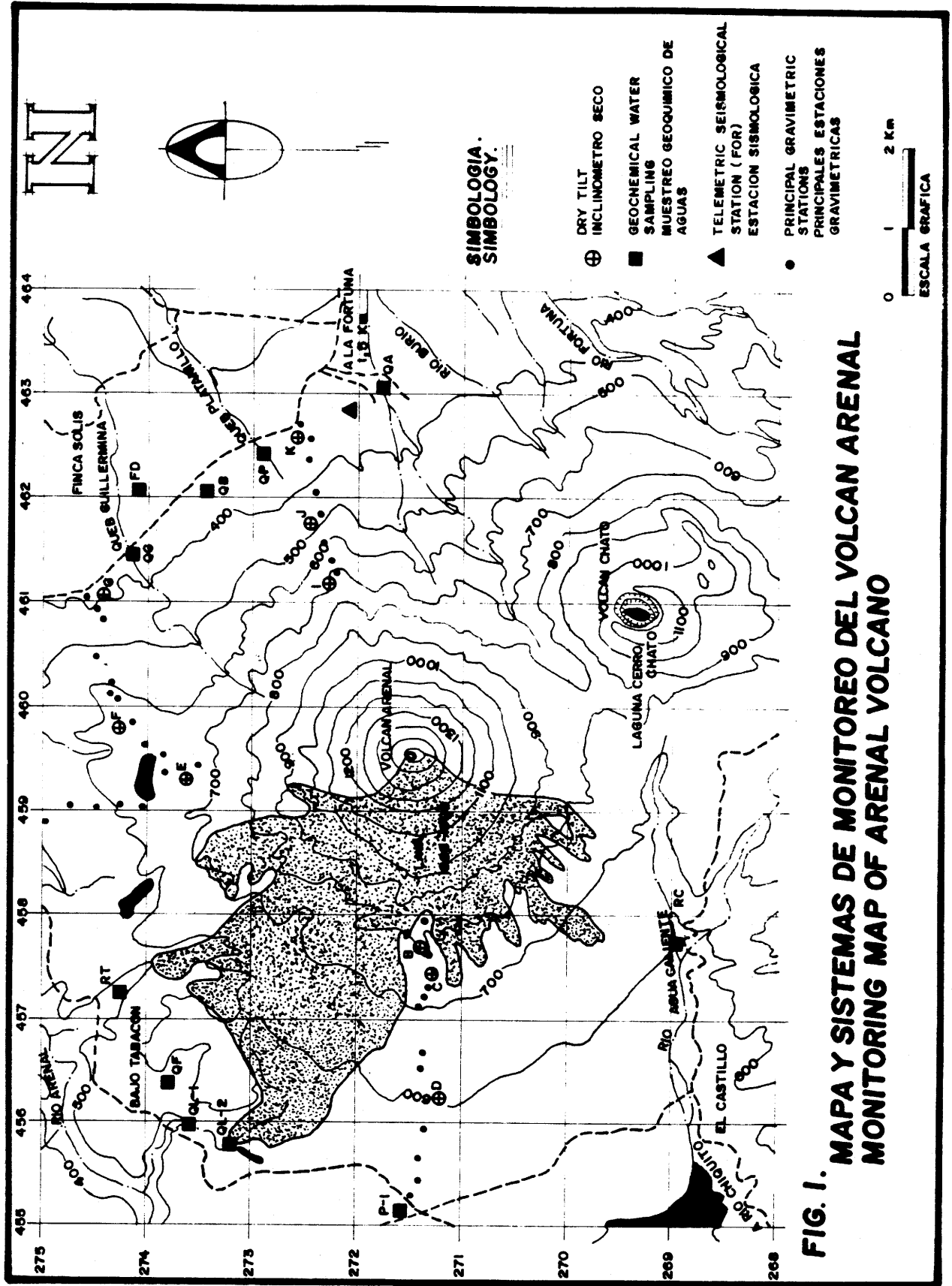
Guido Calvo

Manuel Gutiérrez

Rigoberto Torres

María Ester Torres

\* Member of the *World Organization of Volcano Observatories* (WOVO)



## INDICE

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RAFAEL BARQUERO & GERARDO SOTO<br>Reporte de la Actividad del Volcán Arenal,<br>enero-junio 1991 .....                    | 2  |
| SERGIO CHIESA<br>Compilación de los análisis químicos de las rocas<br>volcánicas de los volcanes Arenal y Chato .....     | 5  |
| PIERANGELO CALEGARI & SERGIO CHIESA<br>Análisis químicos de productos de los volcanes<br>Arenal y Chato, Costa Rica ..... | 23 |
| GERARDO SOTO<br>Análisis de inclinometría seca en el<br>Volcán Arenal, 1988-90.....                                       | 33 |

**REPORTE DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCAN ARENAL, ENERO - JUNIO 1991**

Rafael Barquero & Gerardo Soto, Oficina de Sismología y Vulcanología, Departamento de Geología.

**ENERO:** Continuó la actividad exhalativa, generando lluvia ácida que afectó la región oeste del volcán. La actividad explosiva estromboliana comenzó a incrementarse a partir del 10 de enero en forma importante. Entre los días 15 y 17 se observaron explosiones a un ritmo de 2 a 3 por hora, que esparcían ceniza sobre el lago Arenal. Se observaron 4 pequeños frentes de lava descendiendo por el flanco oeste. Se registró actividad de trémores en forma casi continua entre los días 2-3, 8-9, 10-17, 20-24 y 26 de enero.

**FEBRERO:** La actividad en el volcán fue normal, manteniendo principalmente actividad exhalativa intensa, de gases con alto contenido de vapor de agua originado a partir de fuertes lluvias en la zona. La actividad explosiva fue baja con un promedio de 3 eventos por día. La actividad de trémores prevaleció durante todo el mes y se interpreta relacionada con la desgasificación intensa.

**MARZO:** La actividad se mantuvo normal con pocas explosiones diarias, predominando la actividad fumarólica en el cráter C.

**ABRIL:** A partir del 20 de abril hubo un incremento moderado en la actividad explosiva de carácter estromboliano. La actividad sísmica también mostró un incremento importante, registrándose hasta más de 40 eventos por día. Se observó descenso de lava en bloques por los flancos SW y sur hasta la cota de 700 m.

**MAYO:** La actividad volcánica continuó a un nivel mayor que el mes anterior, con más cantidad de explosiones estrombolianas diarias y un promedio de 20 eventos sísmicos por día, que alcanzaron un máximo de 43. A mediados del mes la actividad estromboliana fue periódica y de fuerte intensidad durante más de una semana. Los flancos NW y W del volcán están cubiertos por gran cantidad de escombros volcánicos producto de los impactos y fracturación de las bombas, avalanchas desde coladas de lava y flujos piroclásticos locales. El 22 de mayo, aproximadamente a las 05:10 (11:10 GMT) se produjo una explosión con un pequeño flujo piroclástico acompañante. Hacia finales de mes, las explosiones estrombolianas eran más o menos constantes (una por hora), de intensidad variable y entre los lapsos de inactividad solía presentarse una columna de

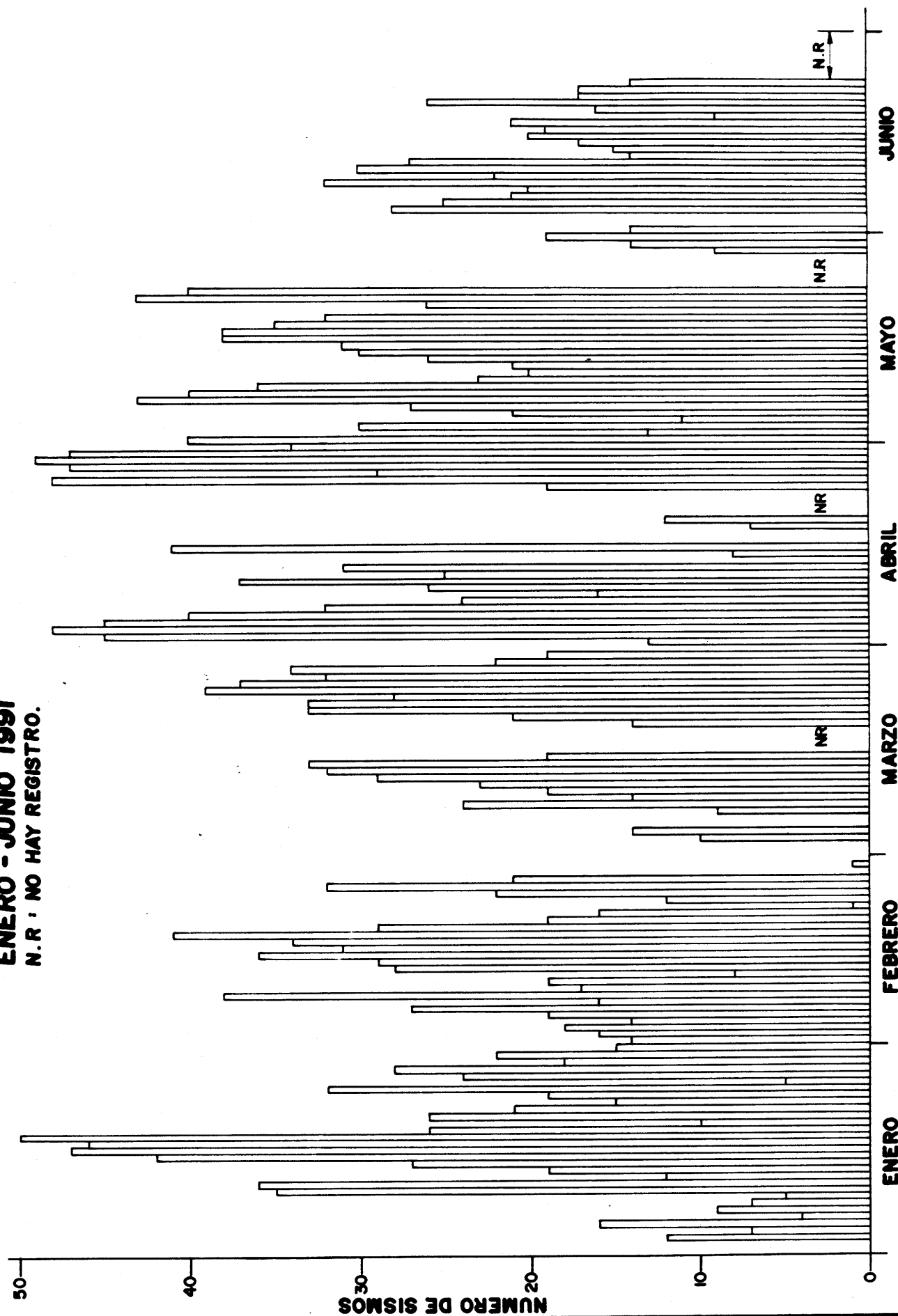
vapor y gases. Una colada de lava en bloques descendió 1 km desde el cráter activo (C) sobre el flanco SSW, bifurcándose en 2 lenguas: la más activa es la inferior, a la cota de 1000 m s.n.m.. Las bombas impactaban con un alcance máximo de 1300 m desde el cráter C durante las explosiones más fuertes.

**JUNIO:** Hubo un descenso moderado en la actividad estromboliana con respecto al mes anterior, y un incremento moderado en la actividad exhalativa de gases y vapor de agua. La colada de lava en bloques observada en mayo continuó su descenso en dos lenguas por el flanco SSW y bajó hasta la cota de 800 m s.n.m., alcanzando parte del bosque y quemándolo parcialmente. La actividad sísmica relacionada con el volcán se mantiene normal con un promedio de 15 eventos por día. Aunque es época lluviosa, no se observaron lahares en los flancos del aparato volcánico.

# **NUMERO DIARIO DE SISMOS VOLCANICOS REGISTRADOS EN LA ESTACION FOR , VOLCAN ARENAL,**

**ENERO - JUNIO 1991**

**N.R : NO HAY REGISTRO.**



**COMPILACION DE LOS ANALISIS QUIMICOS DE LAS ROCAS  
VOLCANICAS DE LOS VOLCANES ARENAL Y CHATO**

Sergio Chiesa

CNR - Centro di studio di Geodinamica Alpina e Quaternaria, Via  
Mangiagalli 34, 20133, Milano, Italia

**INTRODUCCION**

Desde el despertar del volcán Arenal en la mañana del 29 de julio de 1968, la atención de muchos vulcanólogos se volcó hacia este centro eruptivo, que hasta la fecha ha eruptado cerca de medio kilómetro cúbico de lavas y de tefras. Fue a partir de ese entonces, en que verdaderamente se comenzaron a conocer los aspectos vulcanológicos de este volcán que, aunque pequeño y joven, posee características petrológicas, geotectónicas y sismológicas muy interesantes y un elevado potencial de peligrosidad volcánica.

Con el fin de facilitar las investigaciones petrológicas futuras, se presenta la compilación de los análisis químicos de rocas (lavas, tefras, cumulos) y de algunos vidrios realizados en los hermanos volcanes Arenal y Chato, publicados por diferentes autores entre 1968 y 1988, que suman más de 160. La mayoría se refieren a lavas eruptadas después de 1968. Para conocer la ubicación estratigráfica y geográfica de las muestras, se deben consultar los trabajos originales o contactar a los autores.

Se espera con este banco de datos, contribuir a los futuros trabajos sobre estos importantes centros calcoalcalinos, pobres en  $K_2O$ , ricos en  $Al_2O_3$  y caracterizados por una elevada viscosidad (Figuras 1, 2, 3 y 4).

La clave para los análisis químicos es la siguiente:

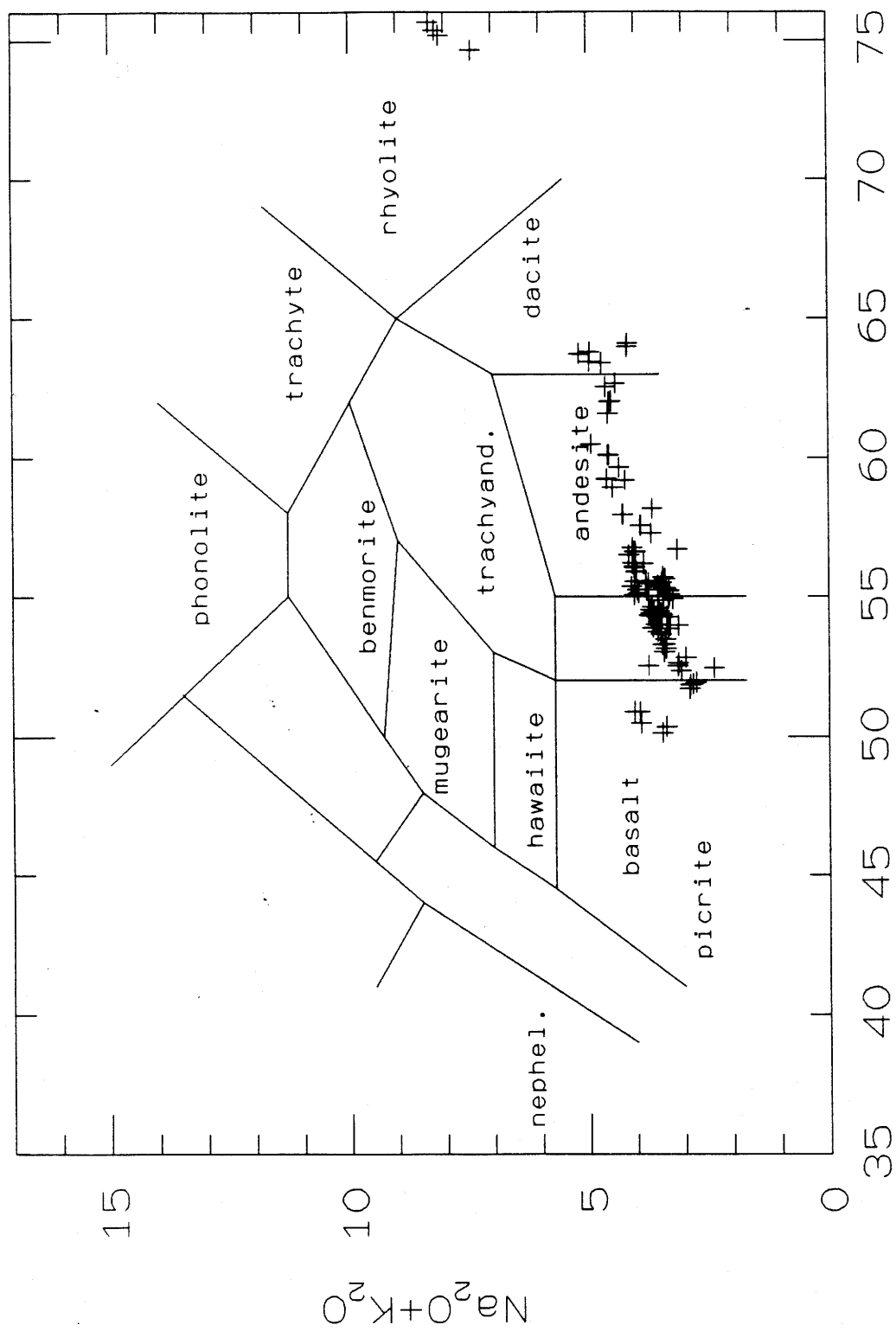
- 1 - Melson y Sáenz (1973),
- 2 - Hernandez y Tournon (1978),
- 3 - Malavassi (1979),
- 4 - Melson (1982),
- 5 - Tournon (1984),
- 6 - Calegari (1987),
- 7 - Reagan et al. (1987),
- 8 - Feigenson y Carr (1985); Borgia et al. (1988).

## Explicaciones de las figuras:

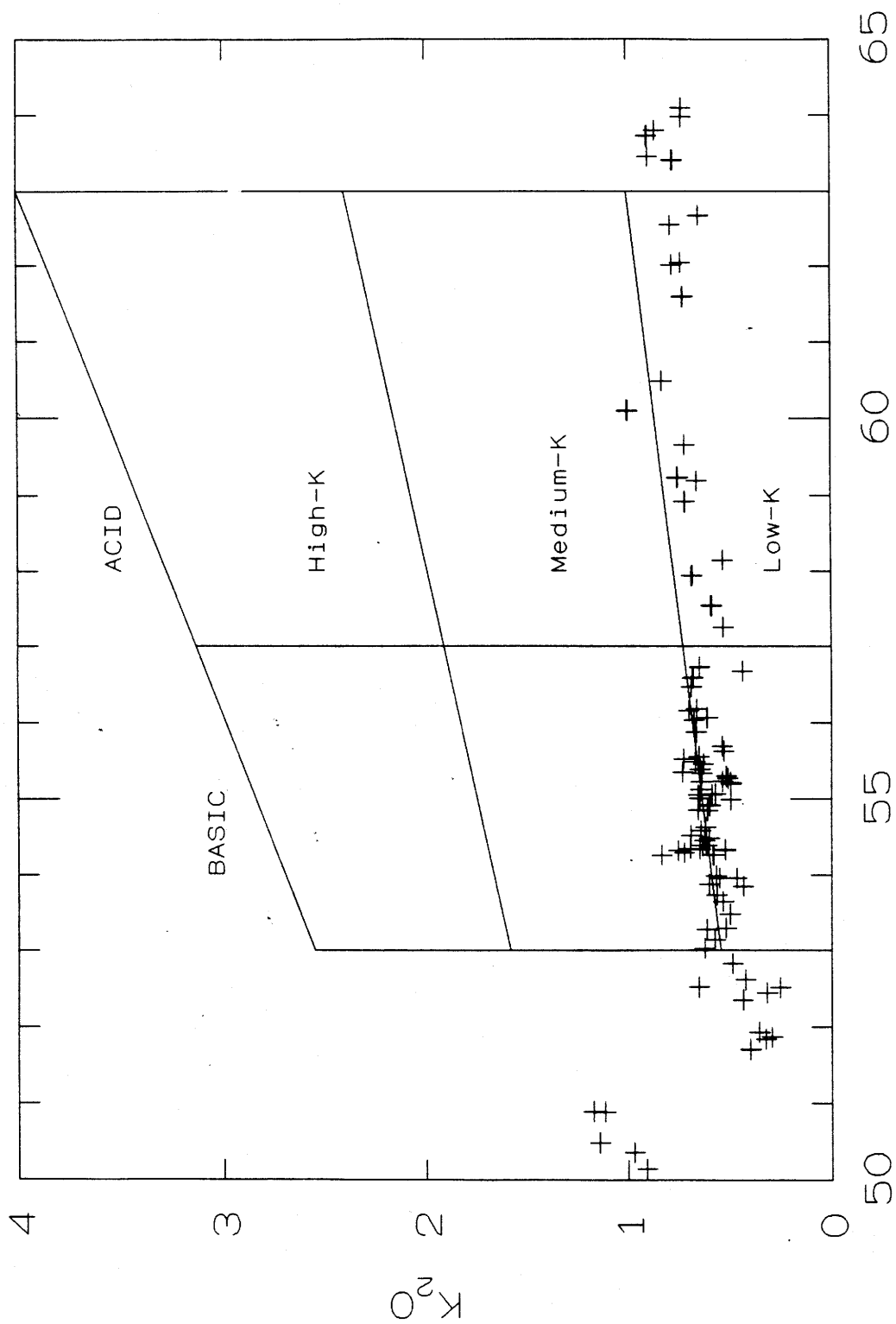
- Fig. 1: Diagrama clasificativo Alkalís/Sílice.
- Fig. 2: Diagrama clasificativo Potasio/Sílice.
- Fig. 3: Diagrama clasificativo Aluminio/Anortita normativa.
- Fig. 4: Diagrama Aluminio/Sílice.

## REFERENCIAS

- Borgia, A., Poore, C., Carr, M.J., Melson, W.G. & Alvarado, G.E., 1988: Structural, stratigraphic and petrologic aspects of the Arenal-Chato Volcanic System, Costa Rica: evolution of a young stratovolcanic complex. - Bull. Volcanol., 50: 86-105.
- Calegari, P., 1987: Caratteristiche chimiche di alcuni livelli esplosivi del vulcano Arenal, Costa Rica. - ii + 68 págs.; Università degli Studi di Milano, Dip. di Scienze della Terra, Tesis.
- Feigenson, M.D. & Carr, M.J., 1985: Determination of major, trace and rare elements in rocks, using DCP-AES. - Chem Geol., 51: 19-27.
- Hernandez, J. & Tournon, J., 1978: Analyse chimique des verres volcaniques riches en silice à la microsonde electronique (par utilisation des détecteurs d'énergie des rayos X). - C.R. Acad. Sc. Paris D., 287: 1087-1090.
- Malavassi, E., 1979: Geology and petrology of Arenal Volcano, Costa Rica. - 111 págs.; Tesis de Maestría, University of Hawaii.
- Melson, W.G., 1982: Alternation between acidic and basic magmas in major explosive eruptions of Arenal volcano, Costa Rica. - Boletín de Vulcanología, Univ. Nacional, Costa Rica, 14: 65-74.
- Melson, W.G. & Sáenz, R., 1973: Volume, energy and cyclicity of eruptions of Arenal Volcano, Costa Rica. - Bull. Volcanol., 37: 416-437.
- Reagan, M.K., Gill, J.B., Malavassi, E. & Garcia, M.O., 1987: Changes in magma composition at Arenal Volcano, Costa Rica, 1968-1985: Real time monitoring of open-system differentiation. - Bull. Volcanol., 49: 415-434
- Tournon, J., 1984: Magmatismes du Mésozoïque à l'actuel en Amérique Centrale: L'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andésites. - 335 págs.; Mem. Sc. Terre, Univ. Curie, 84-49; Tesis doctoral.

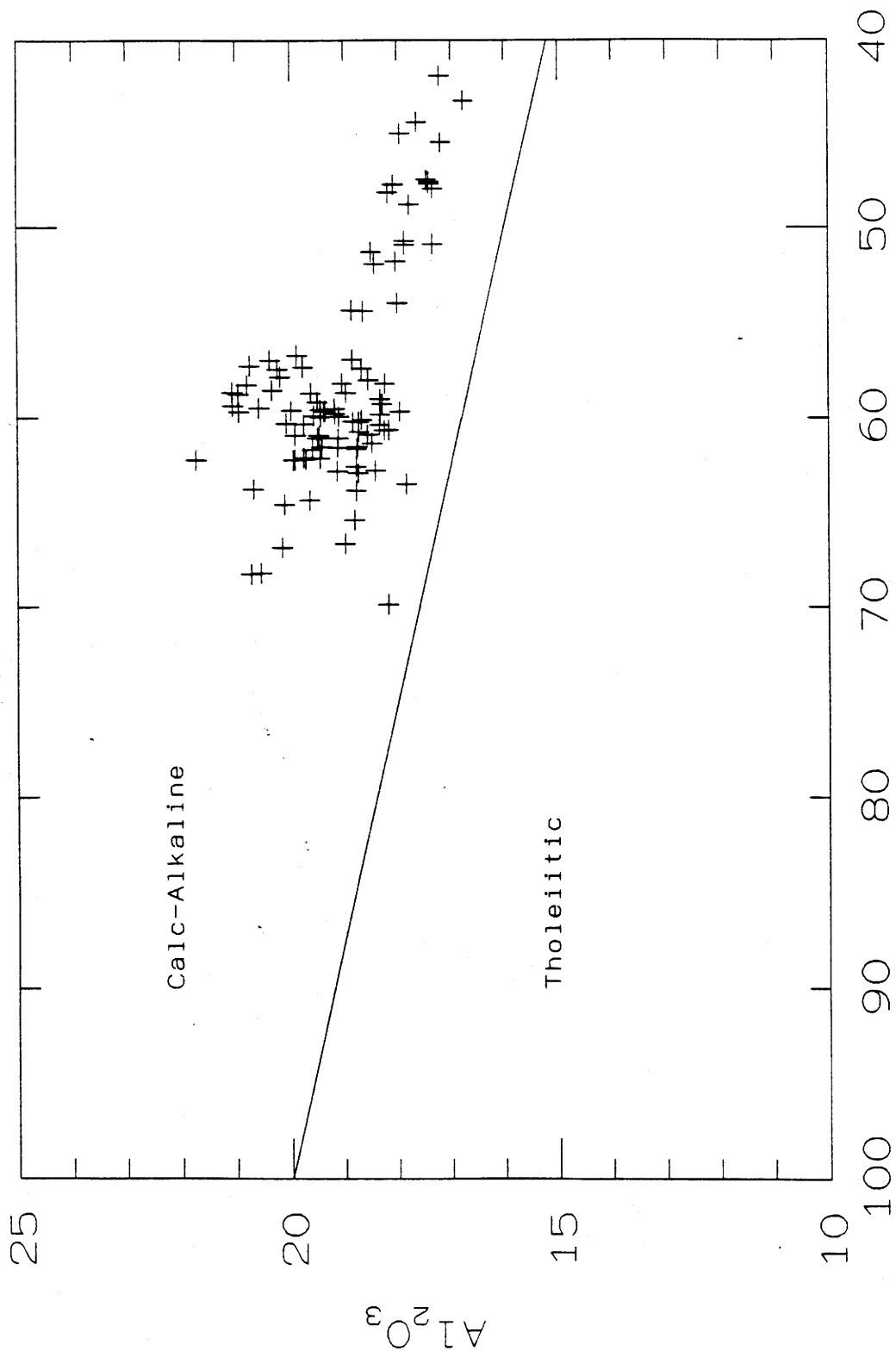


SiO<sub>2</sub>  
Fig. 1



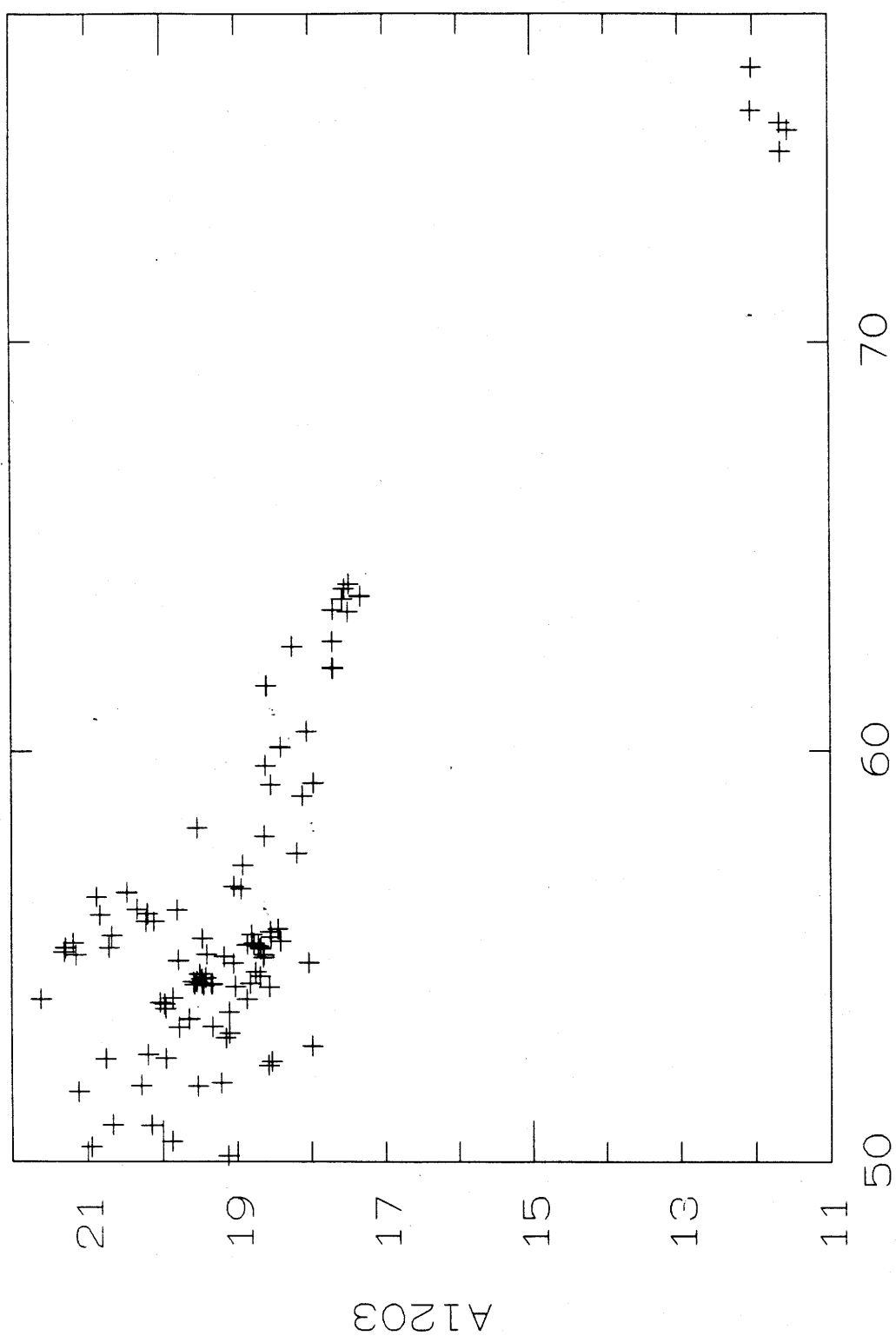
$SiO_2$

Fig. 2



AN

Fig. 3



$SiO_2$

Fig. 4

| Sample  | ET1   | ET2A  | ET2B  | ET3   | ET4A  | ET4B  | ET4C  | ET4D  | ET4E  | ET4F  | ET5A  | ET5B  | ET6   | ET7   | ET8   | ET9   |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VN #    | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  |
| SiO2    | 55.82 | 61.71 | 61.01 | 50.74 | 57.56 | 57.82 | 56.09 | 58.35 | 55.54 | 55.19 | 62.42 | 56.94 | 51.29 | 62.31 | 53.55 | 59.89 |
| TiO2    | 0.54  | 0.38  | 0.40  | 0.58  | 0.56  | 0.56  | 0.57  | 0.58  | 0.59  | 0.53  | 0.40  | 0.55  | 0.65  | 0.36  | 0.61  | 0.41  |
| Al2O3   | 20.19 | 16.76 | 17.41 | 20.72 | 17.46 | 17.78 | 18.03 | 17.87 | 18.64 | 19.88 | 17.21 | 18.00 | 18.98 | 17.19 | 18.77 | 18.08 |
| FeO     | 5.94  | 5.05  | 5.73  | 7.47  | 7.00  | 7.19  | 7.14  | 6.36  | 7.25  | 6.94  | 5.01  | 7.82  | 9.54  | 5.29  | 8.44  | 5.72  |
| MnO     | 0.14  | 0.21  | 0.21  | 0.14  | 0.19  | 0.18  | 0.18  | 0.17  | 0.18  | 0.17  | 0.19  | 0.21  | 0.17  | 0.22  | 0.21  | 0.20  |
| MgO     | 2.64  | 1.87  | 2.24  | 4.70  | 2.81  | 2.89  | 2.90  | 2.49  | 3.35  | 2.86  | 1.77  | 3.35  | 5.53  | 1.97  | 4.46  | 2.06  |
| CaO     | 9.22  | 5.69  | 6.67  | 10.82 | 6.88  | 7.06  | 7.53  | 6.57  | 8.14  | 8.69  | 5.63  | 8.01  | 9.74  | 6.02  | 9.15  | 6.17  |
| Na2O    | 3.30  | 3.96  | 3.72  | 2.44  | 3.75  | 3.70  | 3.48  | 3.48  | 3.36  | 3.37  | 4.19  | 3.29  | 2.37  | 3.87  | 2.74  | 3.75  |
| K2O     | 0.67  | 0.83  | 0.76  | 0.39  | 0.73  | 0.70  | 0.66  | 0.97  | 0.63  | 0.60  | 0.88  | 0.58  | 0.35  | 0.76  | 0.57  | 0.70  |
| P2O5    | 0.18  | 0.26  | 0.23  | 0.13  | 0.25  | 0.25  | 0.23  | 0.26  | 0.22  | 0.21  | 0.25  | 0.21  | 0.16  | 0.28  | 0.18  | 0.25  |
| Total   | 98.63 | 96.73 | 98.38 | 98.14 | 97.18 | 98.14 | 96.81 | 97.09 | 97.90 | 98.43 | 97.94 | 98.96 | 98.78 | 98.27 | 98.68 | 97.23 |
| Rb      | 14    | 16    | 15    | 9     | 15    | 13    | 13    | 20    | 14    | 15    | 18    | 10    | 8     | 14    | 14    | 12    |
| Ba      | 555   | 437   | 628   | 324   | 641   | 626   | 602   | 789   | 570   | 541   | 745   | 497   | 355   | 631   | 636   | 612   |
| Sr      | 747   | 662   | 668   | 695   | 680   | 680   | 699   | 734   | 725   | 762   | 672   | 683   | 688   | 664   | 627   | 621   |
| V       | 137   | 41    | 61    | 212   | 114   | 113   | 116   | 116   | 138   | 123   | 57    | 122   | 217   | 46    | 197   | 58    |
| Cr      | 12    | 8     | 9     | 45    | 19    | 11    | 10    | 17    | 18    | 10    | 9     | 15    | 66    | 11    | 24    | 10    |
| Ni      | 11    | 5     | 4     | 29    | 6     | 2     | 3     | 8     | 11    | 1     | 1     | 6     | 40    | 1     | 18    | 4     |
| Zr      | 57    | 72    | 65    | 46    | 68    | 64    | 61    | 77    | 59    | 64    | 70    | 61    | 54    | 62    | 62    | 76    |
| Sc      | 16    | 9     | 10    | 23    | 15    | 16    | 16    | 16    | 18    | 16    | 10    | 16    | 28    | 9     | 21    | 10    |
| Cu      | 75    | 22    | 12    | 87    | 56    | 48    | 53    | 45    | 59    | 59    | 14    | 27    | 114   | 9     | 83    | 25    |
| FeO*    | 5.94  | 5.05  | 5.73  | 7.47  | 7.00  | 7.19  | 7.14  | 6.36  | 7.25  | 6.94  | 5.01  | 7.82  | 9.54  | 5.29  | 8.44  | 5.72  |
| Mg#     | 44.21 | 39.77 | 41.07 | 52.88 | 41.72 | 41.75 | 42.00 | 41.11 | 45.17 | 42.36 | 38.65 | 43.31 | 50.83 | 39.90 | 48.52 | 39.10 |
| Density | 2.54  | 2.47  | 2.49  | 2.61  | 2.52  | 2.53  | 2.54  | 2.51  | 2.55  | 2.55  | 2.46  | 2.55  | 2.63  | 2.47  | 2.59  | 2.49  |

| Sample  | ARCOR  | AR82  | 140A1 | 117A2 | 134A2 | 143A2 | 101A3 | 102A3 | 87A3   | 125A3 | 133A3 | 135A3 | 100A4 | 105A4 | 106A4 | 131A4 |
|---------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VN #    | 8.00   | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00   | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  |
| SiO2    | 55.71  | 54.64 | 53.82 | 54.64 | 54.94 | 53.69 | 54.97 | 55.23 | 55.66  | 53.93 | 54.91 | 53.60 | 54.20 | 54.64 | 54.77 | 54.90 |
| TiO2    | 0.62   | 0.61  | 0.60  | 0.57  | 0.61  | 0.62  | 0.54  | 0.55  | 0.59   | 0.57  | 0.58  | 0.56  | 0.65  | 0.67  | 0.65  | 0.66  |
| Al2O3   | 18.85  | 19.04 | 19.18 | 21.06 | 19.77 | 19.75 | 18.33 | 18.29 | 18.84  | 18.25 | 18.73 | 18.17 | 20.95 | 20.34 | 20.96 | 20.58 |
| FeO     | 7.36   | 7.19  | 7.22  | 6.22  | 6.54  | 7.55  | 7.54  | 7.66  | 7.76   | 7.65  | 7.61  | 7.66  | 6.39  | 6.67  | 6.30  | 6.95  |
| MnO     | 0.15   | 0.15  | 0.15  | 0.13  | 0.14  | 0.16  | 0.20  | 0.20  | 0.19   | 0.19  | 0.19  | 0.19  | 0.14  | 0.14  | 0.13  | 0.15  |
| MgO     | 4.78   | 4.76  | 4.81  | 2.70  | 3.23  | 4.16  | 4.43  | 4.53  | 4.65   | 4.58  | 4.52  | 4.64  | 2.55  | 2.82  | 2.30  | 2.77  |
| CaO     | 8.82   | 9.04  | 9.25  | 9.49  | 8.97  | 9.76  | 9.25  | 9.09  | 9.41   | 9.09  | 9.18  | 9.21  | 9.36  | 8.96  | 9.56  | 9.40  |
| Na2O    | 3.16   | 3.08  | 2.99  | 3.30  | 3.28  | 3.01  | 2.84  | 2.88  | 2.89   | 2.76  | 2.87  | 2.75  | 3.25  | 3.25  | 3.33  | 3.23  |
| K2O     | 0.65   | 0.64  | 0.59  | 0.63  | 0.65  | 0.56  | 0.52  | 0.53  | 0.51   | 0.48  | 0.51  | 0.48  | 0.63  | 0.71  | 0.72  | 0.53  |
| P2O5    | 0.19   | 0.18  | 0.17  | 0.20  | 0.19  | 0.19  | 0.20  | 0.21  | 0.21   | 0.20  | 0.20  | 0.21  | 0.21  | 0.21  | 0.23  | 0.23  |
| Total   | 100.29 | 99.33 | 98.78 | 98.94 | 98.32 | 99.45 | 98.82 | 99.17 | 100.71 | 97.70 | 99.30 | 97.47 | 98.33 | 98.41 | 98.95 | 99.40 |
| Rb      | 13     | 5     | 10    | 11    | 10    | 11    | 9     | 8     | 10     | 10    | 8     | 9     | 8     | 14    | 11    | 9     |
| Ba      | 563    | 569   | 505   | 539   | 595   | 467   | 399   | 399   | 446    | 398   | 406   | 395   | 588   | 566   | 558   | 489   |
| Sr      | 768    | 755   | 713   | 756   | 770   | 694   | 655   | 654   | 701    | 659   | 671   | 677   | 749   | 715   | 751   | 736   |
| V       | 200    | 188   | 193   | 142   | 170   | 189   | 155   | 154   | 185    | 135   | 168   | 165   | 176   | 187   | 168   | 187   |
| Cr      | 62     | 51    | 54    | 17    | 28    | 39    | 37    | 36    | 42     | 36    | 36    | 36    | 9     | 10    | 7     | 10    |
| Ni      | 48     | 39    | 54    | 17    | 24    | 20    | 17    | 16    | 23     | 18    | 19    | 52    | 7     | 6     | 4     | 5     |
| Zr      | 63     | 63    | 57    | 51    | 53    | 49    | 51    | 45    | 50     | 43    | 44    | 44    | 54    | 63    | 57    | 51    |
| Sc      | 23     | 22    | 23    | 17    | 19    | 21    | 20    | 20    | 22     | 21    | 21    | 22    | 20    | 21    | 19    | 20    |
| Cu      | 104    | 89    | 52    | 84    | 89    | 78    | 55    | 61    | 37     | 57    | 65    | 77    | 125   | 101   | 112   | 84    |
| FeO*    | 7.36   | 7.19  | 7.22  | 6.22  | 6.54  | 7.55  | 7.54  | 7.66  | 7.76   | 7.65  | 7.61  | 7.66  | 6.39  | 6.67  | 6.30  | 6.95  |
| Mg#     | 53.67  | 54.14 | 54.30 | 43.63 | 46.83 | 49.56 | 51.17 | 51.33 | 51.66  | 51.64 | 51.44 | 51.93 | 41.57 | 42.98 | 39.43 | 41.54 |
| Density | 2.57   | 2.57  | 2.58  | 2.55  | 2.55  | 2.58  | 2.58  | 2.58  | 2.58   | 2.58  | 2.58  | 2.58  | 2.55  | 2.55  | 2.55  | 2.56  |

| Sample  | 84AA4 | 123LA | 124LA | 132LA | 150LA | C1    | C2    | 154   | 157   | 158   | 130   | 153   | 141   | 142   | 52B   | 127   |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VN #    | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  |
| SiO2    | 53.69 | 52.70 | 54.06 | 53.22 | 61.39 | 54.06 | 52.15 | 52.39 | 52.93 | 56.15 | 51.91 | 49.93 | 49.11 | 50.07 | 49.24 | 49.88 |
| TiO2    | 0.63  | 0.66  | 0.67  | 0.68  | 0.43  | 0.59  | 0.61  | 0.60  | 0.62  | 0.53  | 0.65  | 0.65  | 0.72  | 0.76  | 0.77  | 0.72  |
| Al2O3   | 19.91 | 19.11 | 18.55 | 18.24 | 17.34 | 18.97 | 18.75 | 19.45 | 19.12 | 18.86 | 18.42 | 18.81 | 19.94 | 19.71 | 18.78 | 19.75 |
| FeO     | 7.80  | 8.14  | 8.22  | 7.78  | 5.37  | 7.76  | 7.93  | 8.19  | 8.12  | 7.40  | 8.93  | 8.42  | 8.23  | 8.94  | 9.53  | 8.57  |
| MnO     | 0.17  | 0.16  | 0.17  | 0.16  | 0.22  | 0.17  | 0.16  | 0.18  | 0.17  | 0.20  | 0.19  | 0.18  | 0.16  | 0.19  | 0.19  | 0.18  |
| MgO     | 4.51  | 5.09  | 4.67  | 4.69  | 2.19  | 4.17  | 5.42  | 4.84  | 5.58  | 3.44  | 6.35  | 6.01  | 4.13  | 4.74  | 5.53  | 4.91  |
| CaO     | 9.50  | 9.48  | 8.82  | 9.05  | 6.37  | 7.92  | 9.64  | 9.12  | 9.70  | 6.32  | 9.50  | 9.36  | 10.04 | 10.62 | 10.58 | 9.90  |
| Na2O    | 2.88  | 2.85  | 3.02  | 2.94  | 3.70  | 3.03  | 2.75  | 2.79  | 2.79  | 3.02  | 2.61  | 2.46  | 2.77  | 2.74  | 2.50  | 2.76  |
| K2O     | 0.43  | 0.51  | 0.61  | 0.67  | 0.63  | 0.61  | 0.56  | 0.60  | 0.62  | 0.51  | 0.43  | 0.31  | 1.13  | 1.13  | 0.89  | 1.09  |
| P2O5    | 0.19  | 0.19  | 0.17  | 0.18  | 0.31  | 0.20  | 0.18  | 0.18  | 0.18  | 0.14  | 0.18  | 0.19  | 0.26  | 0.27  | 0.19  | 0.26  |
| Total   | 99.71 | 98.89 | 98.96 | 97.61 | 97.95 | 97.48 | 98.15 | 98.34 | 99.83 | 96.57 | 99.17 | 96.32 | 96.49 | 99.17 | 98.20 | 98.02 |
| Rb      | 8     | 8     | 12    | 13    | 11    | 11    | 10    | 12    | 13    | 9     | 8     | 3     | 20    | 21    | 15    | 19    |
| Ba      | 440   | 439   | 451   | 478   | 564   | 534   | 460   | 448   | 487   | 434   | 389   | 495   | 920   | 909   | 527   | 927   |
| Sr      | 683   | 693   | 542   | 624   | 658   | 589   | 704   | 626   | 468   | 468   | 668   | 691   | 1002  | 982   | 667   | 1014  |
| V       | 204   | 204   | 225   | 225   | 31    | 179   | 218   | 179   | 126   | 126   | 242   | 192   | 256   | 281   | 316   | 284   |
| Cr      | 44    | 28    | 26    | 34    | 16    | 24    | 78    | 33    | 7     | 7     | 50    | 83    | 10    | 29    | 17    | 32    |
| Ni      | 26    | 29    | 42    | 20    | 7     | 17    | 34    | 19    | 2     | 2     | 37    | 33    | 12    | 29    | 22    | 17    |
| Zr      | 51    | 44    | 54    | 58    | 65    | 53    | 50    | 57    | 47    | 47    | 58    | 51    | 72    | 73    | 68    | 87    |
| Sc      | 22    | 23    | 26    | 26    | 9     | 20    | 26    | 22    | 16    | 16    | 29    | 26    | 24    | 27    | 32    | 27    |
| Cu      | 72    | 99    | 96    | 69    | 1     | 56    | 71    | 64    | 43    | 43    | 53    | 85    | 107   | 111   | 122   | 136   |
| FeO*    | 7.80  | 8.14  | 8.22  | 7.78  | 5.37  | 7.76  | 7.93  | 8.19  | 8.12  | 7.40  | 8.93  | 8.42  | 8.23  | 8.94  | 9.53  | 8.57  |
| Mg#     | 50.77 | 52.72 | 50.33 | 51.81 | 42.10 | 48.93 | 54.93 | 51.31 | 55.07 | 45.32 | 55.91 | 56.01 | 47.23 | 48.60 | 50.86 | 50.54 |
| Density | 2.59  | 2.60  | 2.59  | 2.58  | 2.48  | 2.57  | 2.60  | 2.60  | 2.60  | 2.54  | 2.62  | 2.63  | 2.61  | 2.63  | 2.64  | 2.62  |



| Sample  | ET3   | ET3   | ET4   | ET5   | ET5   | ET6   | ET7   | ET8   | ET9   | MA1   | ME2   | MA3   | MA01  | ME02  | MA03  | MA04  |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VN #    | 4.00  | 4.00  | 4.00  | 4.00  | 4.00  | 4.00  | 4.00  | 4.00  | 4.00  | 3.00  | 4.00  | 3.00  | 3.00  | 4.00  | 3.00  | 3.00  |
| SiO2    | 52.40 | 52.88 | 60.14 | 58.83 | 63.24 | 51.44 | 63.57 | 54.29 | 56.50 | 51.44 | 51.52 | 52.40 | 51.44 | 51.52 | 52.40 | 52.40 |
| TiO2    | 0.58  | 0.60  | 0.49  | 0.46  | 0.38  | 0.56  | 0.33  | 0.53  | 0.48  | 0.56  | 0.75  | 0.69  | 0.56  | 0.75  | 0.69  | 0.58  |
| Al2O3   | 20.11 | 19.42 | 17.95 | 18.43 | 17.64 | 18.18 | 17.34 | 19.13 | 18.67 | 18.18 | 20.15 | 17.84 | 18.18 | 20.15 | 17.84 | 20.11 |
| Fe2O3   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 5.42  | 2.89  | 3.54  | 5.42  | 2.89  | 3.54  | 3.29  |
| FeO     | 8.14  | 8.10  | 6.62  | 7.13  | 5.44  | 9.09  | 5.44  | 7.79  | 7.94  | 3.67  | 5.69  | 5.62  | 3.67  | 5.69  | 5.62  | 4.85  |
| MnO     | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.12  | 0.18  | 0.00  | 0.12  | 0.18  | 0.00  |
| MgO     | 4.74  | 4.73  | 2.43  | 2.68  | 1.83  | 6.48  | 1.85  | 4.06  | 3.20  | 6.48  | 4.98  | 6.05  | 6.48  | 4.98  | 6.05  | 4.74  |
| CaO     | 10.38 | 9.67  | 6.68  | 7.50  | 5.97  | 9.89  | 6.35  | 9.40  | 8.12  | 9.89  | 10.30 | 9.74  | 9.89  | 10.30 | 9.74  | 10.38 |
| Na2O    | 2.69  | 2.86  | 4.08  | 3.55  | 4.05  | 2.02  | 3.41  | 2.69  | 3.11  | 2.02  | 2.51  | 2.46  | 2.02  | 2.51  | 2.46  | 2.69  |
| K2O     | 0.42  | 0.49  | 0.82  | 0.65  | 0.89  | 0.31  | 0.72  | 0.56  | 0.52  | 0.31  | 0.29  | 0.48  | 0.31  | 0.29  | 0.48  | 0.42  |
| P2O5    | 0.14  | 0.14  | 0.21  | 0.17  | 0.22  | 0.12  | 0.17  | 0.14  | 0.15  | 0.12  | 0.14  | 0.20  | 0.12  | 0.14  | 0.20  | 0.14  |
| H2O+    | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.54  | 0.53  | 0.00  | 0.54  | 0.53  | 0.00  |
| Total   | 99.60 | 98.89 | 99.42 | 99.40 | 99.66 | 98.09 | 99.18 | 98.59 | 98.69 | 98.09 | 99.88 | 99.73 | 98.09 | 99.88 | 99.73 | 99.60 |
| FeO*    | 8.14  | 8.10  | 6.62  | 7.13  | 5.44  | 9.09  | 5.44  | 7.79  | 7.94  | 8.55  | 8.29  | 8.81  | 8.55  | 8.29  | 8.81  | 7.81  |
| Mg#     | 50.94 | 51.01 | 39.56 | 40.13 | 37.49 | 55.97 | 37.75 | 48.17 | 41.81 | 57.49 | 51.72 | 55.06 | 57.49 | 51.72 | 55.06 | 51.98 |
| Density | 2.60  | 2.59  | 2.50  | 2.52  | 2.47  | 2.63  | 2.47  | 2.58  | 2.55  | 2.62  | 2.61  | 2.62  | 2.62  | 2.61  | 2.62  | 2.60  |

| Sample  | 1      | 2      | 3      | 4      | 5     | 6     | 7      | 1A    | 2A     | 3A     | 4A     | 5A     | 6A     | 7A     | ET1   | ET2   |
|---------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| VN #    | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00   | 1.00  | 1.00  | 1.00   | 4.00  | 4.00   | 4.00   | 4.00   | 4.00   | 4.00   | 4.00   | 4.00  | 4.00  |
| SiO2    | 56.31  | 55.95  | 54.02  | 54.43  | 53.61 | 54.85 | 59.27  | 54.30 | 54.45  | 54.29  | 54.41  | 54.58  | 54.28  | 54.34  | 56.15 | 62.32 |
| TiO2    | 0.54   | 0.56   | 0.61   | 0.72   | 0.47  | 0.54  | 0.39   | 0.64  | 0.64   | 0.62   | 0.66   | 0.64   | 0.63   | 0.62   | 0.52  | 0.38  |
| Al2O3   | 20.38  | 20.24  | 20.08  | 19.36  | 19.91 | 21.07 | 18.49  | 19.50 | 19.47  | 19.45  | 19.59  | 19.50  | 19.44  | 19.57  | 20.75 | 18.18 |
| Fe2O3   | 2.66   | 3.81   | 4.38   | 3.00   | 3.95  | 1.87  | 3.02   | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00  |
| FeO     | 3.96   | 3.06   | 3.31   | 4.72   | 4.17  | 4.73  | 3.76   | 7.32  | 7.27   | 7.26   | 7.21   | 7.20   | 7.31   | 7.22   | 6.19  | 5.45  |
| MnO     | 0.14   | 0.14   | 0.20   | 0.16   | 0.16  | 0.12  | 0.20   | 0.15  | 0.16   | 0.16   | 0.16   | 0.17   | 0.16   | 0.16   | 0.00  | 0.00  |
| MgO     | 2.91   | 3.10   | 4.25   | 4.82   | 4.42  | 2.93  | 2.53   | 4.67  | 4.87   | 4.91   | 4.83   | 4.82   | 4.96   | 4.85   | 2.56  | 1.99  |
| CaO     | 9.09   | 9.09   | 9.64   | 9.28   | 9.39  | 9.37  | 7.21   | 9.41  | 9.45   | 9.38   | 9.54   | 9.39   | 9.36   | 9.42   | 8.98  | 6.52  |
| Na2O    | 3.42   | 3.35   | 3.06   | 3.02   | 2.98  | 3.37  | 3.61   | 3.07  | 2.90   | 3.01   | 2.85   | 2.89   | 2.97   | 2.99   | 3.45  | 3.83  |
| K2O     | 0.66   | 0.66   | 0.60   | 0.52   | 0.56  | 0.65  | 0.71   | 0.61  | 0.62   | 0.69   | 0.63   | 0.64   | 0.72   | 0.75   | 0.68  | 0.78  |
| P2O5    | 0.16   | 0.17   | 0.12   | 0.14   | 0.15  | 0.14  | 0.17   | 0.16  | 0.16   | 0.12   | 0.16   | 0.16   | 0.14   | 0.11   | 0.14  | 0.19  |
| H2O+    | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.10   | 0.17  | 0.00  | 0.58   | 0.00  | 0.08   | 0.12   | 0.05   | 0.07   | 0.12   | 0.11   | 0.00  | 0.00  |
| H2O-    | 0.03   | 0.05   | 0.05   | 0.06   | 0.05  | 0.06  | 0.09   | 0.05  | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.01   | 0.03   | 0.03   | 0.00  | 0.00  |
| Total   | 100.26 | 100.18 | 100.32 | 100.33 | 99.99 | 99.70 | 100.03 | 99.88 | 100.09 | 100.03 | 100.11 | 100.07 | 100.12 | 100.17 | 99.42 | 99.64 |
| FeO*    | 6.35   | 6.49   | 7.25   | 7.42   | 7.72  | 6.41  | 6.48   | 7.32  | 7.27   | 7.26   | 7.21   | 7.20   | 7.31   | 7.22   | 6.19  | 5.45  |
| Mg#     | 44.96  | 46.00  | 51.11  | 53.67  | 50.51 | 44.90 | 41.05  | 53.22 | 54.44  | 54.67  | 54.44  | 54.42  | 54.75  | 54.50  | 42.44 | 39.43 |
| Density | 2.54   | 2.55   | 2.58   | 2.58   | 2.58  | 2.55  | 2.51   | 2.58  | 2.58   | 2.58   | 2.58   | 2.58   | 2.58   | 2.58   | 2.53  | 2.48  |

| Sample  | MA05  | MA06  | ME07  | ME08   | MA09  | MA10   | MA11  | ME12   | HE13  | MA14  | MA15  | ME16  | MA17  | MA18  | MA19  | MA20  |
|---------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VN #    | 3.00  | 3.00  | 4.00  | 4.00   | 3.00  | 3.00   | 3.00  | 4.00   | 2.00  | 3.00  | 3.00  | 4.00  | 3.00  | 3.00  | 3.00  | 3.00  |
| SiO2    | 52.88 | 53.60 | 53.61 | 54.02  | 54.05 | 54.25  | 54.29 | 54.43  | 54.51 | 54.60 | 54.65 | 54.85 | 54.90 | 55.05 | 55.15 | 55.65 |
| TiO2    | 0.60  | 0.62  | 0.47  | 0.61   | 0.62  | 0.65   | 0.53  | 0.72   | 0.59  | 0.59  | 0.61  | 0.54  | 0.65  | 0.61  | 0.61  | 0.61  |
| Al2O3   | 19.42 | 18.74 | 19.91 | 20.08  | 18.72 | 18.56  | 19.13 | 19.38  | 19.64 | 18.48 | 17.96 | 21.07 | 18.34 | 18.67 | 18.33 | 19.62 |
| Fe2O3   | 3.26  | 2.82  | 3.95  | 4.38   | 3.18  | 2.78   | 3.15  | 3.00   | 2.58  | 3.42  | 3.21  | 1.87  | 3.57  | 3.07  | 4.25  | 2.94  |
| FeO     | 4.83  | 5.60  | 4.17  | 3.31   | 5.04  | 5.20   | 4.64  | 4.72   | 4.42  | 4.68  | 4.88  | 4.73  | 4.52  | 4.68  | 3.68  | 4.01  |
| MnO     | 0.00  | 0.17  | 0.16  | 0.20   | 0.16  | 0.16   | 0.00  | 0.16   | 0.00  | 0.19  | 0.17  | 0.12  | 0.16  | 0.16  | 0.16  | 0.14  |
| MgO     | 4.73  | 5.05  | 4.42  | 4.25   | 4.88  | 5.29   | 4.06  | 4.82   | 5.33  | 4.75  | 5.25  | 2.93  | 4.37  | 4.83  | 4.77  | 2.92  |
| CaO     | 9.67  | 9.44  | 9.39  | 9.64   | 9.18  | 9.34   | 9.40  | 9.28   | 8.99  | 8.96  | 9.30  | 9.37  | 8.83  | 8.75  | 8.90  | 9.16  |
| Na2O    | 2.86  | 2.64  | 2.98  | 3.06   | 2.80  | 2.73   | 2.69  | 3.02   | 2.62  | 2.72  | 2.77  | 3.37  | 2.77  | 2.85  | 2.89  | 3.12  |
| K2O     | 0.49  | 0.46  | 0.56  | 0.60   | 0.64  | 0.83   | 0.56  | 0.52   | 0.59  | 0.58  | 0.65  | 0.65  | 0.66  | 0.63  | 0.64  | 0.69  |
| P2O5    | 0.14  | 0.20  | 0.15  | 0.12   | 0.19  | 0.19   | 0.14  | 0.14   | 0.00  | 0.20  | 0.17  | 0.14  | 0.17  | 0.19  | 0.19  | 0.23  |
| H2O+    | 0.00  | 0.41  | 0.22  | 0.05   | 0.22  | 0.18   | 0.00  | 0.16   | 0.26  | 0.39  | 0.18  | 0.06  | 0.15  | 0.18  | 0.18  | 0.46  |
| Total   | 98.88 | 99.75 | 99.99 | 100.32 | 99.68 | 100.16 | 98.59 | 100.35 | 99.53 | 99.56 | 99.80 | 99.70 | 99.09 | 99.67 | 99.75 | 99.55 |
| FeO*    | 7.76  | 8.14  | 7.72  | 7.25   | 7.90  | 7.70   | 7.47  | 7.42   | 6.74  | 7.76  | 7.77  | 6.41  | 7.73  | 7.44  | 7.50  | 6.66  |
| Mg#     | 52.07 | 52.53 | 50.51 | 51.11  | 52.41 | 55.06  | 49.20 | 53.67  | 58.51 | 52.20 | 54.65 | 44.90 | 50.20 | 53.65 | 53.13 | 43.89 |
| Density | 2.59  | 2.60  | 2.58  | 2.58   | 2.59  | 2.59   | 2.57  | 2.58   | 2.57  | 2.58  | 2.58  | 2.55  | 2.57  | 2.57  | 2.57  | 2.55  |

| Sample  | ME21   | ME22  | MA23  | ME24   | MA25  | MA26  | ME27   | MA28  | MA29  | MA30  | HE32   | HE33  | CHAT01 | CHAT02 | CHAT03 | CHAT04 |
|---------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| VN #    | 4.00   | 4.00  | 3.00  | 3.00   | 3.00  | 3.00  | 4.00   | 3.00  | 3.00  | 3.00  | 2.00   | 2.00  | 5.00   | 5.00   | 5.00   | 5.00   |
| SiO2    | 55.95  | 55.97 | 56.15 | 56.31  | 56.50 | 58.83 | 59.27  | 60.14 | 62.32 | 63.24 | 73.62  | 73.69 | 49.38  | 52.32  | 52.58  | 53.63  |
| TiO2    | 0.56   | 0.45  | 0.52  | 0.54   | 0.48  | 0.46  | 0.39   | 0.49  | 0.38  | 0.33  | 0.89   | 0.90  | 0.76   | 0.60   | 0.69   | 0.78   |
| Al2O3   | 20.24  | 20.80 | 20.75 | 20.38  | 18.67 | 18.43 | 18.49  | 17.95 | 18.18 | 17.34 | 11.47  | 11.54 | 20.54  | 20.68  | 19.98  | 19.10  |
| Fe2O3   | 3.81   | 2.36  | 2.50  | 2.66   | 3.21  | 2.88  | 3.02   | 2.67  | 2.20  | 2.20  | 1.23   | 1.27  | 5.49   | 3.33   | 3.81   | 4.23   |
| FeO     | 3.06   | 4.25  | 3.69  | 3.96   | 4.73  | 4.25  | 3.76   | 3.95  | 3.25  | 3.24  | 1.73   | 1.79  | 3.70   | 4.66   | 4.48   | 4.28   |
| MnO     | 0.14   | 0.14  | 0.00  | 0.14   | 0.00  | 0.00  | 0.20   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.07   | 0.04  | 0.00   | 0.16   | 0.16   | 0.20   |
| MgO     | 3.10   | 2.85  | 2.56  | 2.91   | 3.20  | 2.68  | 2.53   | 2.43  | 1.99  | 1.85  | 0.20   | 0.05  | 4.75   | 4.51   | 4.17   | 4.89   |
| CaO     | 9.09   | 8.87  | 8.98  | 9.09   | 8.12  | 7.50  | 7.21   | 6.68  | 6.52  | 6.35  | 1.51   | 0.06  | 10.13  | 10.00  | 9.98   | 9.22   |
| Na2O    | 3.35   | 3.36  | 3.45  | 3.42   | 3.11  | 3.55  | 3.61   | 4.08  | 3.83  | 3.41  | 4.50   | 1.93  | 2.35   | 2.87   | 3.10   | 2.95   |
| K2O     | 0.66   | 0.67  | 0.68  | 0.66   | 0.52  | 0.65  | 0.71   | 0.82  | 0.78  | 0.72  | 2.82   | 4.81  | 0.95   | 0.25   | 0.65   | 0.53   |
| P2O5    | 0.17   | 0.16  | 0.14  | 0.16   | 0.15  | 0.17  | 0.17   | 0.21  | 0.19  | 0.17  | 0.58   | 0.00  | 0.00   | 0.26   | 0.52   | 0.16   |
| H2O+    | 0.05   | 0.10  | 0.00  | 0.03   | 0.00  | 0.00  | 0.67   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 2.16   | 0.00  | 0.86   | 0.67   | 0.22   | 0.04   |
| Total   | 100.18 | 99.98 | 99.42 | 100.26 | 98.69 | 99.40 | 100.03 | 99.42 | 99.64 | 98.85 | 100.78 | 96.08 | 98.91  | 100.31 | 100.34 | 100.01 |
| FeO*    | 6.49   | 6.37  | 5.94  | 6.35   | 7.62  | 6.84  | 6.48   | 6.35  | 5.23  | 5.22  | 2.84   | 2.93  | 8.64   | 7.66   | 7.91   | 8.09   |
| Mg#     | 46.00  | 44.36 | 43.46 | 44.96  | 42.82 | 41.12 | 41.05  | 40.55 | 40.42 | 38.72 | 11.17  | 2.95  | 49.51  | 51.23  | 48.46  | 51.89  |
| Density | 2.55   | 2.54  | 2.53  | 2.54   | 2.55  | 2.52  | 2.51   | 2.50  | 2.47  | 2.47  | 2.36   | 2.33  | 2.62   | 2.60   | 2.60   | 2.59   |

| Sample  | CHAT05 | CHAT06 | CHAT07 | CHAT09 | ARE1   | ARE2  | AR3   | AR4   | LVC-C1 | LVC-C2 | LVC-15 | LVC-15 | LVC-15 | LVC-13 | LVC-15 | LVC-ET |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| VN #    | 5.00   | 5.00   | 5.00   | 5.00   | 4.00   | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   |
| SiO2    | 54.25  | 54.53  | 55.20  | 56.19  | 73.62  | 72.72 | 73.00 | 73.60 | 54.06  | 52.15  | 52.39  | 52.93  | 56.15  | 51.91  | 49.93  | 55.82  |
| TiO2    | 0.46   | 0.59   | 0.61   | 0.54   | 0.89   | 0.79  | 0.79  | 0.60  | 0.59   | 0.61   | 0.60   | 0.62   | 0.53   | 0.65   | 0.65   | 0.54   |
| Al2O3   | 21.73  | 19.64  | 19.17  | 18.78  | 11.47  | 11.23 | 11.20 | 11.70 | 18.97  | 18.75  | 19.45  | 19.12  | 18.86  | 18.42  | 18.81  | 20.19  |
| Fe2O3   | 1.06   | 2.58   | 3.20   | 4.24   | 1.23   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| FeO     | 5.23   | 4.42   | 4.59   | 3.47   | 1.73   | 3.03  | 3.34  | 2.52  | 7.76   | 7.93   | 8.19   | 8.12   | 7.40   | 8.93   | 8.42   | 5.94   |
| MnO     | 0.13   | 0.00   | 0.15   | 0.00   | 0.07   | 0.12  | 0.00  | 0.07  | 0.17   | 0.16   | 0.18   | 0.17   | 0.20   | 0.19   | 0.18   | 0.14   |
| MgO     | 6.12   | 5.33   | 4.93   | 3.93   | 0.20   | 0.14  | 0.14  | 0.09  | 4.17   | 5.42   | 4.84   | 5.58   | 3.44   | 6.35   | 6.01   | 2.64   |
| CaO     | 8.04   | 8.99   | 9.07   | 8.88   | 1.51   | 0.58  | 0.77  | 0.63  | 7.92   | 9.64   | 9.12   | 9.70   | 6.32   | 9.50   | 9.36   | 9.22   |
| Na2O    | 2.76   | 2.62   | 2.96   | 2.68   | 2.82   | 2.72  | 2.65  | 2.77  | 3.03   | 2.75   | 2.79   | 2.79   | 3.02   | 2.61   | 2.46   | 3.30   |
| K2O     | 0.55   | 0.59   | 0.61   | 0.43   | 4.50   | 5.18  | 5.22  | 5.32  | 0.61   | 0.56   | 0.60   | 0.62   | 0.51   | 0.43   | 0.31   | 0.67   |
| P2O5    | 0.21   | 0.00   | 0.15   | 0.00   | 0.58   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.20   | 0.18   | 0.18   | 0.18   | 0.14   | 0.18   | 0.19   | 0.18   |
| H2O+    | 0.00   | 0.13   | 0.00   | 0.36   | 1.79   | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| Total   | 100.54 | 99.42  | 100.64 | 99.50  | 100.41 | 96.51 | 97.11 | 97.30 | 97.48  | 98.15  | 98.34  | 99.83  | 96.57  | 99.17  | 96.32  | 98.64  |
| FeO*    | 6.18   | 6.74   | 7.47   | 7.29   | 2.84   | 3.03  | 3.34  | 2.52  | 7.76   | 7.93   | 8.19   | 8.12   | 7.40   | 8.93   | 8.42   | 5.94   |
| Mg#     | 63.84  | 58.51  | 54.07  | 49.03  | 11.17  | 7.61  | 6.95  | 5.99  | 48.93  | 54.93  | 51.31  | 55.07  | 45.32  | 55.91  | 56.01  | 44.21  |
| Density | 2.57   | 2.57   | 2.58   | 2.56   | 2.36   | 2.34  | 2.34  | 2.33  | 2.57   | 2.60   | 2.60   | 2.60   | 2.54   | 2.62   | 2.63   | 2.54   |

| Sample  | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET | LVC-ET |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| VN #    | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   |
| SI02    | 61.71  | 61.01  | 50.74  | 57.56  | 57.82  | 56.09  | 58.35  | 55.54  | 55.19  | 62.42  | 56.94  | 51.29  | 62.31  | 53.55  | 59.89  | 53.82  |
| TI02    | 0.38   | 0.40   | 0.58   | 0.56   | 0.57   | 0.57   | 0.58   | 0.59   | 0.53   | 0.40   | 0.55   | 0.65   | 0.36   | 0.61   | 0.41   | 0.60   |
| Al2O3   | 16.76  | 17.41  | 20.72  | 17.46  | 17.78  | 18.03  | 17.87  | 18.64  | 19.88  | 17.21  | 18.00  | 18.98  | 17.19  | 18.77  | 18.08  | 19.18  |
| FeO     | 5.05   | 5.73   | 7.47   | 7.00   | 7.19   | 7.14   | 6.36   | 7.25   | 6.94   | 5.01   | 7.82   | 9.54   | 5.29   | 8.44   | 5.72   | 7.22   |
| MnO     | 0.21   | 0.21   | 0.15   | 0.19   | 0.18   | 0.18   | 0.17   | 0.18   | 0.17   | 0.19   | 0.21   | 0.17   | 0.22   | 0.21   | 0.20   | 0.15   |
| MgO     | 1.87   | 2.24   | 4.70   | 2.81   | 2.89   | 2.90   | 2.49   | 3.35   | 2.86   | 1.77   | 3.35   | 5.53   | 1.97   | 4.46   | 2.06   | 4.81   |
| CaO     | 5.69   | 6.67   | 10.82  | 6.88   | 7.06   | 7.53   | 6.57   | 8.14   | 8.69   | 5.63   | 8.01   | 9.74   | 6.02   | 9.15   | 6.17   | 9.25   |
| Na2O    | 3.96   | 3.72   | 2.44   | 3.75   | 3.70   | 3.48   | 3.46   | 3.36   | 3.37   | 4.19   | 3.29   | 2.37   | 3.87   | 2.74   | 3.75   | 2.99   |
| K2O     | 0.83   | 0.72   | 0.39   | 0.73   | 0.70   | 0.66   | 0.97   | 0.63   | 0.60   | 0.88   | 0.58   | 0.35   | 0.76   | 0.57   | 0.70   | 0.59   |
| P2O5    | 0.27   | 0.23   | 0.13   | 0.25   | 0.25   | 0.23   | 0.26   | 0.22   | 0.21   | 0.25   | 0.21   | 0.16   | 0.28   | 0.18   | 0.25   | 0.17   |
| Total   | 96.73  | 98.34  | 98.14  | 97.19  | 98.14  | 96.81  | 97.08  | 97.90  | 98.44  | 97.95  | 98.96  | 98.78  | 98.27  | 98.68  | 97.23  | 98.78  |
| FeO*    | 5.05   | 5.73   | 7.47   | 7.00   | 7.19   | 7.14   | 6.36   | 7.25   | 6.94   | 5.01   | 7.82   | 9.54   | 5.29   | 8.44   | 5.72   | 7.22   |
| Mg#     | 39.77  | 41.07  | 52.88  | 41.72  | 41.75  | 42.00  | 41.11  | 45.17  | 42.36  | 38.65  | 43.31  | 50.83  | 39.90  | 48.52  | 39.10  | 54.30  |
| Density | 2.47   | 2.49   | 2.61   | 2.52   | 2.53   | 2.54   | 2.51   | 2.55   | 2.55   | 2.46   | 2.55   | 2.63   | 2.47   | 2.59   | 2.49   | 2.58   |

| Sample  | LVC-AR | LVC-AR | LVC-14 | LVC-11 | LVC-13 | LVC-10 | LVC-87 | LVC-12 | LVC-13 | LVC-13 | LVC-84 | LVC-10 | LVC-10 | LVC-10 | LVC-13 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| VN #    | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   |
| SiO2    | 55.71  | 54.64  | 53.69  | 54.64  | 54.94  | 54.97  | 55.23  | 55.66  | 53.93  | 54.91  | 53.60  | 53.69  | 54.20  | 54.64  | 54.77  |
| TiO2    | 0.62   | 0.61   | 0.62   | 0.57   | 0.61   | 0.54   | 0.55   | 0.59   | 0.55   | 0.58   | 0.56   | 0.63   | 0.65   | 0.67   | 0.65   |
| Al2O3   | 18.85  | 19.04  | 19.75  | 21.06  | 19.77  | 18.33  | 18.29  | 18.84  | 18.25  | 18.73  | 18.17  | 19.91  | 20.95  | 20.34  | 20.96  |
| FeO     | 7.36   | 7.19   | 7.55   | 6.22   | 6.54   | 7.54   | 7.66   | 7.76   | 7.65   | 7.61   | 7.66   | 7.80   | 6.39   | 6.67   | 6.30   |
| MnO     | 0.15   | 0.15   | 0.16   | 0.13   | 0.14   | 0.20   | 0.20   | 0.19   | 0.19   | 0.19   | 0.19   | 0.17   | 0.14   | 0.14   | 0.13   |
| MgO     | 4.78   | 4.76   | 4.16   | 2.70   | 3.23   | 4.43   | 4.53   | 4.65   | 4.58   | 4.52   | 4.64   | 4.51   | 2.55   | 2.82   | 2.30   |
| CaO     | 8.82   | 9.04   | 9.76   | 9.49   | 8.97   | 9.25   | 9.09   | 9.41   | 9.09   | 9.18   | 9.21   | 9.50   | 9.36   | 8.96   | 9.56   |
| Na2O    | 3.16   | 3.08   | 3.01   | 3.30   | 3.28   | 2.84   | 2.88   | 2.89   | 2.76   | 2.87   | 2.75   | 2.88   | 3.25   | 3.25   | 3.33   |
| K2O     | 0.65   | 0.64   | 0.56   | 0.63   | 0.65   | 0.52   | 0.53   | 0.51   | 0.48   | 0.51   | 0.48   | 0.43   | 0.63   | 0.71   | 0.72   |
| P2O5    | 0.19   | 0.18   | 0.19   | 0.20   | 0.19   | 0.20   | 0.21   | 0.21   | 0.20   | 0.20   | 0.21   | 0.19   | 0.21   | 0.21   | 0.23   |
| Total   | 100.29 | 99.33  | 99.45  | 98.94  | 98.32  | 98.82  | 99.17  | 100.71 | 97.68  | 99.30  | 97.47  | 99.71  | 98.33  | 98.41  | 99.40  |
| FeO*    | 7.36   | 7.19   | 7.55   | 6.22   | 6.54   | 7.54   | 7.66   | 7.76   | 7.65   | 7.61   | 7.66   | 7.80   | 6.39   | 6.67   | 6.30   |
| Mg#     | 53.67  | 54.14  | 49.56  | 43.63  | 46.83  | 51.17  | 51.33  | 51.66  | 51.64  | 51.44  | 51.93  | 50.77  | 41.57  | 42.98  | 39.43  |
| Density | 2.57   | 2.57   | 2.58   | 2.55   | 2.55   | 2.58   | 2.58   | 2.58   | 2.58   | 2.58   | 2.58   | 2.59   | 2.55   | 2.55   | 2.56   |

| Sample  | LVC-12 | LVC-12 | LVC-13 | LVC-15 |
|---------|--------|--------|--------|--------|
| VN #    | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   |
| SiO2    | 52.70  | 54.06  | 53.22  | 61.39  |
| TiO2    | 0.66   | 0.67   | 0.68   | 0.43   |
| Al2O3   | 19.11  | 18.55  | 18.24  | 17.34  |
| FeO     | 8.14   | 8.22   | 7.78   | 5.37   |
| MnO     | 0.16   | 0.17   | 0.16   | 0.22   |
| MgO     | 5.09   | 4.67   | 4.69   | 2.19   |
| CaO     | 9.48   | 8.82   | 9.05   | 6.37   |
| Na2O    | 2.85   | 3.02   | 2.94   | 3.70   |
| K2O     | 0.51   | 0.61   | 0.67   | 0.63   |
| P2O5    | 0.19   | 0.17   | 0.18   | 0.31   |
| Total   | 98.89  | 98.96  | 97.61  | 97.95  |
| FeO*    | 8.14   | 8.22   | 7.78   | 5.37   |
| Mg#     | 52.72  | 50.33  | 51.81  | 42.10  |
| Density | 2.60   | 2.59   | 2.58   | 2.48   |

**ANALISIS QUIMICOS DE PRODUCTOS DE LOS VOLCANES  
ARENAL Y CHATO, COSTA RICA**

Pierangelo Calegari y Sergio Chiesa  
CNR - Centro di studio di Geodinamica Alpina e Quaternaria, Via  
Mangiagalli 34, 20133, Milano, Italia

**INTRODUCCION**

Se han analizado algunas muestras recolectadas alrededor del Volcán Arenal por varios investigadores (G. Alvarado, S. Chiesa y P.Y. Gillot) entre los años 1986 y 1988. Diez análisis se refieren a pómez sacadas de niveles de caída, otras a lavas de diferente posición estratigráfica.

A pesar de que son muy numerosos los datos químicos de los productos del Volcán Arenal, creemos útil publicar estos resultados, ya que se refieren a niveles descritos en publicaciones anteriores o que se han utilizado en dataciones absolutas.

**UBICACION Y LITOLOGIA DE LAS MUESTRAS**

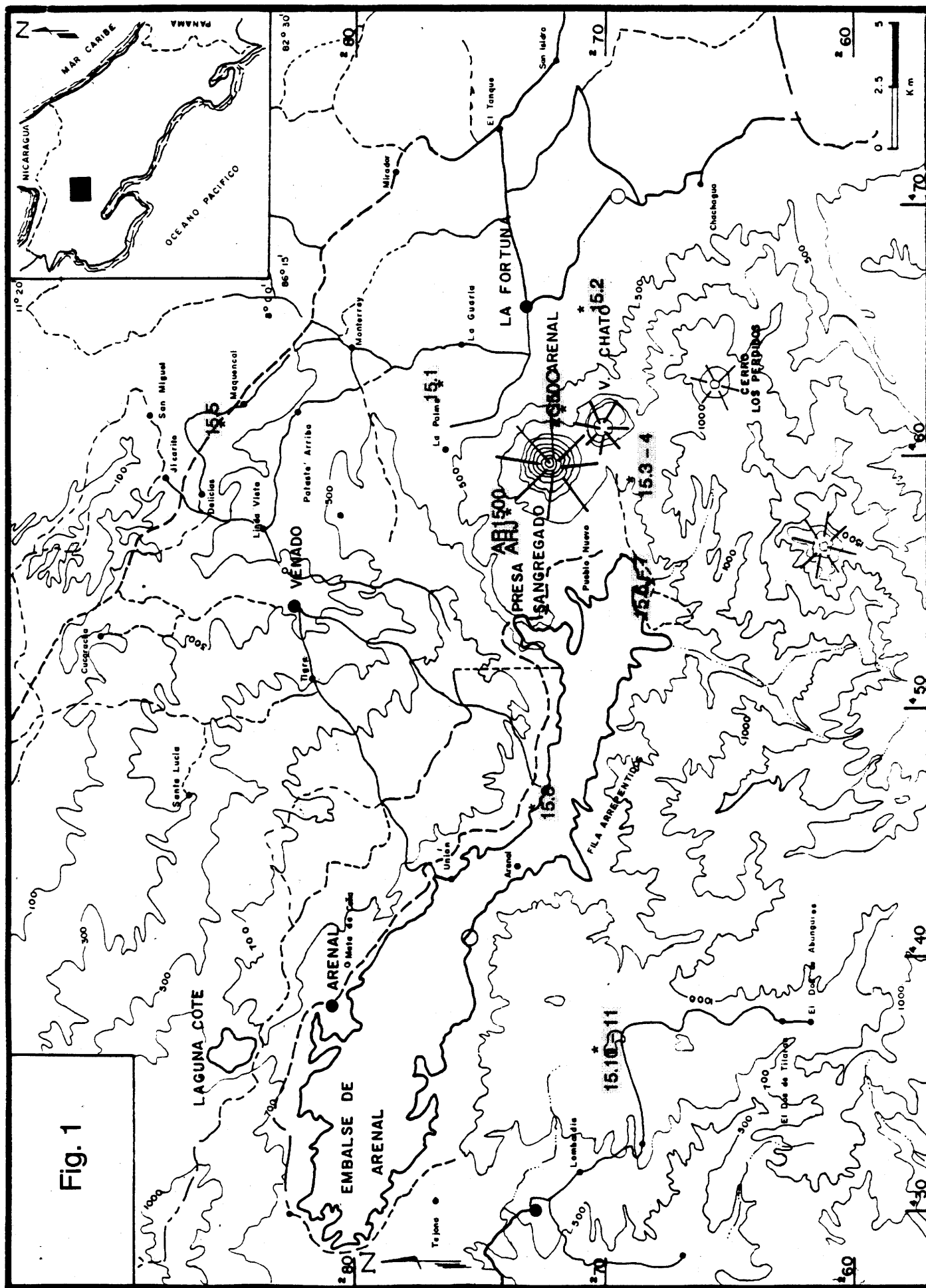
En la Fig. 1 están indicados los lugares de toma de las muestras. En seguida se da una descripción de las litologías:

-15.86.1: pómez de dimensión milimétrica, gris y gris oscuro, con cristales negros de anfíboles. Por posición estratigráfica fue relacionada al nivel ET 2 de Melson (1982). Sin embargo, con base en nuevas investigaciones efectuadas por parte de Alvarado y Ghigliotti (comun. personal), podría pertenecer a ET 5.

-15.86.2: pómez de dimensión milimétrica, gris, con cristales negros de anfíboles. Por posición estratigráfica podría pertenecer a niveles explosivos del Chato.

-15.86.3 y 4: pómez de dimensión centimétrica, gris oscuro, con cristales negros de anfíboles. Por posición estratigráfica podría pertenecer a la erupción de 1968 o al nivel ET 2 de Melson (1982).

-15.86.5: pómez de dimensión milimétrica, gris y gris oscuro, con cristales negros de anfíboles. Por posición estratigráfica podría pertenecer a los niveles ET 2 o ET 5 (Alvarado y Ghigliotti com. personal) de Melson (1982).



# Cuadro 1

| Sample | AR1500 | ARJ    | πC50C  | 15.1   | 15.2   | 15.3   | 15.4   | 15.5   | 15.6   | 15.7   | 15.8   | 15.10  | 15.11  |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Llave  | 2      | 1      | 6      | 5      | 6      | 1      | 1      | 5      | 3      | 1      | 3      | 3      | 4      |
| SiO2   | 53.71  | 54.73  | 54.65  | 59.58  | 55.88  | 56.56  | 57.19  | 58.68  | 60.86  | 58.21  | 60.04  | 60.23  | 60.60  |
| TiO2   | 0.62   | 0.58   | 0.60   | 0.49   | 0.57   | 0.54   | 0.53   | 0.52   | 0.43   | 0.49   | 0.47   | 0.46   | 0.43   |
| Al2O3  | 19.76  | 18.50  | 21.26  | 18.93  | 19.79  | 20.59  | 19.59  | 18.53  | 18.19  | 18.40  | 18.07  | 18.05  | 18.57  |
| Fe2O3  | 3.86   | 4.72   | 0.45   | 3.38   | 3.95   | 1.99   | 3.56   | 2.86   | 2.43   | 4.07   | 2.50   | 2.72   | 1.98   |
| FeO    | 4.27   | 3.84   | 6.19   | 3.81   | 4.58   | 4.96   | 4.62   | 4.77   | 4.07   | 3.86   | 4.46   | 4.12   | 4.31   |
| MnO    | 0.15   | 0.20   | 0.15   | 0.20   | 0.20   | 0.17   | 0.21   | 0.17   | 0.21   | 0.22   | 0.22   | 0.21   | 0.21   |
| MgO    | 4.35   | 4.64   | 2.54   | 2.28   | 3.00   | 2.90   | 2.89   | 2.78   | 2.33   | 2.92   | 2.56   | 2.51   | 2.61   |
| CaO    | 9.67   | 8.95   | 9.13   | 6.74   | 7.78   | 8.29   | 7.30   | 7.31   | 6.88   | 7.78   | 7.41   | 7.25   | 7.03   |
| Na2O   | 2.91   | 3.15   | 3.63   | 3.66   | 3.21   | 3.24   | 3.32   | 3.52   | 3.68   | 3.25   | 3.37   | 3.52   | 3.40   |
| K2O    | 0.53   | 0.52   | 1.20   | 0.65   | 0.48   | 0.56   | 0.55   | 0.62   | 0.72   | 0.60   | 0.67   | 0.71   | 0.66   |
| P2O5   | 0.16   | 0.19   | 0.19   | 0.26   | 0.55   | 0.20   | 0.22   | 0.24   | 0.21   | 0.20   | 0.22   | 0.22   | 0.21   |
| H2O+   | 0.35   | 0.96   | 0.78   | 0.33   | 0.53   | 1.08   | 1.79   | 1.16   | 1.26   | 0.94   | 1.34   | 1.34   | 1.39   |
| Total  | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

|    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Cr | 39  | 41  | 26  | 6   | 15  | 15  | 12  | 14  | 12  | 9   | 10  | 12  | 4   |
| Nb | 5   | 3   | 2   | 5   | 5   | 5   | 5   | 7   | 5   | 5   | 5   | 5   | 5   |
| Zr | 63  | 55  | 89  | 42  | 54  | 43  | 59  | 32  | 38  | 36  | 43  | 50  | 56  |
| Y  | 16  | 17  | 23  | 16  | 16  | 16  | 17  | 17  | 16  | 16  | 16  | 16  | 17  |
| Sr | 727 | 659 | 793 | 686 | 690 | 670 | 642 | 685 | 650 | 638 | 630 | 615 | 585 |
| Rb | 7   | 8   | 18  | 12  | 9   | 10  | 12  | 10  | 13  | 10  | 11  | 12  | 10  |
| Zn | 0   | 0   | 0   | 87  | 86  | 83  | 91  | 92  | 105 | 90  | 96  | 107 | 107 |
| Ni | 0   | 0   | 0   | 2   | 2   | 5   | 3   | 2   | 8   | 3   | 8   | 10  | 10  |
| Th | 17  | 17  | 5   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

-15.86.6: pómez bien vesiculadas de dimensión centimétrica, gris oscuro, con cristales de plagioclasas y anfíboles. Por posición estratigráfica podría pertenecer al nivel ET 2 de Melson (1982).

-15.86.7: pómez densas de dimensión centimétrica, con pocos cristales negros de anfíboles. Por posición estratigráfica podría pertenecer a la erupción de 1968.

-15.86.8: pómez de dimensión milimétrica, gris y gris oscuro, con pocos cristales de plagioclasas y raros de anfíboles. Por posición estratigráfica podría pertenecer al nivel ET 2 de Melson (1982).

-15.86.10: pómez de dimensión milimétrica, gris oscuro, con raros cristales de anfíboles. Por posición estratigráfica podría pertenecer al nivel ET 2 de Melson (1982).

-15.86.11: pómez de dimensión milimétrica, gris, con raros cristales de anfíboles. Por posición estratigráfica podría pertenecer al nivel ET 4 de Melson (1982).

-ARJ: lava muy porfirítica con cristallitos de plagioclasas y piroxenos, con raros fenocristales de hornblendas. Son bloques de la nube ardiente del Río Tabacón.

-AR 1500: lava porfirítica con fenocristales de plagioclasas y piroxenos y raros de hornblendas. Colada de la Laguna Palma, probablemente de las más recientes anteriormente a la erupción de 1968.

- $\pi$ G50c: lava microcristalina con muchos fenocristales negros de piroxenos. Por posición estratigráfica podría relacionarse con productos del Volcán Chato.

## RESULTADOS

Los datos obtenidos están en el Cuadro 1. La "llave" indica la diferente posición estratigráfica:

- 1: piroclastitas y lavas de 1968 y sucesivas;
- 2: Lava reciente pre 1968;
- 3: ET2;
- 4: ET4;
- 5: ET5;
- 6: productos del Chato.

A cada número corresponde un símbolo en los diagramas: triángulo vacío al 1; triángulo lleno al 2; cuadrado vacío al 3; cuadrado lleno al 4; rombo vacío al 5; rombo lleno al 6.

La metodología empleada en los análisis fue Fluorescencia de Rayos X para Si, Ti, Al, Fe, Mn, Ca, P, Cr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cr, Zn, Ni y Th, y absorción atómica para K, Na y Mg.

Las piroclastitas tienen una composición muy parecida a los datos de la literatura publicada (Melson, 1982; Borgia et al., 1988). La composición de las pómez recolectadas cerca de Guaría y de Venado, al este del Volcán, es bastante diferente a la del nivel ET2 típica, como contenido en  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{FeO}$ . Esto confirmaría que en este sector se ha depositado el nivel ET5.

Las pómez de la erupción de 1968 no son homogéneas: la sílice varía desde 56,5 hasta 58,2 y variaciones significativas se observan también en el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  y  $\text{CaO}$ .

También los datos que se refieren a las lavas del Arenal están perfectamente en acuerdo con los análisis previos (Malavassi, 1979; Tournon, 1984, Reagan et al., 1987), mientras que la composición de la colada muestreada en la Quebrada Calle de Arena, en la base del Chato, exhibe valores muy anómalos en  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}$  y  $\text{MgO}$ , que son óxidos importantes para caracterizar los magmas. Con solamente un análisis y sin tener material para repetirlo, nos parece prematuro buscar su significado petrogenético. En una de las próximas misiones se obtendrán más muestras que serán analizadas, química y petrográficamente. En Tournon (1984) hay un análisis de un basalto del Chato recolectado cerca de La Fortuna, con una anomalía parecida en  $\text{K}_2\text{O}$ , así como en todos los datos sobre los productos más básicos de la literatura publicada.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los geólogos Guillermo Alvarado y Gerardo Soto por sus consejos; al CNR (Consejo de las Investigaciones de Italia) por el apoyo económico. Los análisis químicos han sido efectuados por Giuseppe Fenili del CNR de Milán. Los datos han sido trabajados con el programa IGPET de M.J. Carr (Rutgers University, E.E.U.U.).

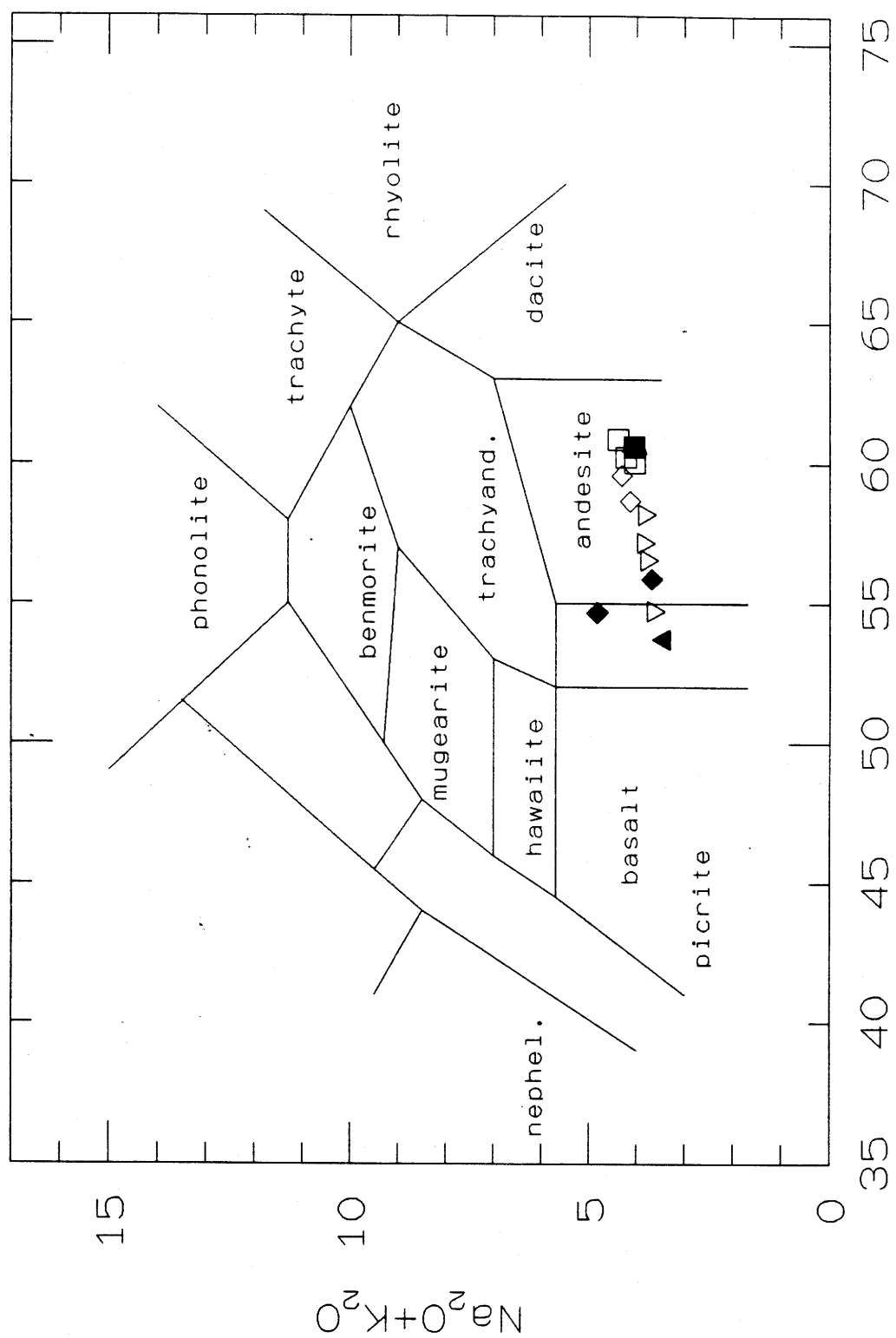
#### REFERENCIAS

- Borgia, A., Poore, C., Carr, M.J., Melson, W.G. & Alvarado, G.E., 1988: Structural, stratigraphic and petrologic aspects of the Arenal-Chato Volcanic system, Costa Rica: evolution of a young stratovolcanic complex. - Bull. Volcanol., 50: 86-105.
- Calegari, P., 1987: Caratteristiche chimiche di alcuni livelli esplosivi del vulcano Arenal, Costa Rica. - ii + 68 págs.; Università degli Studi di Milano, Dip. di Scienze della Terra, Tesis.
- Malavassi, E., 1979: Geology and petrology of Arenal Volcano, Costa Rica. - 111 págs.; Tesis de Maestría, University of Hawaii.

- Melson, W.G., 1982: Alternation between acidic and basic magmas in major explosive eruptions of Arenal volcano, Costa Rica. - Boletín de Vulcanología, Univ. Nacional, Costa Rica, 14: 65-74.
- Reagan, M.K., Gill, J.B., Malavassi, E. & Garcia, M.O., 1987: Changes in magma composition at Arenal Volcano, Costa Rica, 1968-1985: Real time monitoring of open-system differentiation. - Bull. Volcanol., 49: 415-434
- Tournon, J., 1984: Magmatismes du Mesozoique a l'actuel en Amerique Centrale: L'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andesites. - 335 págs.; Mem. Sc. Terre, Univ. Curie, 84-49; Tesis doctoral.

#### Explicación de las figuras:

- Fig. 1: Ubicación de las muestras.
- Fig. 2: Diagrama clasificativo Alkalís/Sílice.
- Fig. 3: Diagrama clasificativo Potasio/Sílice.
- Fig. 4: Diagrama clasificativo AFM.
- Fig. 5: Diagramas de Harker.



SiO<sub>2</sub>  
Fig. 2



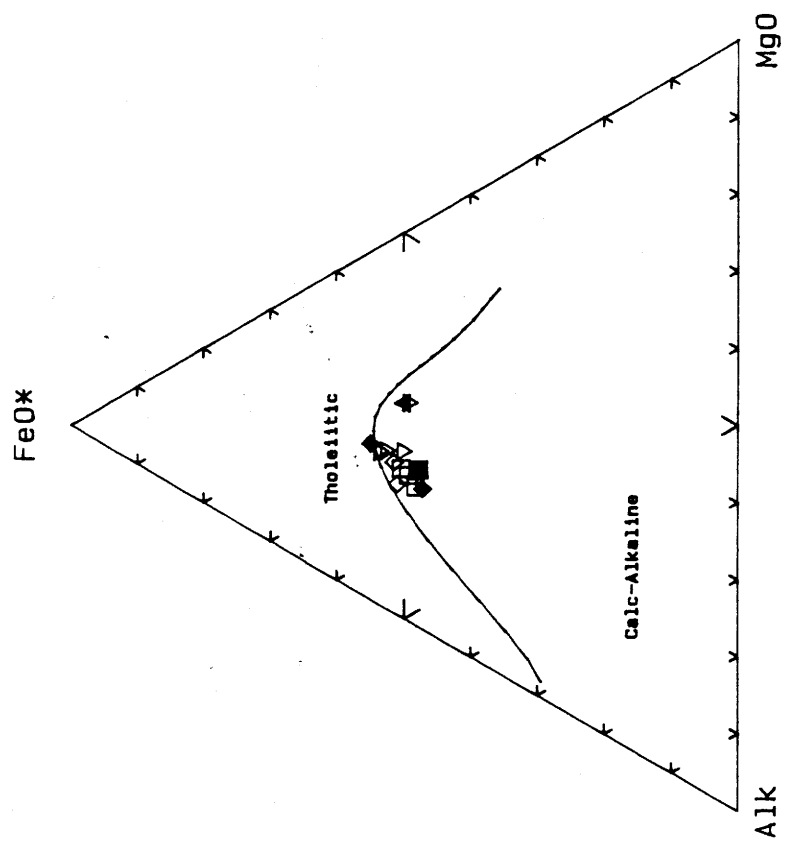


Fig. 4

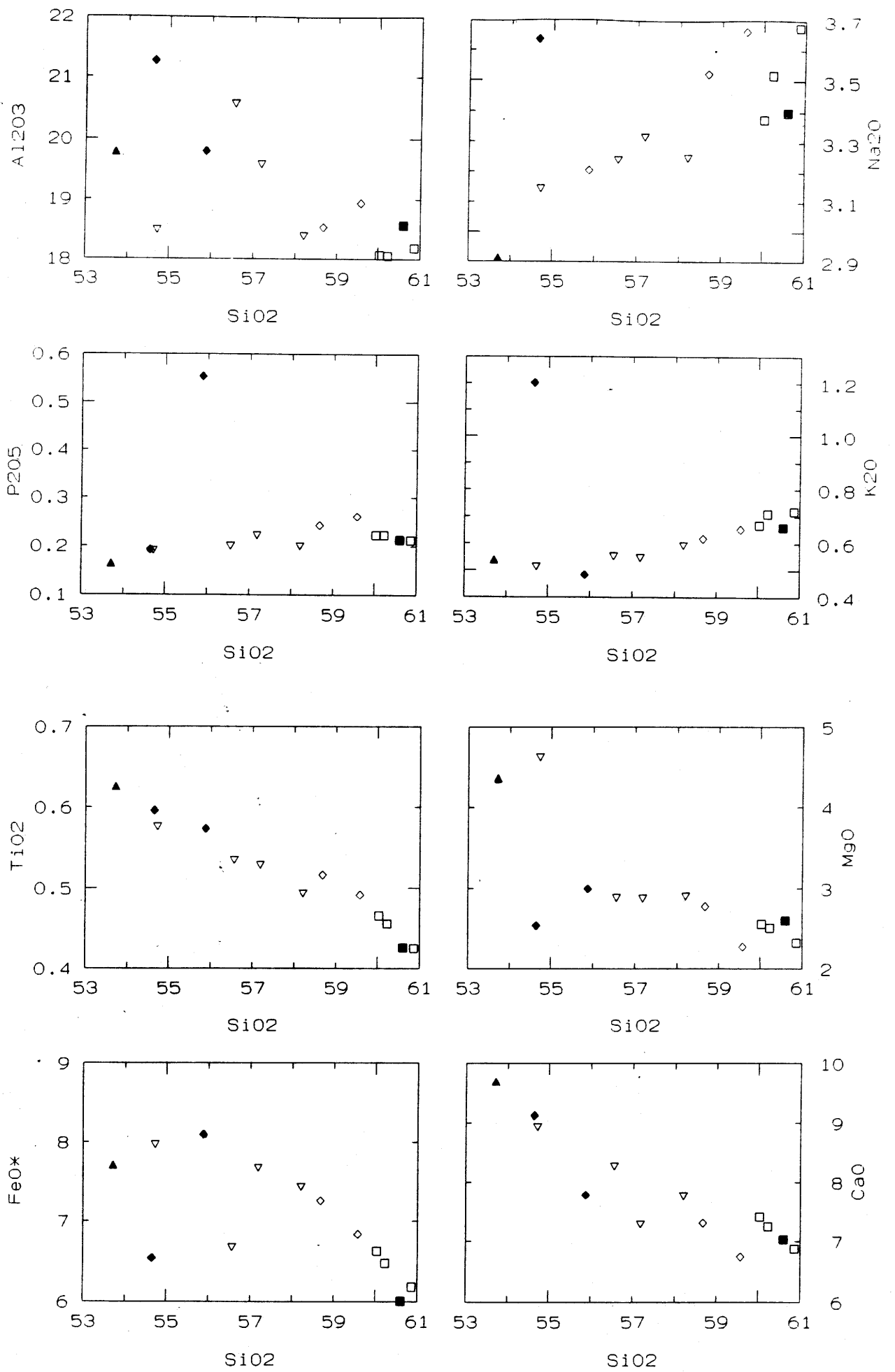


Fig. 5

## ANALISIS DE INCLINOMETRIA SECA EN EL VOLCAN ARENAL, 1988-90

Gerardo J. Soto, Oficina de Sismología y Vulcanología,  
Departamento de Geología, Instituto Costarricense de  
Electricidad, Apdo 10032-1000, San José.

### RESUMEN

Se analizaron los datos de la red de 9 inclinómetros secos del Volcán Arenal, durante el período diciembre de 1988 a octubre de 1990. El peso de la lava de los campos de coladas de 1968 al presente, es la principal fuente de deformación detectada en el volcán. La tasa de inclinación del terreno en el Arenal, está en cercana concordancia con las observadas en los volcanes Etna y Sakurajima en similares campos de lavas. Los períodos de fuerte actividad estromboliana parecen ser una fuente menor de deformación. Se especula que el marco geológico en que se encuentran las estaciones de medición es una fuente de alteración en el patrón general de deformación.

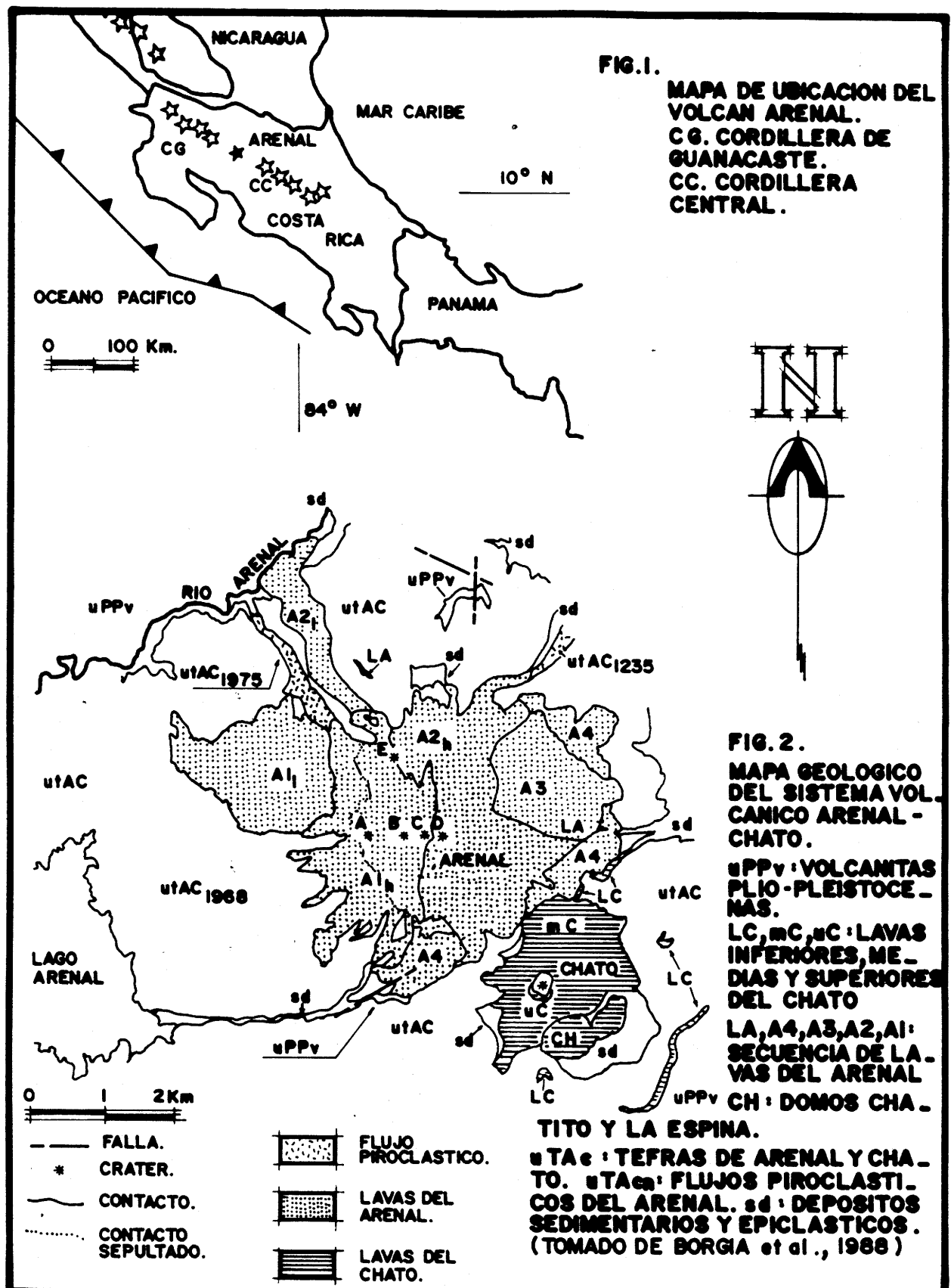
### ABSTRACT

Ground tilt data of Arenal's 9 station network were analyzed, for the period December 1988 - October 1990. Lava loading caused by 1968 - present lava fields is the principal source of detected deformation. The rate of downtilt observed in Arenal is in close agreement with those observed in Etna and Sakurajima volcanoes, in similar lava fields. Strong periods of strombolian activity seem to be a minor source of deformation. Geological setting of stations is speculated as a disturbing source of deformation pattern.

### 1- INTRODUCCION

#### 1.1. Ubicación geográfica y actividad volcánica

El Arenal es un estratovolcán de 1633 m s.n.m. (cerca de 1,1 km sobre el área circunvecina), ubicado en la parte nor-central de Costa Rica. Está aproximadamente a medio camino entre los dos mayores segmentos del arco volcánico Cuaternario del país



(Cordilleras de Guanacaste y Central, Fig. 1). La historia volcánica del Arenal se remonta a 2900 años antes del presente. Su edificio volcánico se compone de una armazón de lavas con 6 campos de coladas, y tefras (Borgia et al., 1988; Fig. 2).

A partir de una serie de erupciones explosivas en el flanco oeste el día 29 de julio de 1968, el Arenal ha estado casi constantemente activo, con efusión de coladas andesítico basálticas, y períodos intermitentes de actividad explosiva.

La actividad durante 1988-90 mostró el mismo patrón, con la efusión de cortas coladas de lava restringidas a la parte más alta del nuevo cono compuesto C (que ha crecido sobre el cráter C, formado durante las explosiones de julio de 1968). Actividad fumarólica cuspidal, intermitentes explosiones estrombolianas y pequeños flujos piroclásticos, han acompañado a la actividad efusiva en este período (Boletín del OVA, 1988-90).

El volumen total de magma eruptado desde 1968 es de aproximadamente  $0,4-0,5 \text{ km}^3$ . Wadge (1983) calculó un volumen total de magma como equivalente a roca densa (ERD, DRE en inglés) de  $304 \times 10^6 \text{ m}^3$  ( $272 \times 10^6 \text{ m}^3$  de lavas = 91%, y  $31 \times 10^6 \text{ m}^3$  de tefras = 9%) hasta el 5 de marzo de 1980. Si extrapolamos la curva de Wadge con la misma tasa de producción de magma hasta diciembre de 1990 (Fig. 3), tenemos  $390 \times 10^6 \text{ m}^3$ , pero si usamos su tasa calculada de producción de magma de  $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$ , obtenemos  $405 \times 10^6 \text{ m}^3$  de magma (asumiendo un 91% de lavas, serían  $369 \times 10^6 \text{ m}^3$ ). Reagan et al. (1987) estimaron el volumen total de lava eruptada hasta 1985, en  $0,35 \text{ km}^3$ , y Borgia et al. (1988), estimaron el volumen total de los campos de coladas A1 en  $0,5 \text{ km}^3$ .

## 1.2. Objetivos de este estudio

Varios investigadores han llevado a cabo estudios de deformación en el Volcán Arenal, y han propuesto diferentes mecanismos como la fuente primaria de deformación en el volcán (Capítulo 2). Este trabajo analiza los datos de inclinometría seca en el período 1988-90 e interpreta los procesos volcánicos que causan esta deformación superficial, prestando atención a la actual actividad volcánica y al entorno geológico en que se encuentran las estaciones de inclinometría seca. También pretende comparar los modelos previos de deformación, para mejorar el conocimiento sobre el comportamiento del Arenal. Finalmente, este estudio tiene la meta de sugerir algunas mejoras en el sistema de monitoreo volcánico.

## 1.3. Metodología de la inclinometría seca

El Departamento de Geología del Instituto Costarricense de Electricidad, instaló una red de inclinometría seca, con 9 estaciones distribuidas en tres líneas radiales a la cima (Tabla

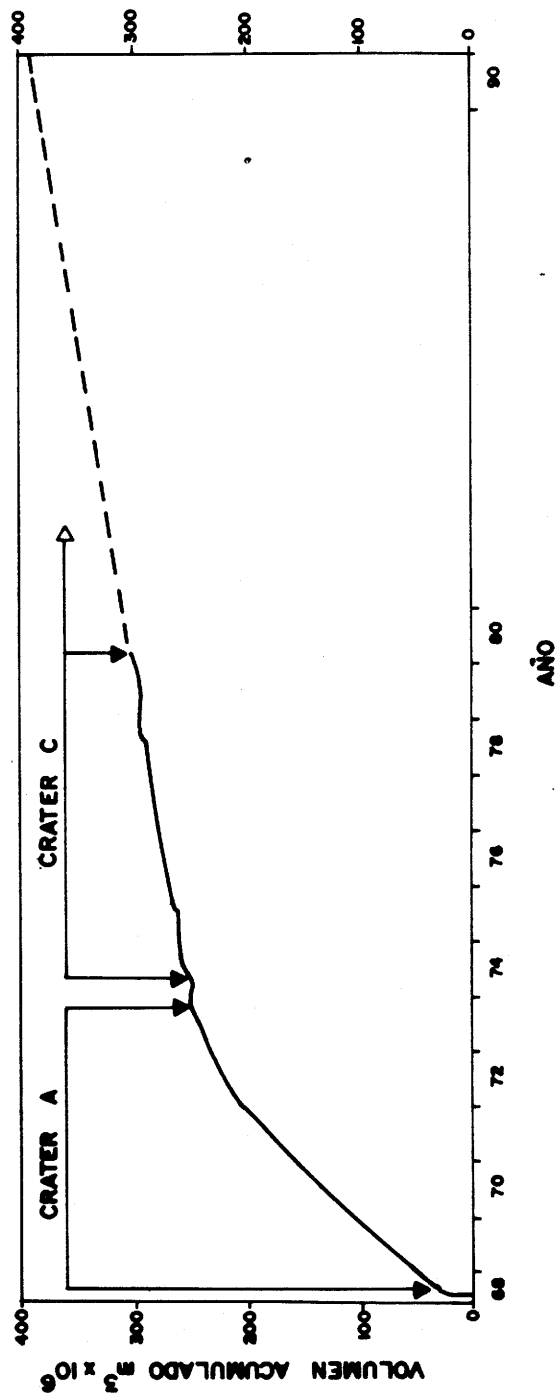


FIG. 3  
VOLUMEN ACUMULADO DEL MAGMA ERUPTADO EN FUNCION DEL TIEMPO,  
EN EL ARENAL ( MODIFICADO DE WADGE, 1983 ; LA EXTRAPOLACION  
1980 - 90 ASUME LA MISMA TASA DE EFUSION DESDE 1974 ).

TABLA 1: COORDENADAS DE UBICACION (CUADRICULA LAMBERT, COSTA RICA NORTE) DE LOS VERTICES DE LAS ESTACIONES DE INCLINOMETRIA SECA, VOLCAN ARENAL.

| NO. | LATITUD<br>(Km norte) | LONGITUD<br>(Km este) | ELEVACION<br>(m s.n.m.) |
|-----|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| B1  | 271382,464            | 457746,184            | 819,282                 |
| B2  | 271373,410            | 457718,228            | 816,827                 |
| B3  | 271404,253            | 457738,127            | 817,740                 |
| C1  | 271470,567            | 457382,854            | 736,405                 |
| C2  | 271484,777            | 457357,114            | 736,205                 |
| C3  | 271499,680            | 457365,281            | 736,073                 |
| C4  | 271485,464            | 457391,065            | 738,502                 |
| D1  | 271457,716            | 456203,341            | 600,959                 |
| D2  | 271437,362            | 456183,698            | 599,045                 |
| D3  | 271457,081            | 456163,394            | 598,948                 |
| D4  | 271477,403            | 456183,049            | 599,673                 |
| E1  | 273519,685            | 459454,642            | 669,709                 |
| E2  | 273543,718            | 459450,473            | 667,910                 |
| E3  | 273535,638            | 459474,121            | 669,298                 |
| F1  | 274156,866            | 459926,210            | 611,082                 |
| F2  | 274195,363            | 459915,346            | 608,966                 |
| F3  | 274185,474            | 459954,206            | 610,690                 |
| G1  | 274253,784            | 461229,306            | 414,183                 |
| G2  | 274292,209            | 461218,331            | 413,686                 |
| G3  | 274282,509            | 461257,130            | 412,212                 |
| I1  | 272241,144            | 461456,348            | 645,938                 |
| I2  | 272227,816            | 461471,288            | 645,123                 |
| I3  | 272224,641            | 461451,606            | 645,277                 |
| J1  | 272455,414            | 461912,522            | 440,726                 |
| J2  | 272488,685            | 461901,476            | 442,078                 |
| J3  | 272481,543            | 461935,796            | 440,413                 |
| K1  | 272517,355            | 462639,255            | 382,826                 |
| K2  | 272539,467            | 462666,400            | 380,255                 |
| K3  | 272504,905            | 462671,969            | 381,377                 |

1), en 1986, incluyendo las estaciones B y C, instaladas en la década de los años 70. Cada estación está compuesta de un triángulo (2 de ellas con doble triángulo), en cuyos vértices se ubican bancos de nivelación, y el punto de medición está cerca del centro de cada triángulo (Fig. 4). Cada estación ha sido medida periódicamente con un nivel N3 y estadias de invar, y el vector (magnitud y dirección) de la inclinación del terreno hacia abajo, se ha determinado con el mismo método establecido por Yamashita (1981). Durante el período diciembre 1988 - octubre 1990, se llevaron a cabo 7 campañas de medición (Tabla 2).

## 2- TRABAJOS E INTERPRETACIONES ANTERIORES SOBRE DEFORMACION

Los trabajos previos sobre deformación en el Arenal fueron sumariados por Alvarado et al. (1988) (Fig. 5).

Simon et al. (1970) instalaron un inclinómetro a 3,5 km al NNW del cráter activo A en 1969. Los inclinogramas mostraron deflaciones e inflaciones del orden de 10 microrradianes, que fueron interpretados como el producto de una cámara magmática somera (4 km bajo el cráter B), y debido al peso de las lavas.

Melson et al. (1979) analizaron los datos de inclinometría de 4 estaciones a lo largo de una línea radial al volcán, entre 1976-78, e interpretaron la existencia de una cámara magmática somera (2 km bajo la superficie), siguiendo el modelo de deformación superficial de Mogi.

Wadge (1983) usó los mismos datos que Melson et al. (1979) analizaron, y concluyó que la deformación era debida al peso de las lavas y no a una cámara magmática somera.

Van der Laat (1988), con datos entre 1982-86, encontró un tendencia general de deflación, y propuso una cámara magmática somera entre 800 y 1500 m bajo el volcán, con un volumen de  $6 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

Finalmente, Alvarado et al. (1988), propusieron un modelo con una cámara magmática profunda, con un conducto magmático en forma de dique radial (formado en la etapa inicial de la erupción de 1968), alimentando los cráteres A y C. Interpretaron las deformaciones en el Arenal (durante el período enero 1986 - diciembre 1988), principalmente como consecuencia del peso de las coladas de 1968-88 en el flanco oeste, y minoritariamente debido a las condiciones hidrogeológicas, geotérmicas y geológicas locales. También argumentan que una cámara magmática somera en el Arenal, no es evidente con base en la información geofísica y petrológica disponible.

FIG. 4

CONFIGURACION DE LAS ESTACIONES DE INCLINOMETRIA SECA DEL ARENAL.

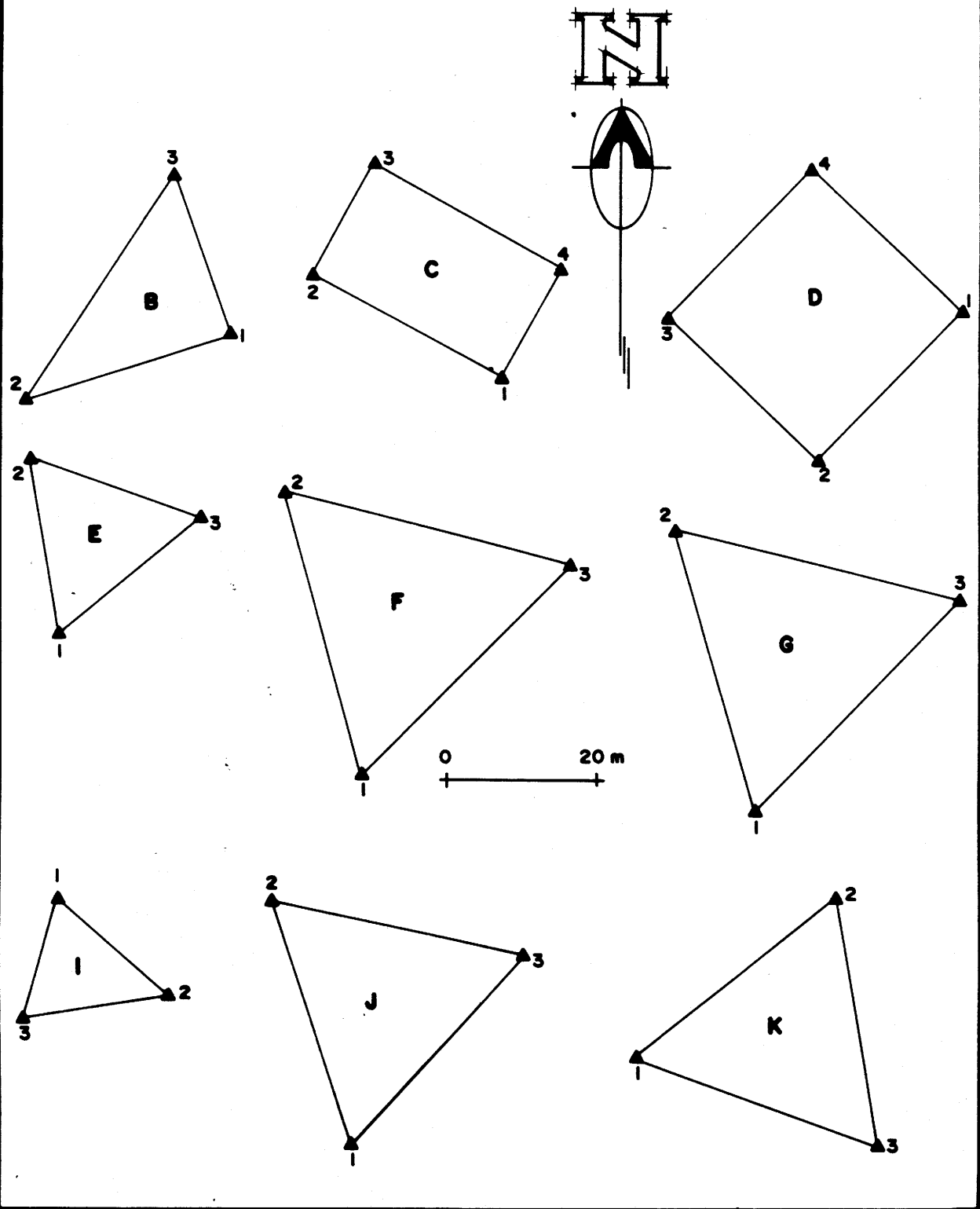


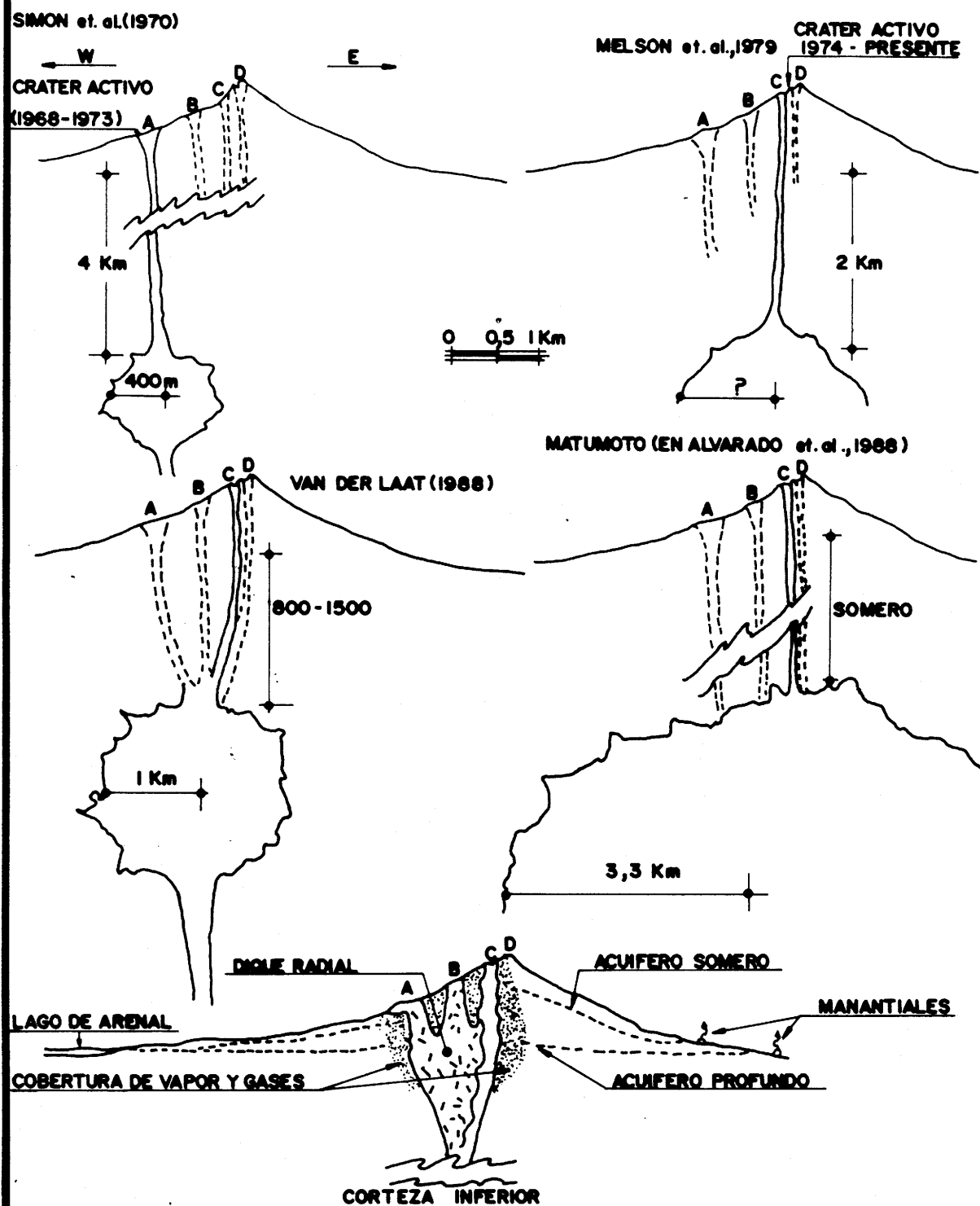
TABLA 2: DATOS DE INCLINOMETRIA SECA, PERIODO DICIEMBRE 1988 - OCTUBRE 1990, VOLCAN ARENAL.

| ESTAC.  | FECHAS DE MEDICION |             |             |             |             |             |             |
|---------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|         | 06<br>DIC88        | 08<br>FEB89 | 22<br>NOV89 | 08<br>ENE90 | 03<br>MAY90 | 17<br>JUL90 | 24<br>OCT90 |
| B -MAG. | 20,89              | 48,85       | 173,48      | 07,07       | -           | -           |             |
| B -AZ.  | 29,14              | 18,52       | 340,09      | 48,16       | -           | -           |             |
| C1-MAG. | -                  | 20,38       | 09,36       | 04,75       | 12,38       | 03,34       |             |
| C1-AZ.  | -                  | 108,45      | 57,05       | 20,40       | 110,30      | 163,29      |             |
| C2-MAG. | -                  | 23,68       | 08,66       | 04,75       | 14,95       | 61,70       |             |
| C2-AZ.  | -                  | 100,02      | 56,56       | 277,05      | 198,24      | 61,53       |             |
| D1-MAG. | 02,91              | 04,27       | 05,53       | 03,83       | 05,07       | 01,80       |             |
| D1-AZ.  | 148,06             | 199,43      | 263,53      | 100,22      | 56,14       | 212,52      |             |
| D2-MAG. | 11,79              | 14,56       | 04,53       | 04,03       | 04,27       | 01,58       |             |
| D2-AZ.  | 256,49             | 04,59       | 262,43      | 118,43      | 338,28      | 160,35      |             |
| E -MAG. | 09,97              | 23,69       | 06,57       | 16,41       | 04,18       | 07,54       |             |
| E -AZ.  | 235,53             | 293,47      | 353,38      | 276,06      | 248,54      | 257,02      |             |
| F -MAG. | 06,77              | 08,61       | 01,53       | 02,75       | 06,25       | 02,84       |             |
| F -AZ.  | 252,08             | 180,53      | 55,07       | 41,13       | 222,54      | 269,35      |             |
| G -MAG. | 04,64              | 10,42       | 04,08       | 35,23       | 28,09       | 03,33       |             |
| G -AZ.  | 247,53             | 213,39      | 06,59       | 170,10      | 335,30      | 356,34      |             |
| I -MAG. | 05,80              | 10,11       | 06,95       | 11,75       | 07,69       | 06,86       |             |
| I -AZ.  | 150,37             | 122,45      | 110,50      | 343,28      | 248,46      | 175,02      |             |
| J -MAG. | 01,14              | 03,75       | 04,62       | 04,88       | 07,23       | 00,66       |             |
| J -AZ.  | 101,38             | 229,16      | 229,16      | 95,48       | 263,01      | 71,38       |             |
| K -MAG. | 05,83              | 02,49       | 06,82       | 06,29       | 13,60       | 06,37       |             |
| K -AZ.  | 29,17              | 85,26       | 328,03      | 315,37      | 161,45      | 331,10      |             |

MAG.: Magnitud del vector de inclinación hacia abajo, en microrradianes.  
AZ.: Azimut del vector, en grados.

**FIG. 5.**

**DIFERENTES MODELOS SOBRE LA ALIMENTACION MAGMATICA DEL ARENAL (TOMADO DE ALVARDO et al., 1988)**



### **3- ANALISIS DE LOS DATOS DE INCLINOMETRIA SECA, DICIEMBRE DE 1988 - OCTUBRE DE 1990**

Los datos de inclinometría seca de los 6 períodos entre diciembre de 1988 y octubre de 1990 en las 9 estaciones (Tabla 2), han sido graficados en la Figura 6, y muestran las variaciones temporales de los vectores de inclinación, y sus tendencias en el tiempo. Tres estaciones (B, C y E) muestran una clara tendencia de deformación.

La estación B (la más cercana al campo de coladas de 1968-90 y al cono C), muestra una clara inclinación hacia el noreste. Sin embargo, después de noviembre de 1989, cambia dramáticamente. Esta deformación es interpretada como local. De hecho, la estación B está localizada en una divisoria angosta, flanqueada al sur y norte por activas vertientes con fuerte erosión. La erosión avanzó progresivamente desde el valle sur hacia el norte, causando el deslizamiento de la pared sur de la divisoria, y consecuentemente, el banco de nivelación meridional se perdió en el período enero-mayo de 1990. La tendencia de deflación coincide con previas observaciones, tanto en la tasa como en la dirección de inclinación durante el período enero 1986 - diciembre 1990 (cf. Alvarado et al., 1988).

La tendencia temporal de deformación de las estaciones C, es hacia el este, coincidentes también con observaciones anteriores entre 1986-88. La estación E muestra una clara deflación hacia el oeste, en clara coincidencia con los datos de 1986-88.

Las otras estaciones indicaron cambios menores en la deformación. La tendencia de inclinación de las estaciones D1 y D2 son diferentes una de la otra: al sur y oeste, respectivamente. Las estaciones F, G y J, tuvieron tendencias de deflación hacia el suroeste, con pequeños cambios. La estación I sufrió deflación hacia el sureste, con variaciones temporales. Finalmente, la estación K muestra un comportamiento aleatorio, volviendo a su posición original, e inclinándose de nuevo al norte.

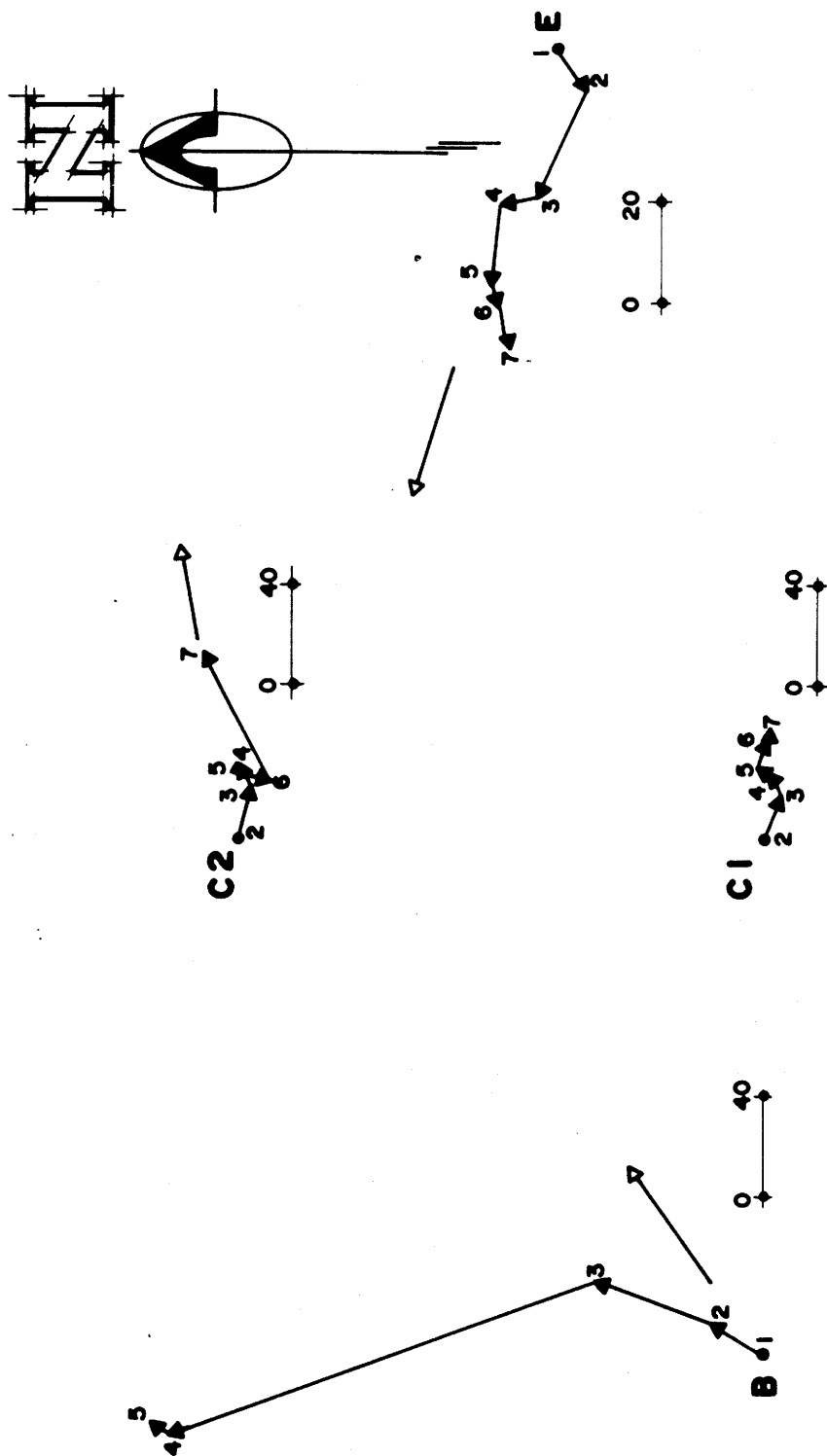
El ploteo de las proyecciones de los vectores en la dirección de la tendencia de deflación, en función del tiempo, nos llevó a obtener las tasas de deflación (microrradianes/mes) para las estaciones B, C2, D1, D2, E, F, G, I, J y K (Figuras 7 & 8).

### **4- INTERPRETACION DE LOS DATOS DE INCLINOMETRIA**

Es claro que está ocurriendo una deformación superficial en el edificio volcánico del Arenal, a diferentes tasas en diferentes puntos. La pregunta es: ¿cuál es el proceso responsable de esta

FIG. 6a.

VECTORES DE INCLINACION HACIA ABAJO ( DE LA TABLA 2 ) EN LAS ESTACIONES B, C1, C2, E. LOS NUMEROS LA FECHAS DE MEDICION : 1. 6 DIC. 88, 2. 6 FEB. 89, 3. 22 NOV. 89, 4. 8 ENE. 90, 5. 3 MAY. 90, 6. 17 JUL. 90, 7. 24 OCT. 90. LAS FLECHAS SIN RELLENAR INDICAN LA TENDENCIA DE DIRECCION EN EL PERIODO ENERO 88 - OCTUBRE 90. LAS BARRAS INDICAN LA ESCALA EN MICRO-RADIANTES.



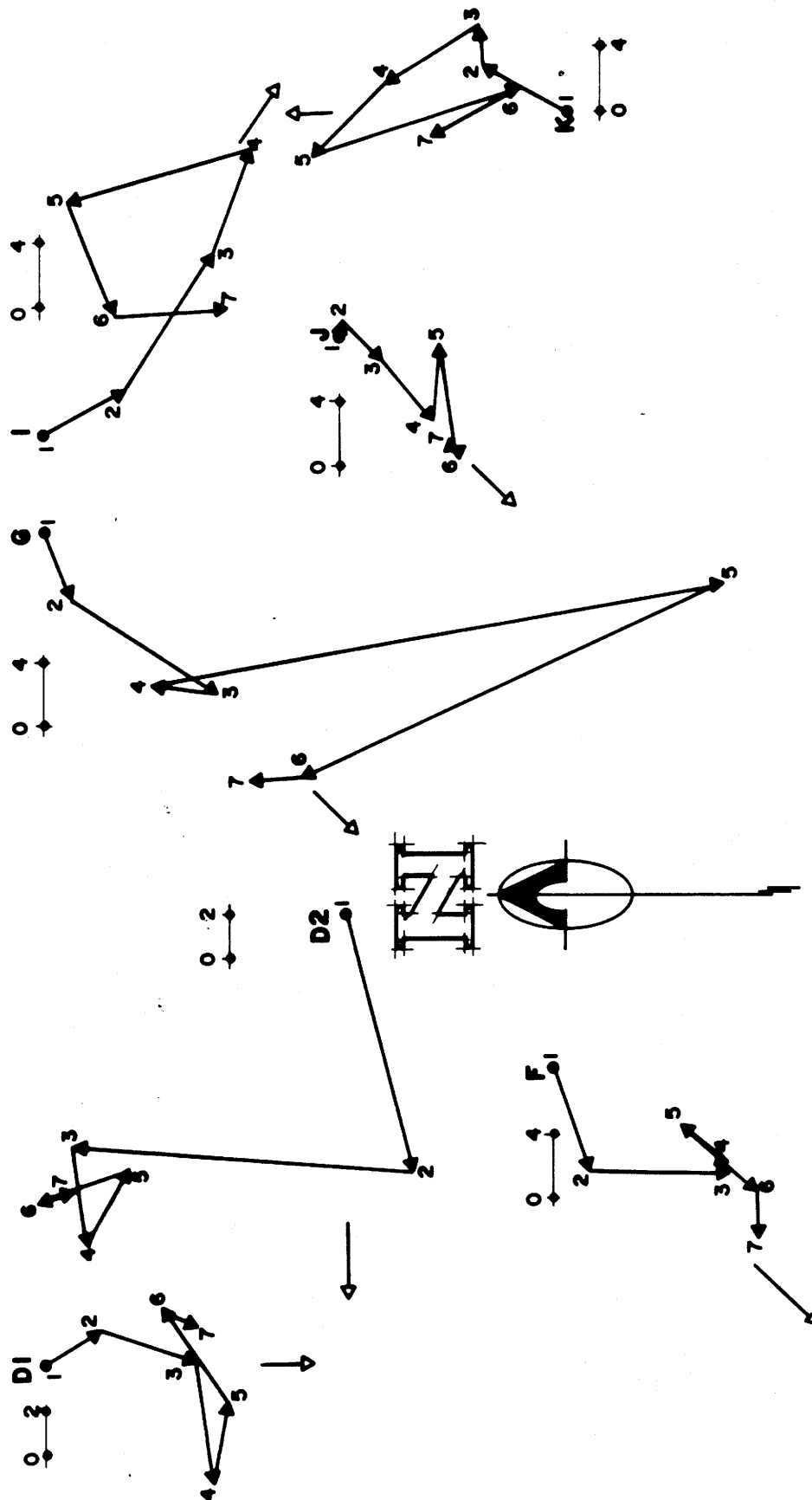
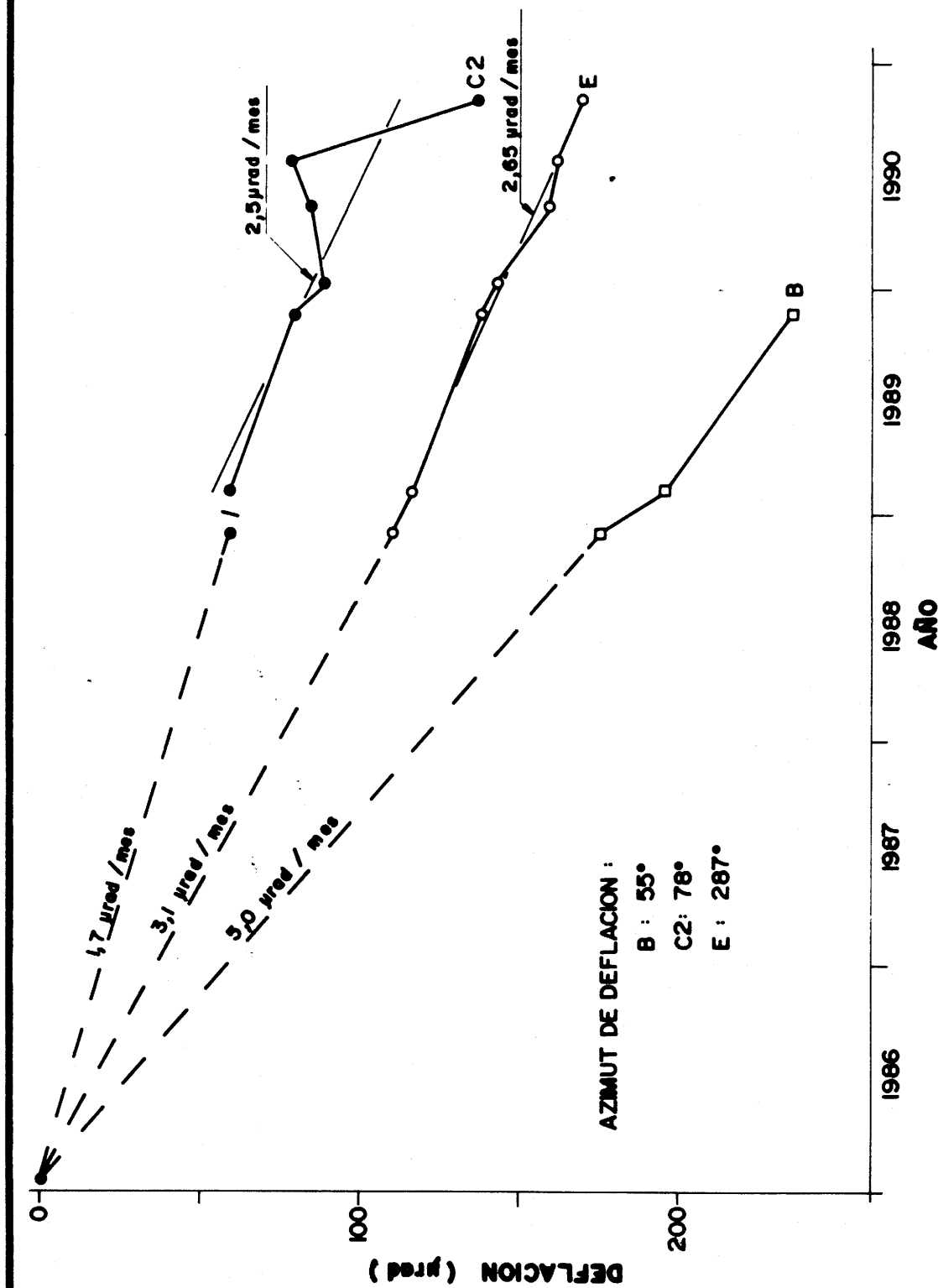


FIG. 6b. VECTORES DE INCLINACION HACIA ABAJO (DE TABLA 2) EN LAS ESTACIONES D1, D2, F, G, I, J y K. MISMA SIMBOLOGIA QUE EN LA FIGURA 6a. LAS FLECHAS INDICAN LA TENDENCIA DE DIRECCION EN EL PERIODO DIC. 88 - OCT. 90. LAS BARRAS INDICAN LA ESCALA EN MICRORRADIANTES.



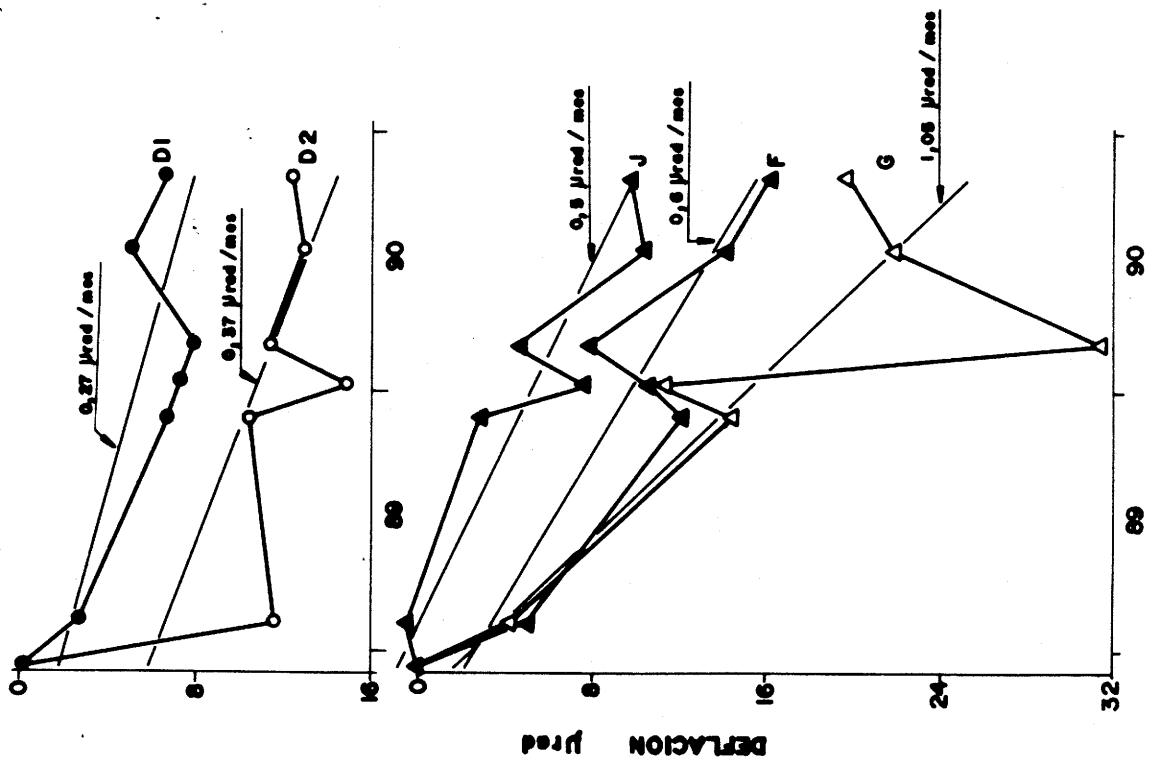
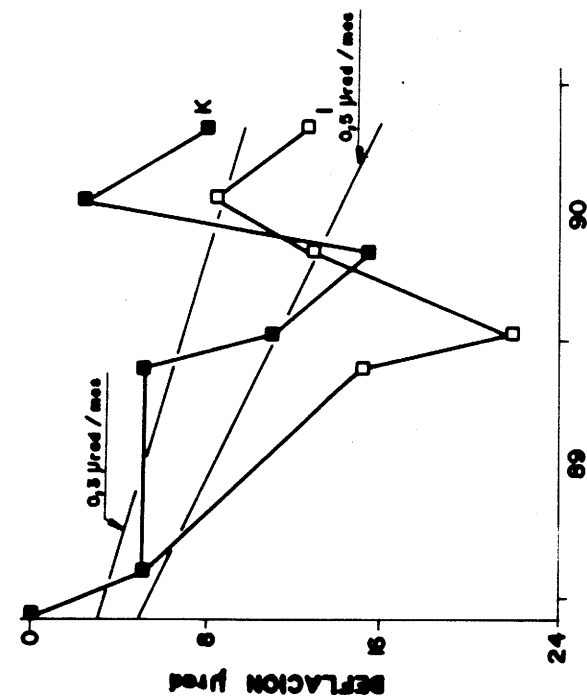
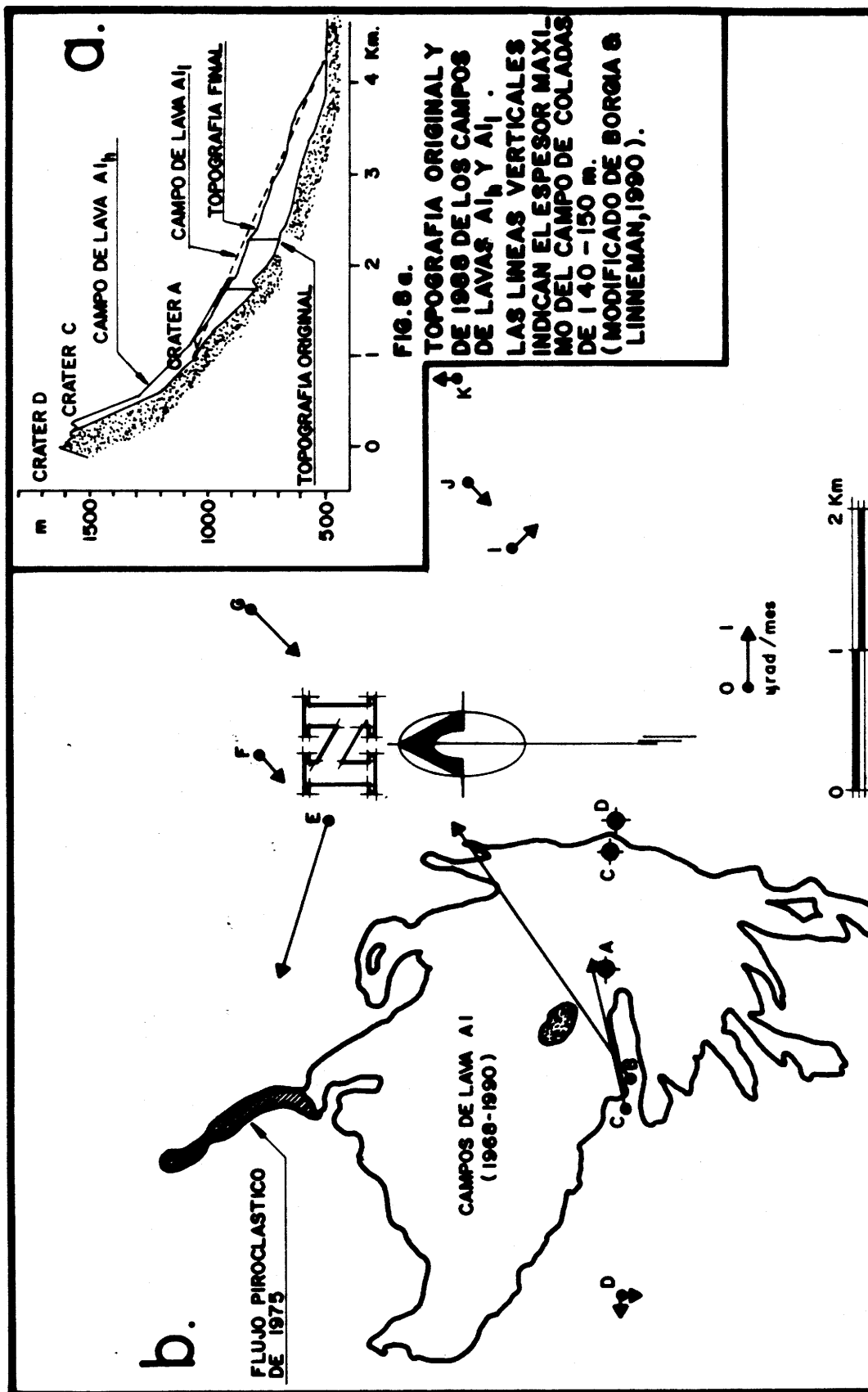


FIG. 7b.

TASAS DE DEFLEXION DE LAS ESTACIONES D1, D2, F, G, I, J Y K EN EL PERIODO DICIEMBRE 1988 — OCTUBRE 1990 AZIMUT DE LAS TENDENCIAS DE INCLINACION : D1:180°, D2:270°, F: 225°, G:225°, I: 135°, J: 225°, K: 0°. LAS LINEAS FUERON OBTENIDOS POR EL METODO DE MINIMOS CUADRADOS.



**FIG. 8b.** MAPA DE LOS CAMPOS DE COLADAS  $A1$  Y CON LOS VECTORES DE DEFLECCION EN CADA ESTACION DE INCLINOMETRIA SECA (●). (---) CRATERES; [ ] AREA AXIAL DE MAXIMO ESPESOR DE LAVAS, ESTIMADO CON BASE EN EL MAPA DE ISOPACAS DE WADGE (1983) Y LA FIG. 8c.

deformación?

Propongo cuatro posibles explicaciones, a discutir a continuación:

1- inflaciones y/o deflaciones relacionadas con el almacenamiento y/o evacuación de magma desde una cámara magmática somera;

2- deformación (subsistencia) debido al peso de las lavas;

3- inflaciones y/o deflaciones debido a relativos cambios someros en el patrón de esfuerzos causado por las explosiones estrombolianas, y

4- cambios diferenciales en las estaciones de inclinometría seca, que se mueven como bloques separados, en respuesta a su entorno geológico.

#### 4.1. El caso de una cámara magmática somera

Wadge (1983) analizó el presupuesto de magma del Arenal entre 1968-80 y la fuente de alimentación de lavas en los nuevos cráteres A y C de 1968. El concluyó una única fuente de magma para ambos cráteres, localizada a lo largo del eje vertical del cono de 1968, divergiendo en dos conductos, varias centenas de metros bajo el volcán. También analizó los datos de inclinometría seca obtenidos por Melson et al. (1979), lo cual sugería dos modelos: a) un reservorio magmático bajo la cumbre del volcán es progresivamente evacuado a la superficie, y consecuentemente reduce la presión magmática interna del volumen reservado, causando deflación en el volcán, y b) subsidencia de las laderas del volcán, debido la depresión que causan las coladas de lava en la superficie del aparato volcánico. Con base en sus conclusiones respecto al presupuesto de magma obtenidas, chequeó la validez de una y otra hipótesis, usando un modelo teórico de elementos finitos. Finalmente concluyó, puntualizando en una posible cámara magmática profunda, que las coladas pueden ciertamente hacer subsidir el flanco oeste del volcán en varios decímetros.

Los análisis petrológicos de las lavas entre 1968-85, sugieren que antes de 1968, el magma residía en la corteza profunda bajo el volcán, hasta que un nuevo magma intruyó la cámara y causó la efusión de lavas dentre 1968-70, luego el magma intruyente se mezcló con porciones máficas de la cámara magmática original, produciendo lavas mezclads entre 1970-73, y la continua mezcla, más la cristalización fraccionada en la cámara y las paredes del conducto, produjeron las lavas desde mediados de 1974 hasta 1985 (Reagan et al., 1987). Los análisis de la mineralogía y petrología de los enclaves gabroicos cognatos en las lavas y piroclastos de 1968-77, sugieren que cristalizaron en la corteza media a superior, que son realmente cognatos, y reflejan la cristalización pre-eruptiva de los magmas del Arenal (Beard & Borgia, 1989). Matumoto et al. (1977) concluyeron que la estructura de la corteza bajo el Arenal es de dos segmentos principales: el superior alcanza hasta

los 22 km de profundidad, con una discontinuidad a los 9 km, y el inferior hasta los 43 km de profundidad (el Moho sísmico). Parece, en conclusión, que la cámara magmática que alimenta las erupciones del Arenal desde 1968, estaría situada entre los 9 y 22 km de profundidad.

Asumiendo que la deformación reportada por Melson et al. (1979) fuera causada por un cuerpo magmático, su profundidad debería ser muy somera (Wadge, 1983). Por otra parte, con los máximos de deflación de 55 microrradianes/año reportados por Van der Laat en el período 1982-88, él sugirió un cuerpo magmático entre 800 y 1500 m de profundidad, con un radio de 1 km (en Alvarado et al., 1988; ver Fig. 5). Ambos modelos de cámara magmática somera son incoherentes con la realidad geológica en los estrato-volcanes, con los datos petrológicos de las lavas y sus enclaves gabroicos, y de haber existido en el Arenal, al descargarse, posiblemente hubiera causado un colapso en la cúspide, situación que no ha ocurrido en este ciclo eruptivo.

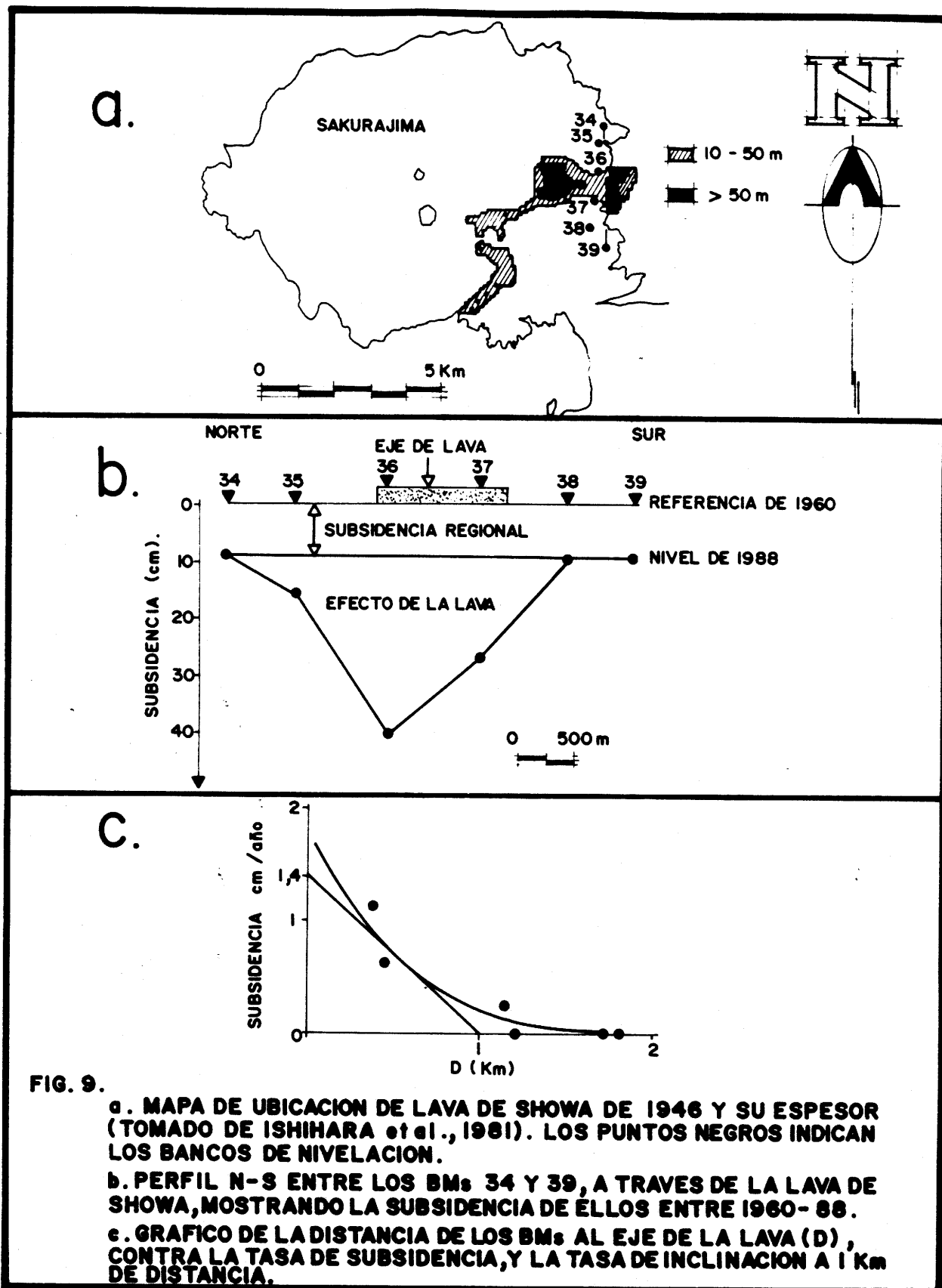
En conclusión, la idea de una cámara magmática somera como fuente de alimentación de los actuales magmas del Arenal, no parece plausible.

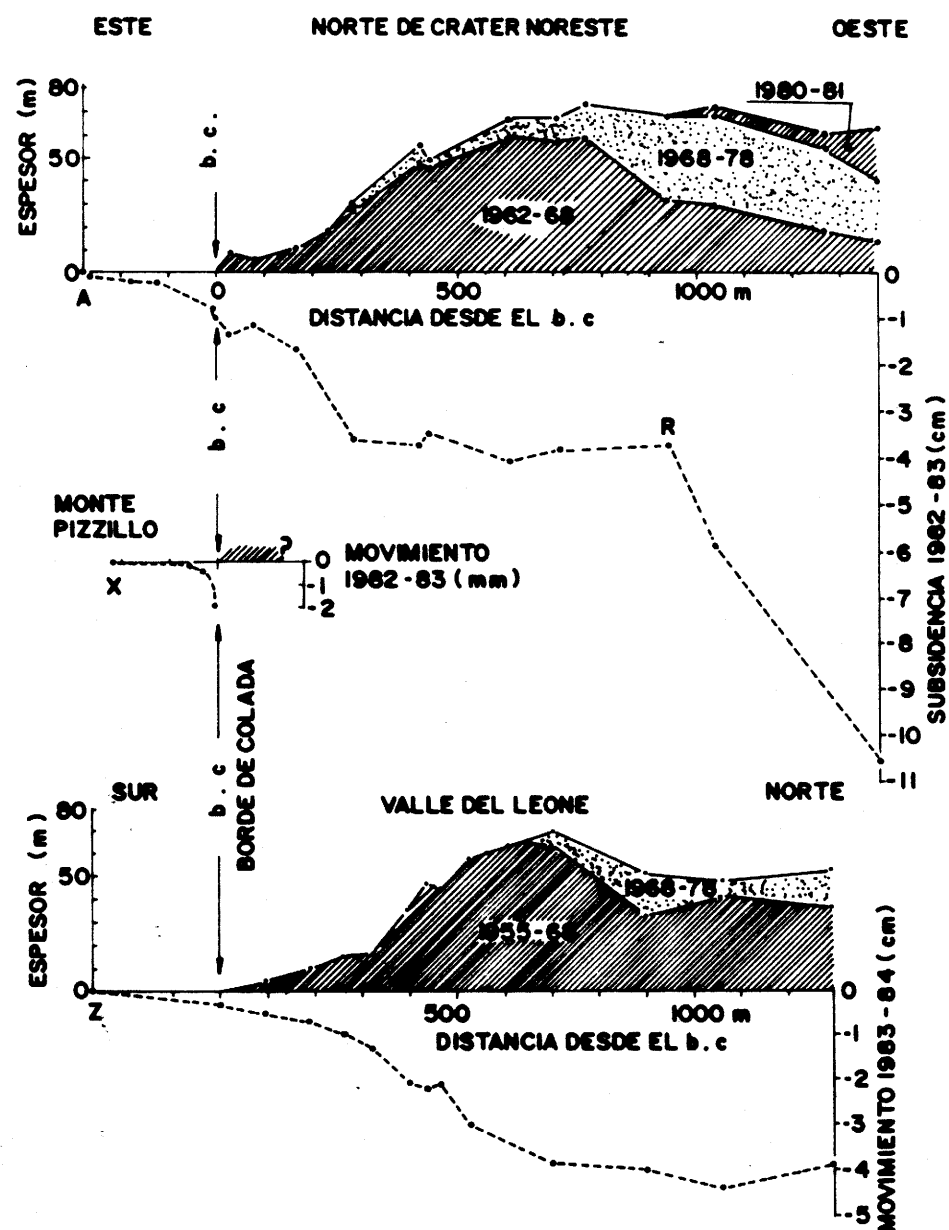
#### 4.2. Deformación debida al peso de las coladas de lava

Con base en los datos de las campañas de nivelación precisa en el volcán Sakurajima en Japón, a lo largo del campo de lavas de Showa, de 1946, es evidente una subsidencia local superimpuesta a la deformación regional de fondo del volcán, aún 42 años después del emplazamiento (Fig. 9). El mismo fenómeno ha sido observado en el Etna, en investigaciones de nivelación e inclinometría (Murray, 1988; Fig. 10).

En el caso del Sakurajima, el espesor de las lavas en el área de deformación es cercana a los 50 m (Eto et al, 1981; Ishihara et al, 1981; Fig. 9a), y no hay subsidencia local más allá de 1,7 km del eje de las coladas. La tasa de deflación en un vector a lo largo del perfil de la Figura 9b a 1 km de distancia del eje de lavas, es de 14 microrradianes por año (Fig. 9c). En el Etna, la subsidencia permanece activa aún 28 años posterior al emplazamiento, en flujos compuestos que alcanzan espesores de 70-75 m, y su efecto es perceptible a distancias de 200-300 m del borde de las coladas y a más de 1 km del eje (Fig. 10). La tasa de deformación a una distancia de 1 km del eje de las coladas está en el orden de 40 microrradianes por año.

Las deformaciones en las estaciones de inclinometría seca del Arenal, se observan aun a distancias de 4 km del área axial principal de las coladas (máximo espesor del campo de coladas, Fig. 8). Los vectores de deflación en las estaciones B, C, E, F y G están dirigidos hacia el campo de coladas de 1968-presente, pero





**FIG.10.**  
**GRAFICOS DE ESPESOR DE CAMPOS DE COLADAS CONTRA LA**  
**DISTANCIA DESDE EL BORDE DE COLADAS Y EL MOVIMIENTO**  
**VERTICAL DE LOS BANCOS DE NIVELACION ( A, X, Z SON BMS**  
**DE REFERENCIA ). VOLCAN ETNA, ITALIA.**  
**( TOMADO DE MURRAY, 1988 ).**

las estaciones más distantes, muestran diferentes direcciones. En el caso del Arenal, el campo de lavas es más amplio que el mencionado en el perfil del Sakurajima; el volumen es al menos el doble (0,4-0,5 km<sup>3</sup> en el Arenal, contra 0,18 km<sup>3</sup> en las lavas de Showa, sensu Ishihara et al, 1981); es 3 veces más espeso que el perfil de lavas del Sakurajima (cerca de 150 m en la Fig. 8, contra 50 m en el Sakurajima, Fig. 9a), y es el doble de espeso que los perfiles de coladas del Etna (cerca de 75 m, Fig. 10).

Al comparar las tasas de deflación asociadas con el peso de las coladas en el Sakurajima y el Etna, con los órdenes de deformación en el Arenal, encontramos que son bastante parecidos, considerando las diferencias en área cubierta, espesor y volumen: a una distancia de 1 km de los ejes, tenemos 40 microrradianes/año en el Etna, 14 en el Sakurajima, y 60 y 30 respectivamente en las estaciones B y C del Arenal.

El gráfico de tasas de deflación de las estaciones de inclinometría seca contra la distancia al área axial del campo de coladas en el Arenal (Tabla 3; Fig. 11), muestra una clara relación con esta supuesta fuente de deformación. En consecuencia, la subsidencia causada por el peso de coladas (peso total del orden de 1 billón de kg), parece una explicación bastante plausible y concreta, en concordancia con las observaciones.

#### 4.3. Influencia de la actividad volcánica

Es necesario corroborar la posible influencia de la actividad volcánica (en términos de actividad estromboliana y exhalativa) sobre las deformaciones del cuerpo volcánico.

En el Etna, Murray (1988) encontró que un movimiento de subsidencia en los terrenos adyacentes a las coladas de lava, fue acelerado después de erupciones laterales. Tal movimiento estuvo además, más controlado por el espesor total de los campos de coladas, que por las unidades traslapantes más recientes.

La Figura 12 muestra la actividad del Arenal en el período diciembre 1988 - octubre 1990, en términos del número mensual de sismos volcánicos. Los meses más activos fueron setiembre, octubre y noviembre de 1989, y marzo y setiembre de 1990. Los menos activos fueron entre abril y julio de 1989 y junio y octubre de 1990.

La comparación de los vectores de deformación, con la figura 12, indica una posible relación entre los altos o bajos períodos de actividad, con la inclinometría, principalmente en las estaciones más alejadas:

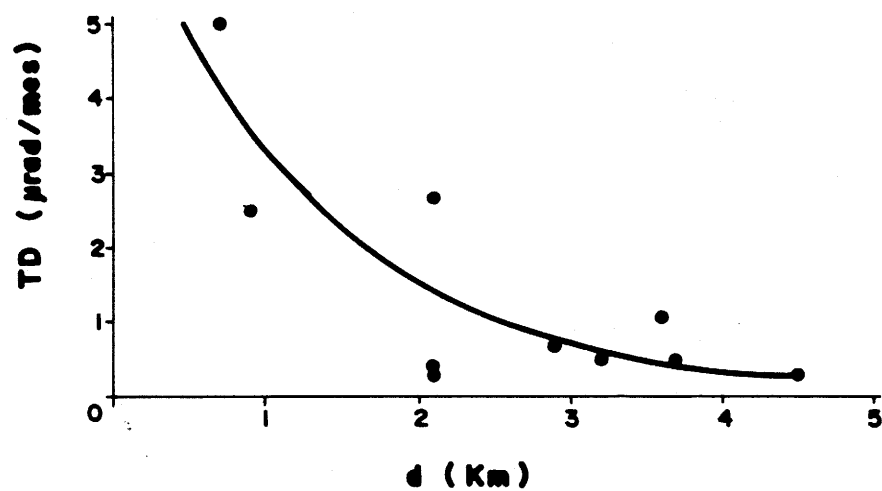
- la inflación en C2 entre enero-julio de 1990 coincide con un decaimiento general en las explosiones, y una nueva deflación

TABLA 3: CORRELACION ENTRE LAS TASAS DE DEFORMACION (TD) Y LA DISTANCIA (d) DE CADA ESTACION AL EJE DE LOS CAMPOS DE LAVA A1 (CCA).

| ESTACION | TD (urad/mes) | d a CCA (km) |
|----------|---------------|--------------|
| B        | 5,0           | 0,7          |
| C2       | 2,5           | 0,9          |
| D1       | 0,27          | 2,1          |
| D2       | 0,37          | 2,1          |
| E        | 2,65          | 2,1          |
| F        | 0,6           | 2,9          |
| G        | 1,05          | 3,6          |
| I        | 0,5           | 3,2          |
| J        | 0,5           | 3,7          |
| K        | 0,3           | 4,5          |

Estos datos están graficados en la Fig. 11. La curva de mejor ajuste exponencial fue obtenida por el método de mínimos cuadrados. La ecuación obtenida es:

$$(1) \quad TD = 7,364 \times \text{Exp. } (-0,783 \, d)$$



**FIG. II.**  
**GRAFICO DE TASA DE DEFORMACION CONTRA DISTANCIA**  
**A CCA (VER TABLA 3).**

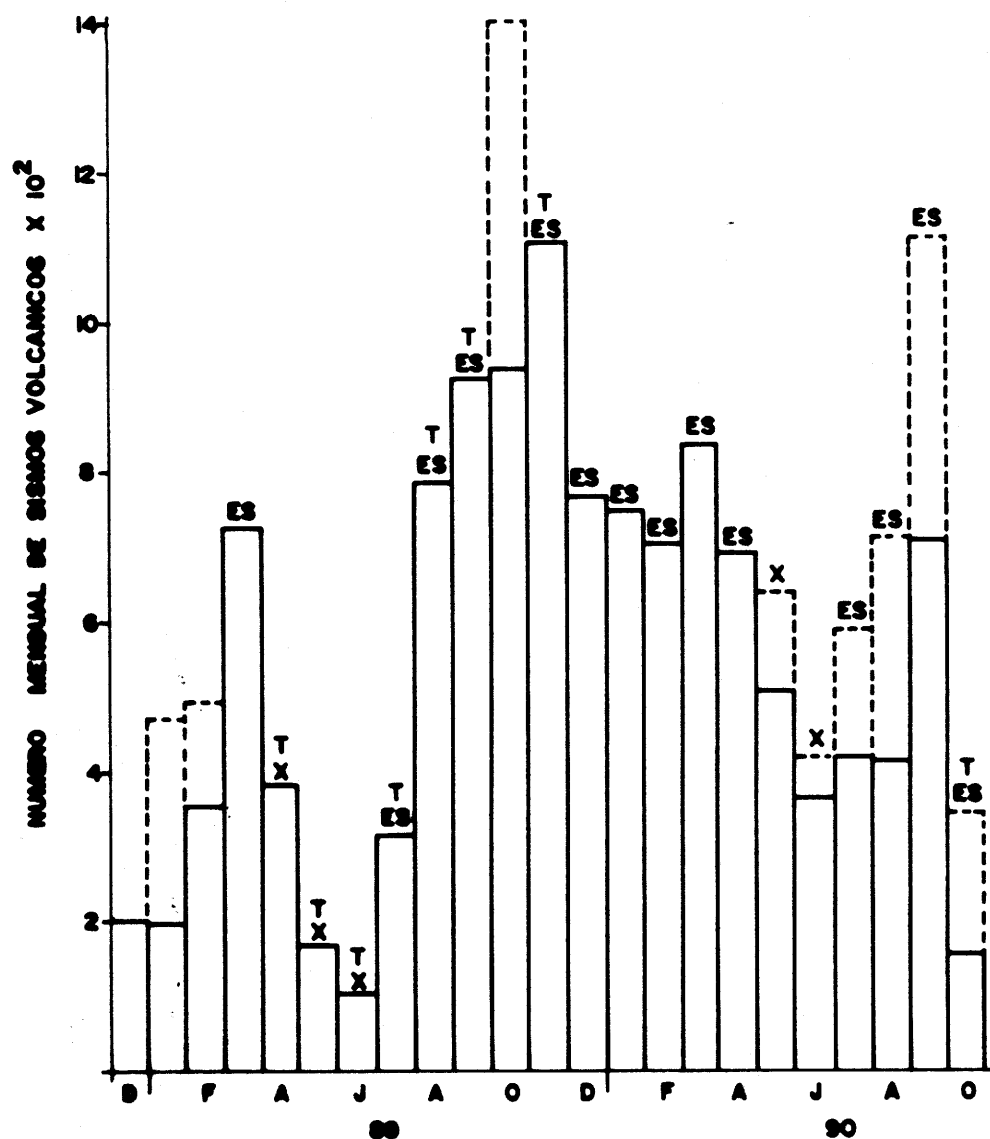


Fig. 12: Número mensual de sismos volcánicos registrados en la Estación Fortuna (localizada 4 km al este de la cumbre del Arenal), diciembre 1988 - octubre 1990. Es: fuerte actividad estromboliana, X: conspicua actividad exhalativa, T: registro prevalente de trémores. Las líneas punteadas indican extrapolación debido a un registro incompleto (Fuente: Boletín OVA).

observada entre julio-octubre de 1990, coincide con el incremento de las explosiones estrombolianas (comparar las Figs. 7 y 12);

- un ligero incremento en la tasa de deflación ocurrido en E entre enero-mayo de 1990, coincide con el decaimiento explosivo en el período (comparar las Figs. 7a y 12);

- cambios en el vector de deformación en D2 durante febrero-noviembre de 1989 y julio-octubre de 1990, pueden correlacionarse con la fuerte actividad en setiembre-noviembre de 1989 y setiembre de 1990, respectivamente;

- la anomalía en la estación F en noviembre de 1989 - mayo de 1990 se correlaciona con la fuerte actividad en noviembre de 1989;

- las anomalías en G en noviembre de 1989 - enero de 1990, y julio-octubre de 1990, pueden correlacionarse con la fuerte actividad en noviembre de 1989 y setiembre de 1990, respectivamente;

- los cambios en la estación I en enero-julio de 1990 pueden correlacionarse con la relativa alta actividad en marzo;

- las anomalías en J en enero-mayo y julio-octubre de 1990, se correlacionan con la fuerte actividad en marzo y setiembre;

- el vector de deformación en K cambió su rumbo norte en mayo-julio de 1990, coincidiendo con la baja actividad en junio.

Sin embargo, no todos los períodos de alto o bajo nivel de actividad, coinciden con cambios en la deformación en todas las estaciones, de manera clara. Pero parece que los cambios en la actividad explosiva, puede alterar el comportamiento de la deformación principal en el Arenal, en menor orden.

#### 4.4. Influencia del ambiente geológico

Finalmente, las unidades geológicas sobre las cuales están instaladas las estaciones de inclinometría seca, pueden desempeñar un rol diferencial y distintivo, el cual podría cambiar ligera o fuertemente, el patrón de deformación en el volcán.

El Arenal sobreyace un graben desarrollado en rocas Plio-Pleistocenas, y el edificio volcánico está formado principalmente por una armazón de lavas en sus secciones central y oriental, y por una cobertura de tefras en la parte occidental (Borgia et al., 1988; Borgia & Linneman, 1990). Las estaciones B, C y D se encuentran sobre los depósitos de flujos piroclásticos de 1968 y sobre la cobertura de tefras previas, que en conjunto tienen un comportamiento menos rígido. E y F están situadas en un área cubierta por tefras y depósitos epiclásticos, que sobreyacen a las unidades volcánicas previas al conjunto Arenal-Chato, cerca del límite del paleo-graben. I y J están sobre campos de lava antiguos del Arenal, y G y K, sobre tefras y depósitos epi-volcanoclásticos, que sobreyacen a su vez coladas antiguas del Arenal.

Debido a la heterogeneidad del estratovolcán -como todos los estratovolcanes-, podemos esperar que el comportamiento en cada

estación es como el movimiento diferencial de pequeños bloques, y su respuesta ante el movimiento del edificio volcánico es, en consecuencia, también heterogéneo. Esta alternativa puede explicar el relativo extraño comportamiento de la deformación en las estaciones E, I y K.

#### 4.5. Comparación entre la deformación 1986-88 y 1988-90

En términos generales, las inclinaciones observadas en las mismas estaciones desde 1986, es similar (cf. Alvarado et al., 1988). Algunas diferencias son:

- aceleración de la deformación en las estaciones C y G;
- cambios en la dirección de inclinación en las estaciones D e I.

Comparando los modelos previos para explicar las deformaciones en el Arenal, debe puntualizarse que una cámara magmática somera no parece correcta solución, mientras que la deformación por el peso de las coladas de lava, parece un argumento sólido. Bajo este punto de vista, las especulaciones de Alvarado et al. (1988) son bastante consistentes. Sin embargo, deben comentarse algunas apreciaciones de estos autores:

- ellos no explican las diferencias en la deformación entre las estaciones B y C. Esta diferencia está en función de la distancia al máximo punto de deformación, cual es el eje de máximo espesor de las coladas (Fig. 11), y por lo tanto sus diferencias no son realmente extrañas;

- estiman que las estaciones D, G, I, J y K muestran un comportamiento aleatorio. Pero en realidad, muestran claras tendencias, con cambios temporales, ya explicados, y que no deben ser considerados como "movimiento cero";

- consideran que no hay un punto máximo de deformación, pero sí existe, coincidente con el eje de espesor máximo de las coladas. También argumentan que a una distancia radial de 2,5 km de un punto localizado a 1 km al norte del cráter A, las deformaciones son ínfimas. Estoy en desacuerdo, en tanto que las deformaciones son detectadas aun a distancias de 4 km desde el punto de máxima deformación (Figs. 8 & 11);

- la dirección anormal de deformación (no dirigida claramente hacia el eje de máxima deformación) en la estación E es interpretada por ellos como un efecto adicional del peso del depósito de flujo piroclástico de 1975 en el río Tabacón (espesor de 10 m, volumen  $1-2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, Fig. 8) o a un efecto local. Esta explicación podría ser válida, pero quizás, el comportamiento de E es controlado por su marco geológico, moviéndose como un bloque;

- proponen un modelo de alimentación magmática con una cámara magmática profunda y un dique radial, cubierto por vapor proveniente del agua subterránea, en un conducto con diámetros diferentes, y en cuyo interior, pulsaciones de magma pueden originar trémores y pequeñas inflaciones. Los autores no son

explícitos, pero de hecho, atribuyen ciertas deformaciones a la actividad actual, con lo cual los datos discutidos están de acuerdo;

- por último, argumentan que algunas pequeñas deformaciones podrían estar causadas por las condiciones hidrogeológicas, geotérmicas y geológicas locales, lo cual parece plausible a raíz de lo discutido en el punto 4.4..

En conclusión, se interpreta que las deformaciones detectadas en la red de inclinometría seca del Arenal, es debida principalmente al peso de las coladas de 1968 al presente, y minoritariamente a cambios en la actividad explosiva y a su entorno geológico.

No obstante, debe puntualizarse que los datos obtenidos en esta red, son insuficientes para seleccionar un modelo completo de fuente de deformación. Las futuras investigaciones en deformación deben incluir un mejoramiento de la red, así como investigación en nivelación precisa en rutas seleccionadas.

## 5- CONCLUSIONES

La deformación superficial en el Arenal es principalmente una respuesta de subsidencia del cuerpo volcánico al peso de los campos de coladas de 1968 al presente ( $10^{12} = 1$  billón de kg, con un volumen de  $0,4-0,5 \text{ km}^3$ ), cuyo centro de deformación está localizado aproximadamente en el área de máximo espesor de lavas. Este patrón general de subsidencia sufre disturbios probablemente por pequeñas deformaciones originadas durante períodos de fuerte actividad estromboliana. También se especula la posibilidad de que el marco geológico en que están instaladas las estaciones de inclinometría, puede contribuir a un comportamiento diferencial en el edificio, moviendo cada una de ellas, en forma de pequeños bloques.

La tasa de inclinación del terreno originada por el peso de las coladas, sigue un camino de decaimiento exponencial en función de la distancia, y puede ser definido por la ecuación:

$$TD = 7,364 \times \text{Exp} (-0,783 d)$$

donde TD es la tasa de deformación en microrradianes/mes, y d es la distancia en km desde el punto deformado hasta el eje de máximo espesor de coladas.

El orden de las tasas de deformación en el Arenal, es comparable a los órdenes encontrados en el Etna y en el Sakurajima, en campos de coladas similares.

Con base en las características petrológicas de los productos actuales del Arenal, el supuesto de una cámara magmática somera no es plausible. En el caso de que el reservorio magmático del Arenal -probablemente localizado en la corteza media- pudiera afectar la

deformación, ésta podría ser ínfima y casi no medible. Las apreciaciones originales de Simon et al. (1970) sobre la deformación debida a una cámara magmática somera, puede ser reinterpretada como causada por una alta tasa de efusión de magma en un cuerpo previamente deformado (inflado), con  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  en 1969 (6 veces mayor que la tasa entre 1974-80, sensu Wadge, 1983).

Finalmente, los datos obtenidos en la actual red de inclinometría seca no son suficientes para construir un preciso modelo de deformación en el Arenal. Deben hacerse esfuerzos para mejorar la red y la investigación en deformación, en busca de un modelo más cuantitativo.

## **6- SUGERENCIAS PARA EL MONITOREO VOLCANICO**

El objetivo original de la instalación de la red de inclinometría seca del Arenal, fue el monitoreo de la actividad volcánica. De las conclusiones de este trabajo, el reflejo de la actividad actual en la deformación superficial, es difícil de evaluar o discriminar de otras fuentes de deformación. Por lo tanto, este trabajo necesita un complemento.

Dos caminos para realizarlo, es mejorar las investigaciones en deformación, y crear una real red sísmica, complementando la única estación existente (4 km al este de la cima) en el área, el cual es el método más valioso para seguir el comportamiento volcánico.

Es necesario, como primer paso, demostrar la validez de las conclusiones de este trabajo, para lo que sugiero la investigación con nivelación precisa en líneas a través de las coladas de lava, en el camino, y en las coladas inactivas ~~más~~ alejadas (del ciclo 1968-74). También, pensando en cambios a mediano plazo en el comportamiento volcánico, y para obtener una mejor imagen de la deformación volcánica, deberían realizarse campañas de nivelación precisa en el camino que rodea el volcán, una vez al año.

Por otra parte, para obtener una correlación más precisa entre la deformación por el peso de coladas, la descarga de magma y la influencia de la actividad explosiva, es necesario realizar cálculos del volumen de lavas y piroclastos eruptados en función del tiempo. Por lo tanto, deben llevarse a cabo estudios del crecimiento del campo de coladas en fotos aéreas y de la cantidad de ceniza emitida.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue realizado durante el período de entrenamiento individual del Curso Grupal de Vulcanología (Organizado por la Japan Cooperation Agency en Japón), en el Observatorio Vulcanológico del Sakurajima, en julio de 1991. Agradezco al personal del OVS por su continua ayuda, a Tsuneo Eto por su asesoría, Kazuhiro Ishihara por sus sugerencias y valiosas discusiones, y Masato Iguchi por su ayuda en diferentes etapas del trabajo. La Unidad de Auscultación de Obras del Departamento de Estudios Básicos del Instituto Costarricense de Electricidad, llevó a cabo las campañas de medición y proveyó los datos para este trabajo. Guillermo Alvarado (GEOMAR, Kiel, Alemania), revisó y proveyó importantes mejoras al texto.

## REFERENCIAS

- Alvarado, G.E., Argueta, S. & Cordero, C., 1988: Interpretación preliminar de las deformaciones asociadas al Volcán Arenal (Costa Rica). Bol. Obs. Vulc. Arenal, 1(2):26-43.
- Beard, J.S. & Borgia, A., 1989: Temporal variation of mineralogy and petrology in cognate gabbroic enclaves at Arenal volcano, Costa Rica. Contrib. Mineral. Petrol., 103:110-122.
- Boletín del Observatorio Vulcanológico del Arenal, 1988-90: Resumen de la actividad del Volcán Arenal. 1(2), 2(3), 2(4), 3(5), 3(6).
- Borgia, A., Poore, C., Carr, M.J., Melson, W.G. & Alvarado, G.E., 1988: Structural, stratigraphic, and petrologic aspects of the Arenal-Chato volcanic system, Costa Rica: Evolution of a young stratovolcanic complex. Bull. Volcanol., 50:86-105.
- Borgia, A. & Linneman, S.R., 1990: On the Mechanisms of Lava Flow Emplacement and Volcano Growth: Arenal, Costa Rica. In: J.H. Fink (Ed.): Lava Flows and Domes Emplacement Mechanisms and Hazard Implications. IAVCEI Proceedings in Volcanology, Springer-Verlag, Berlín, p. 208-243.
- Eto, T., Tanaka, Y. & Ueki, S., 1981: Geophysical survey. Sakurajima Volcano Chapter. In: D. Shimozuru (Ed.): Characteristic of volcanic disaster. Report of Research Project Grant-in-aid for Scientific Research, Ministry of Education of Japan, p.163-173 (\*).

- Ishihara, K., Takayama, T., Tanaka, Y. & Hirabayashi, J., 1981: Lava flows at Sakurajima Volcano (I) -volume of the historical lava flows-. Ann. Dis. Prev. Res. Inst., Kyoto University, vol. 24-B-1:1-10 (\*).
- Matumoto, T., Ohtake, M., Latham, G. & Umaña, J., 1977: Crustal structure in southern Central America. Bull. Seismol. Soc. Am., 67:121-134.
- Melson, W.G., Umaña, J. & Evans, E., 1979: Arenal volcano: Results of dry tilt measurements. SEAN Bull. 4/2:13-16.
- Murray, J.B., 1988: The influence of loading by lavas on the siting of volcanic eruption vents on Mt. Etna. J. Volc. Geoth. Res., 35:121-139.
- Reagan, M.K., Gill, J.B., Malavassi, E. & García, M.O., 1987: Changes in magma composition at Arenal volcano, Costa Rica, 1968-1985: Real-time monitoring of open system differentiation. Bull. Volcanol., 49:415-434.
- Simon, I., Sawdo, R.M., Sáenz, R. & Melson, W.G., 1970: Preliminary results from tiltmeter recording at Arenal volcano, Costa Rica. Informe inédito de Arthur D. Little, Inc., Cambridge, EEUU, 18 pp..
- Van der Laat, R., 1988: Deformaciones asociadas al vulcanismo activo de Costa Rica entre 1981 y 1988. Costa Rican Volcanism Workshop, noviembre 13-18, Shenandoah National Park, EEUU, 12 pp. (inédito).
- Wadge, G., 1983: The magma budget of Volcán Arenal, Costa Rica, from 1968 to 1980. J. Volc. Geoth. Res., 19:281-302.
- Yamashita, K.M., 1981: Dry tilt: a ground deformation monitor as applied to active volcanoes of Hawaii. U.S. Geological Survey Open-File Report, 81-523, 21 pp.

(\*) en japonés.

deformación, ésta podría ser ínfima y casi no medible. Las apreciaciones originales de Simon et al. (1970) sobre la deformación debida a una cámara magnética compacta, puede ser reinterpretada como causada por una alta tasa de elongación de magma en un cuerpo previamente deformado (lítilado), con 2,0 m/s en 1989 (8 veces mayor que la tasa entre 1974-80, Simon y Hodge, 1983).

Finalmente, los datos contenidos en la actual red de inclinómetros seca no son suficientes para construir un preciso modelo de deformación en el Arenal. Deben hacerse esfuerzos para mejorar la red y la investigación en deformación, en busca de un modelo más cuantitativo.

#### 4- SUGERENCIAS PARA EL MONITORIO VOLCANICO

El objetivo original de la instalación de la red de inclinómetros seca del Arenal, fue el monitoreo de la actividad volcánica. De las conclusiones de este trabajo, el reto de la actividad actual en la deformación superficial, es difícil de evaluar o discriminar de otras fuentes de deformación. Por lo tanto, este trabajo necesita un complemento.

Dos caminos para realizarlo, es mejorar las investigaciones en deformación, y crear una red eléctrica, complementando la única estación existente (4 km al este de la cima) en el área, el cual es el método más valioso para seguir el comportamiento volcánico.

Es necesario, como primer paso, demostrar la validez de las conclusiones de este trabajo, para lo que se requiere la investigación con nivelación precisa en líneas a través de las coladas de lava, en el cono, y en las coladas inactivas más antiguas (del ciclo 1968-74). También, pensando en cambios a mediano plazo en el comportamiento volcánico, y para obtener una mejor imagen de la deformación volcánica, deberían realizarse campañas de nivelación precisas en el camino que rodea el volcán, una vez al año.

Por otra parte, para obtener una correlación más precisa entre la deformación por el peso de coladas, la descarga de magma y la influencia de la actividad explosiva, es necesario realizar cálculos del volumen de lavas y piroclásticos erupcidos en función del tiempo. Por lo tanto, deben llevarse a cabo estudios del crecimiento del campo de coladas en fotos aéreas y de la cantidad de ceniza emitida.